

Е.В. КОРШАК, А.И. ЛЯШЕНКО, В.Ф. САВЧЕНКО

# ФІЗИКА



11  
клас

Уровень стандарта





# ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ

# ИЗЛУЧЕНИЙ

Название диапазона	Длина волны, $\lambda$	Частота, $\nu$	Источники излучения
Низкочастотное излучение	свыше 10 000 м	менее 30 кГц	Электротехнические приборы. Переменные токи низкой частоты
сверхдлинные	свыше 10 000 м	менее 30 кГц	Атмосферные явления. Переменные токи в проводниках и колебательных контурах
длинные	10 000 ÷ 1000 м	30 ÷ 300 кГц	
средние	1000 ÷ 100 м	300 кГц ÷ 3 МГц	
короткие	100 ÷ 10 м	3 ÷ 30 МГц	
ультракороткие	10 м ÷ 1 мм	30 МГц ÷ 300 ГГц	
Инфракрасное излучение	1 мм ÷ 780 нм	300 ГГц ÷ 429 ТГц	Излучение молекул и атомов при тепловых и электрических взаимодействиях
Видимый свет	780 ÷ 380 нм	429 ÷ 750 ТГц	
Ультрафиолетовое излучение	380 ÷ 10 нм	$7,5 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{16}$ Гц	Излучение атомов под действием ускоренных электронов
Рентгеновское излучение	$10 \div 5 \cdot 10^{-3}$ нм	$3 \cdot 10^{16} \div 6 \cdot 10^{19}$ Гц	Атомные процессы под действием ускоренных заряженных частиц
Гамма-излучение	менее $5 \cdot 10^{-8}$ нм	свыше $6 \cdot 10^{19}$ Гц	Ядерные и космические процессы, радиоактивный распад



Е. В. КОРШАК  
А. И. ЛЯШЕНКО  
В. Ф. САВЧЕНКО

# Физика

## 11

Учебник для 11 класса  
общеобразовательных  
учебных заведений

*Уровень стандарта*

*Рекомендовано  
Министерством образования  
и науки Украины*

Перевод с украинского

БИБЛИОТЕКА  
ШКОЛЫ № 5  
г. Харьков

Киев  
«Генеза»  
2011

LVT



**ББК 22.3я721**

**К70**

*Рекомендовано Министерством образования и науки Украины  
(приказ МОН Украины № 235 от 16.03.2011 г.)*

**Издано за счет государственных средств. Продажа запрещена**

**Переведено с издания:**

**Фізика : Підручн. для 11 кл. загальноосвіт. навч. закл. : рівень стандарту / Є.В. Коршак, О.І. Ляшенко, В.Ф. Савченко. – К. : Генеза, 2011. – 256 с. : іл.**

**Научную экспертизу осуществлял Институт теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова НАН Украины**

**Психолого-педагогическую экспертизу осуществлял  
Институт педагогики НАПН Украины**

**Коршак Е.В.**

**К70      Физика : Учебн. для 11 кл. общеобразоват. учебн. заведений : уровень стандарта / Е.В. Коршак, А.И. Ляшенко, В.Ф. Савченко; пер. с укр. – К. : Генеза, 2011. – 256 с. : ил.**

**ISBN 978-966-11-0091-5.**

Внимание уделяется изучению основных понятий и законов электродинамики, волновой и квантовой оптики, атомной и ядерной физики в соответствии с программой уровня стандарта. Обучению физике, формированию знаний и экспериментальных умений учащихся способствует дополнительный материал (для тех, кто интересуется физикой или будет проходить ВНО по физике); примеры решения задач и упражнения для самостоятельной работы учащихся; инструкции к лабораторным работам и представление физических демонстраций, иллюстрации; примеры прикладного применения физических знаний в технике и современных технологических процессах и др. Структура и содержание учебника позволяют легко ориентироваться в тексте и использовать учебную книгу как тем, кто желает самостоятельно овладеть учебным материалом, так и учителям для организации учебного процесса.

**ББК 22.3я721**

**ISBN 978-966-11-0091-5 (рус.)**

**ISBN 978-966-11-0066-3 (укр.)**

© Коршак Е.В., Ляшенко А.И.,  
Савченко В.Ф., 2011

© Издательство «Генеза»,  
оригинал-макет, 2011



## Дорогой друг!

Этой книгой заканчивается школьный курс физики, которую ты изучал на протяжении четырех лет. За это время ты овладел основными понятиями и законами физики, научился исследовать физические явления и процессы, применять приобретенные знания для объяснения явлений природы, решать физические задачи. Надеемся, что приобретенные тобой знания и опыт познания физического мира пригодятся тебе в жизни. Ведь мы живем в цивилизованном высокотехнологическом обществе, где научное мировоззрение и соответствующий стиль мышления являются основой комфортного, бесконфликтного сосуществования человека и природы, двигателем научно-технического и социального прогресса. Мир техники и высоких технологий, в котором живет современный человек, требует от каждого из нас если не глубокого знания процессов, происходящих вокруг, то хотя бы понимания их сущности и предвидения последствий, к которым может привести пренебрежение законами природы, в силу невежества и необразованности. Физика, как в первую очередь мировоззренческая наука, формирует мышление, вооружает общенаучными методами познания, необходимыми каждому человеку, независимо от его профессии или особенностей жизнедеятельности.

Принято, что учебник уровня стандарта должен быть ориентирован на обязательные результаты обучения – тот минимальный объем физических знаний, которыми должны овладеть все, окончившие среднюю школу. Вместе с тем авторы понимают, что кое-кто из вас будет сдавать экзамен по физике или проходить внешнее независимое оценивание (ВНО), необходимое при поступлении в высшие учебные заведения. Поэтому отдельные темы расширили и дополнили сведениями, необходимыми по программе ВНО. Они обозначены звездочкой либо выделены как материал для дополнительного чтения.

В 11 классе ты расширишь и углубишь познания в области электрических явлений, оптики, атомной и ядерной физики. На данном этапе обучения приобретенные знания получают необходимое теоретическое обобщение, расширенное обоснование применения его на практике, следовательно, будут способствовать формированию целостности представлений о физической картине мира.

Для того чтобы облегчить ориентацию в тексте и улучшить усвоение учебного материала, авторы сохранили те же условные обозначения, которые применялись в учебнике 10 класса.



– интересные факты, дополнительные сведения о жизнеописаниях ученых



– важно знать, запомнить



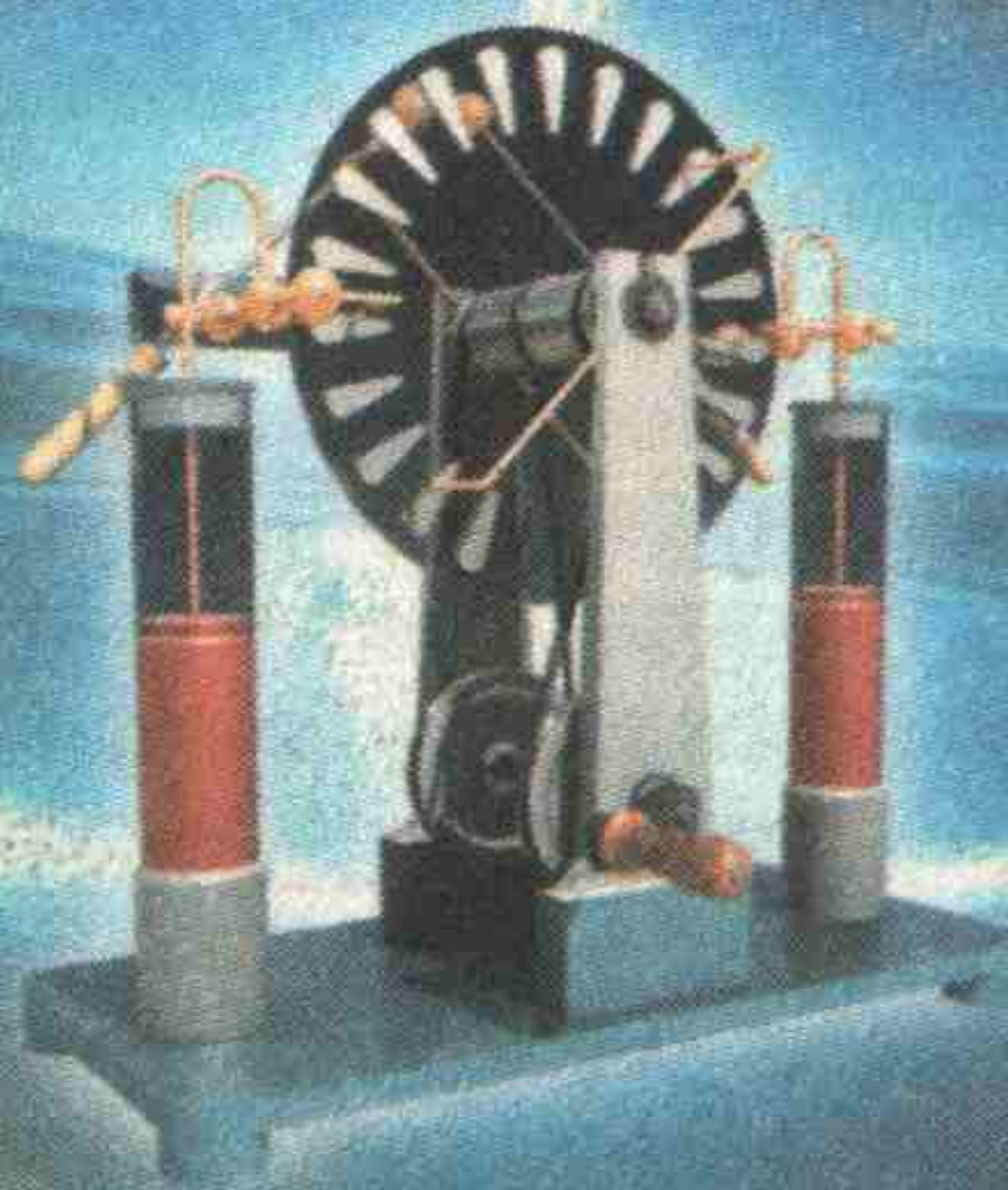
– для дополнительного чтения



– вопросы для повторения и контроля



# Раздел 1



## ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Усвоив материал данного раздела, ты будешь **знать**:

- основные этапы становления учения об электрических явлениях, свойствах электрического поля; законы Ома, Кулона, правила безопасности при работе с электрическими приборами; физические величины, характеризующие электрическое поле;
- сущность силовой и энергетической характеристик электрического поля, поляризации диэлектриков, механизм электропроводимости полупроводников.

Ты сможешь **объяснить**:

- природу электрического тока в различных средах, влияние проводников и диэлектриков на электрическое поле;
- физическую сущность электрических явлений, механизм возникновения ЭДС;
- принципы действия электрических приборов, используемых в быту.

Ты будешь **уметь**:

- составлять схемы различных соединений конденсаторов и резисторов;
- решать задачи на расчет напряженности и потенциала электрического поля, работы и мощности электрического тока;
- рассчитывать электрические цепи с последовательным и параллельным соединением конденсаторов и резисторов.



# ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И ТОК

5

## § 1. Электрическое поле заряженных неподвижных тел

Среди различных явлений природы особое место занимает явление электризации. Вспомним, как потертая мехом эбонитовая палочка начинает притягивать различные легкие предметы. Подобное будем наблюдать и в случае с палочкой, потертой шелком. Находящиеся на небольшом расстоянии наэлектризованные тела притягиваются или отталкиваются друг от друга. Подобные явления называли электрическими.

О телах, между которыми существует электрическое взаимодействие, говорят, что они имеют электрические заряды.

**Свойство, приобретаемое телами при электризации, называют электрическим зарядом.**



Различают два вида электрических зарядов – положительные и отрицательные. Это деление условно, поскольку по проявлению своих свойств они не отличаются друг от друга, только взаимодействуют по-разному. Тела, имеющие разноименные заряды, притягиваются друг к другу, одноименно заряженные тела – отталкиваются.

**Одноименно заряженные тела отталкиваются, разноименные – притягиваются.**





Единицей электрического заряда является кулон (Кл).

Электрический заряд макроскопического тела можно изменять – увеличивать или уменьшать. Но минимальной границей значения электрического заряда является заряд электрона ( $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл). Заряд электрона отрицателен.



**Заряд электрона равен  $-1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.**

Значение заряда в формулах для макроскопических тел обозначается латинской буквой  $Q$ . Эта величина всегда кратна значению заряда электрона. Поэтому значение электрического заряда любого тела можно выразить формулой

$$Q = N \cdot e,$$

где  $N$  – количество электронов;  $e$  – значение заряда электрона.

6 Тела с отрицательным зарядом содержат избыток электронов, а с недостатком электронов – имеют положительный заряд. Т. е. электризация объясняется наличием электронов в теле. У отрицательно заряженных тел электронов больше, чем положительных протонов. У положительно заряженных тел протонов больше, чем электронов. У электрически незаряженных тел отрицательный заряд всех их электронов скомпенсирован положительным зарядом ядер атомов, из которых они состоят.

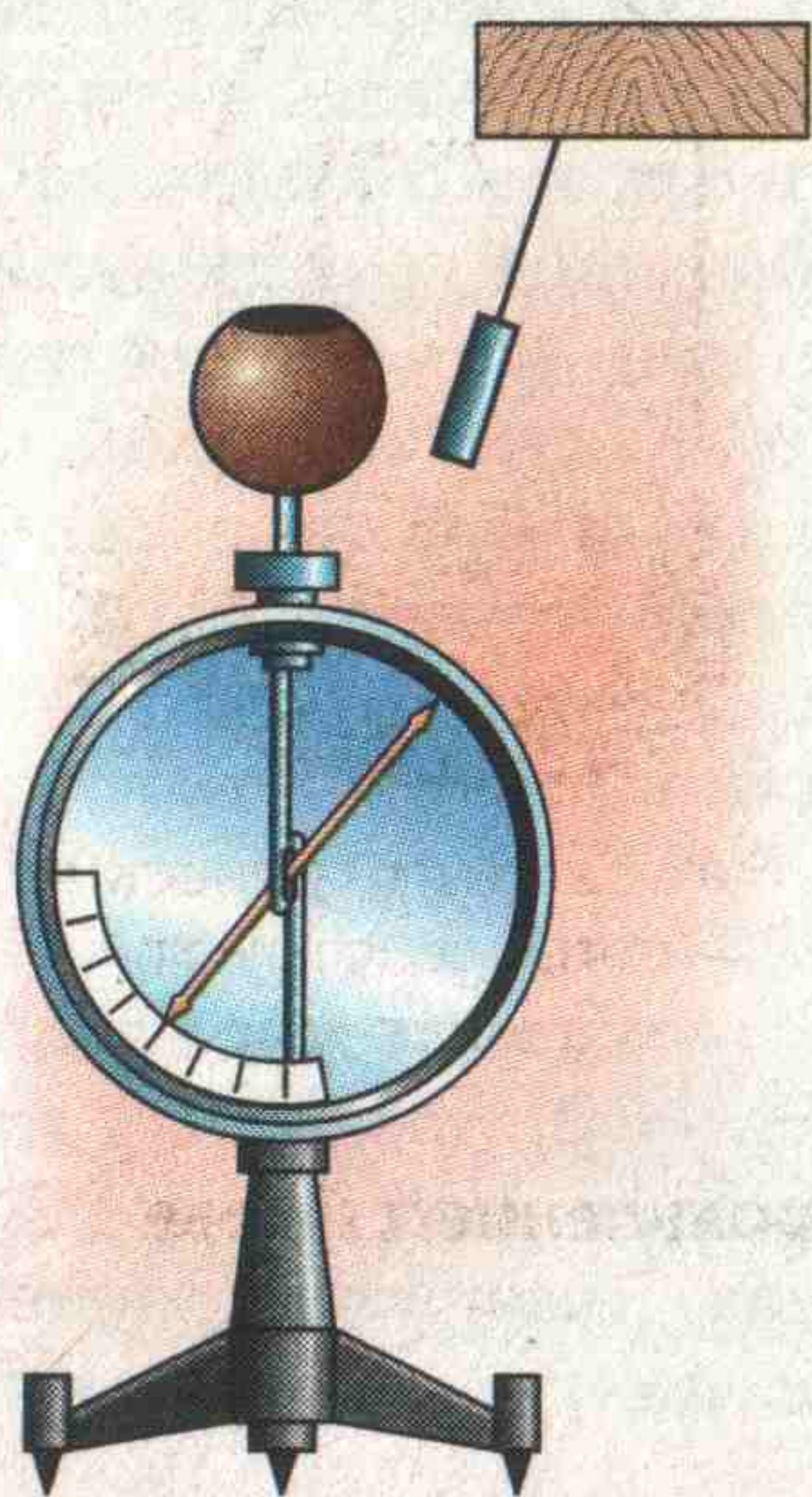


Рис. 1.1. Взаимодействие металлической гильзы и заряженного шара

Рассмотрим подробнее процесс взаимодействия электрически заряженных тел. Для этого укрепим металлический шар на стержне электрометра и зарядим его от эбонитовой палочки, потертой мехом. Стрелка электрометра отклонится от положения равновесия и покажет, что шар имеет электрический заряд. Подвесим на тонкой нити легкую металлическую гильзу и начнем подносить ее к шару. На некотором расстоянии между ними станет заметным взаимодействие – нить отклонится от вертикали на некоторый угол (рис. 1.1).

Если одноименно заряженные металлические листочки подвесить на нитях и расположить под колпаком вакуумного насоса, из-под которого выкачан воздух, то они также будут взаимодействовать между собой (рис. 1.2).



Каков же механизм этого взаимодействия? Многие ученые посвятили свою жизнь поиску ответа на этот вопрос. Выдающийся английский ученый М. Фарадей, обобщив все известные в то время знания об электричестве, предположил, что каждое тело, обладающее электрическим зарядом, имеет свое электрическое поле.

**Электрическое поле – особый вид материи, посредством которого происходит взаимодействие между заряженными телами. Оно связано с каждым заряженным телом и обеспечивает действие одного заряженного тела на другое.**

Каковы же свойства электрического поля?

Главным свойством электрического поля является его материальность, поэтому оно действует на все электрически заряженные тела. Согласно современным научным воззрениям, сложившимся как обобщение многочисленных экспериментальных и теоретических исследований, взаимодействие между телами происходит потому, что на каждое из них действует поле его «соседа».

**Любые изменения в электрическом поле распространяются со скоростью света.**

Если состояние одного из наэлектризованных тел изменяется, то изменяются и характеристики его электрического поля. Они происходят не мгновенно, а с конечной скоростью, равной скорости света в вакууме.

Теоретическими исследованиями английского физика Дж. Максвелла было установлено, что существует единое электромагнитное поле, отдельным проявлением которого является поле электрическое. Если в некоторой системе заряженное тело неподвижно, то его поле называют *электростатическим*.

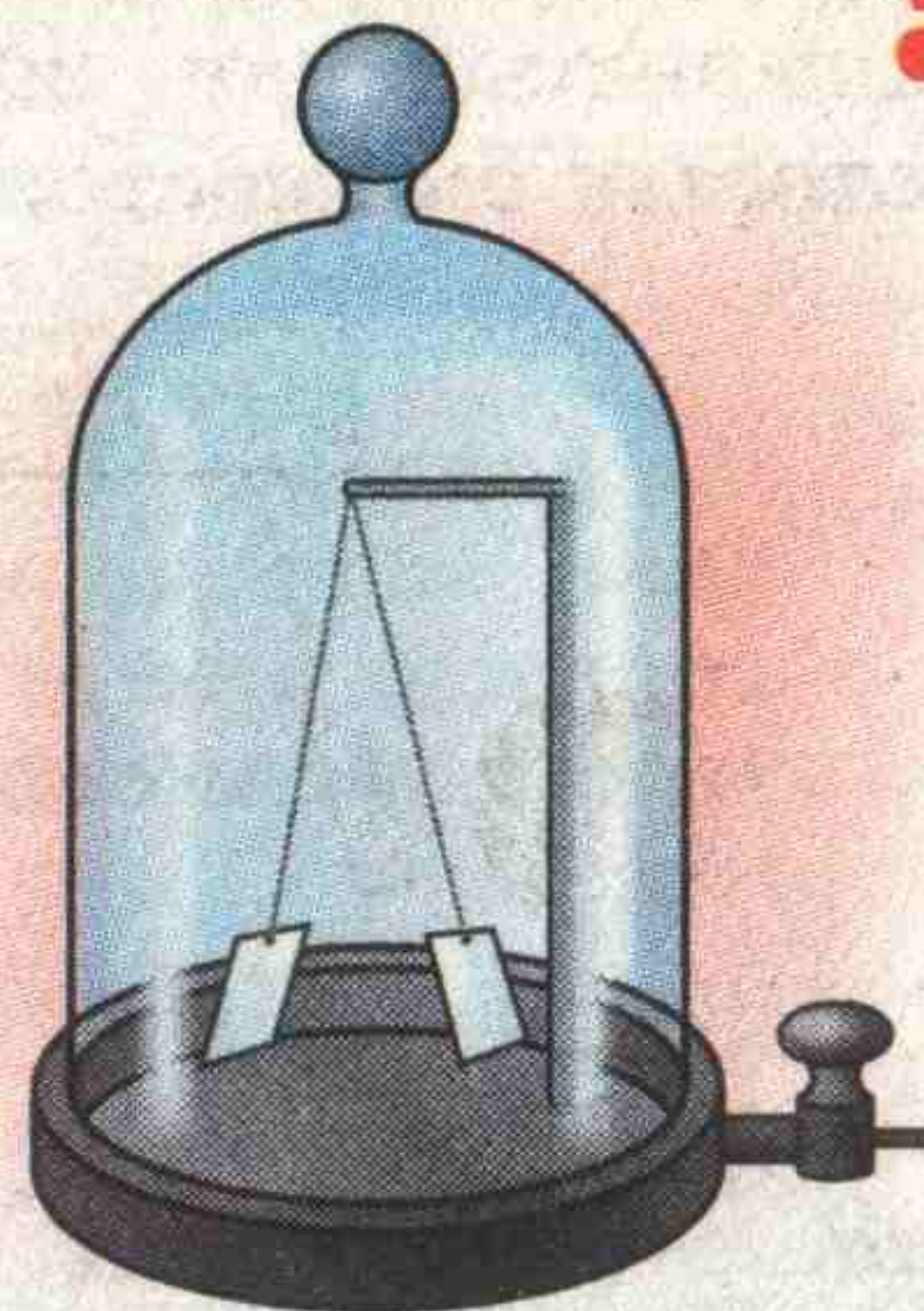


Рис. 1.2. Электрические силы действуют и в вакууме

**Электрическое поле является отдельным проявлением более сложного электромагнитного поля.**

1. Кто открыл электрическое поле?
2. Каково значение исследований Дж. Максвелла?
3. Какое поле называют электростатическим?



## § 2. Напряженность электрического поля

Действие различных электрических полей на тело с электрическим зарядом может быть разным. Сила, характеризующая это действие, будет зависеть не только от заряда данного тела, но и от характеристик поля. Но в каждом отдельном случае для данной точки поля она будет пропорциональна значению электрического заряда тела. Установлено, что отношение силы  $\vec{F}$ , действующей на заряженное тело, к его значению  $Q$  будет для данной точки поля постоянным:

$$\frac{\vec{F}_1}{Q_1} = \frac{\vec{F}_2}{Q_2} = \frac{\vec{F}_3}{Q_3} = \dots = \frac{\vec{F}}{Q},$$

где  $\vec{F}$  – сила, действующая на заряд;  $Q$  – значение «пробного» заряда.

8 В электрическом поле другого тела или даже (в некоторых случаях) данного поля это отношение будет другим. Величина, равная отношению силы к значению «пробного» заряда, характеризует силовое действие поля в каждом конкретном случае и называется *напряженностью* поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}.$$



**Напряженность электрического поля – это физическая величина, являющаяся силовой характеристикой электрического поля и равная отношению силы, действующей на заряженное тело, к значению этого заряда.**

Напряженность является векторной величиной, определяющей значение силы, действующей на заряженное тело, и ее направление.

При измерении напряженности электрического поля применяют единицу, которая называется «ньютон

на кулон –  $\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ » или «вольт на метр –  $\frac{\text{В}}{\text{м}}$ »). Напряженность в  $1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$  ( $1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ ) имеет поле, в исследуемой точке которого на тело с зарядом 1 Кл действует сила 1 Н.

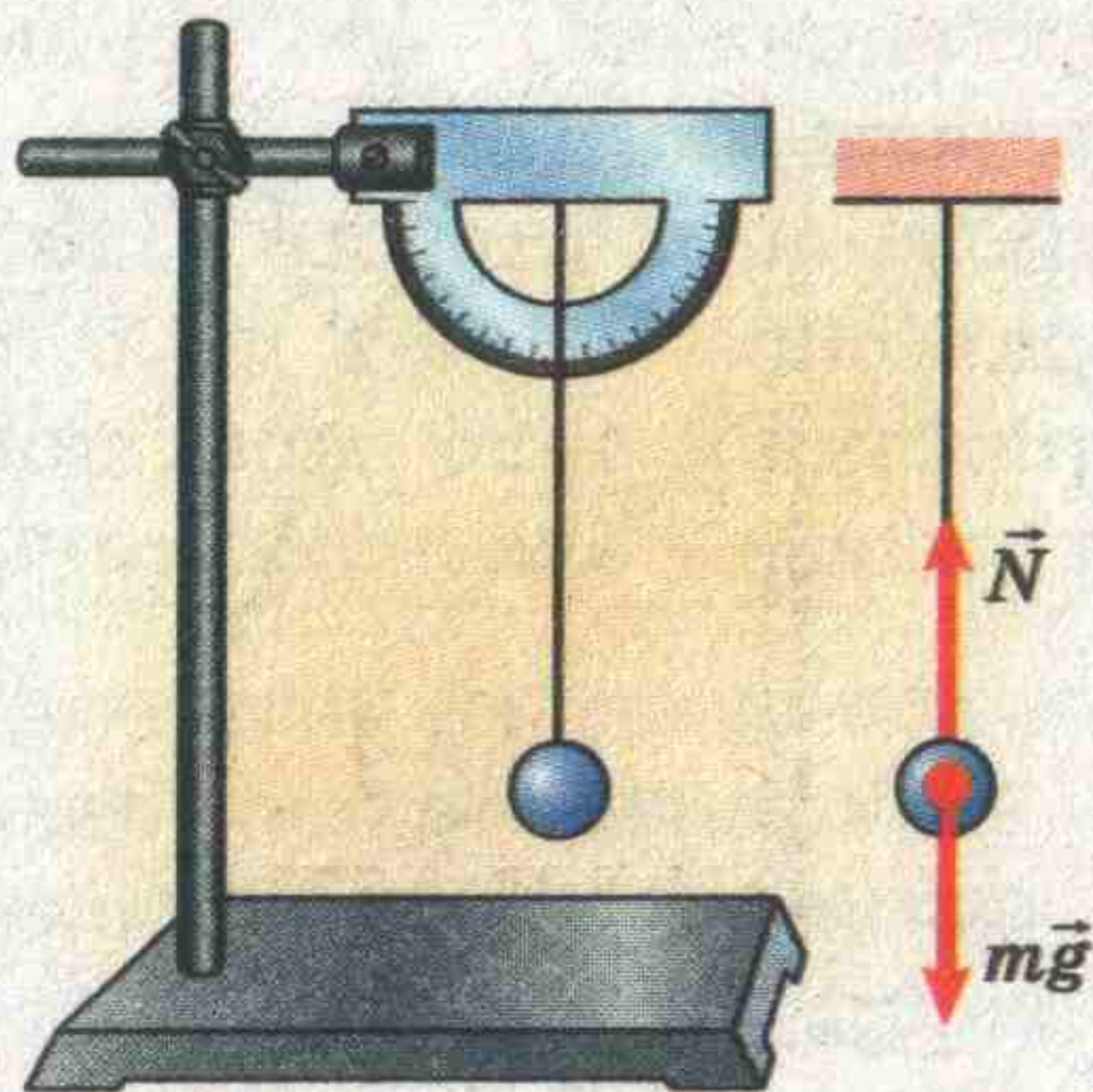


Рис. 1.3. На шарик действуют сила тяжести и сила натяжения нити



Из определения напряженности следует и способ прямого измерения напряженности электрического поля: зная значение электрического заряда некоторого тела, необходимо измерить силу, действующую в поле на это тело.

**Пример.** Легкий шарик массой  $0,4 \text{ г}$  подвешен на нити и имеет положительный электрический заряд  $4,9 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ . После внесения шарика в электрическое поле нить подвеса отклонилась от вертикали на угол  $7^\circ$ . Какова напряженность поля?

### Решение

При отсутствии электрического поля на шарик действуют только сила тяжести и сила упругости. Поэтому нить подвеса имеет вертикальное положение (рис. 1.3).

В электрическом поле (рис. 1.4) на шарик будет действовать еще и сила электрического взаимодействия. Из условия известно, что следствием этого будет отклонение нити на угол  $7^\circ$  от вертикали (на рис. 1.5 этот угол показан значительно большим для наглядности). По рисунку можно установить,

что  $F = mgtg\alpha$ , а напряженность  $E = \frac{F}{Q} = \frac{mgtg\alpha}{Q}$ .

Произведя расчеты, получим

$$E = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \frac{0,1228}{4,9 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}} = 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$$

Благодаря достижениям современной электронной техники созданы специальные приборы для измерения напряженности электрического поля. Они позволяют производить прямые измерения напряженности, когда результаты измерения выводятся непосредственно на шкалу прибора (рис. 1.6).

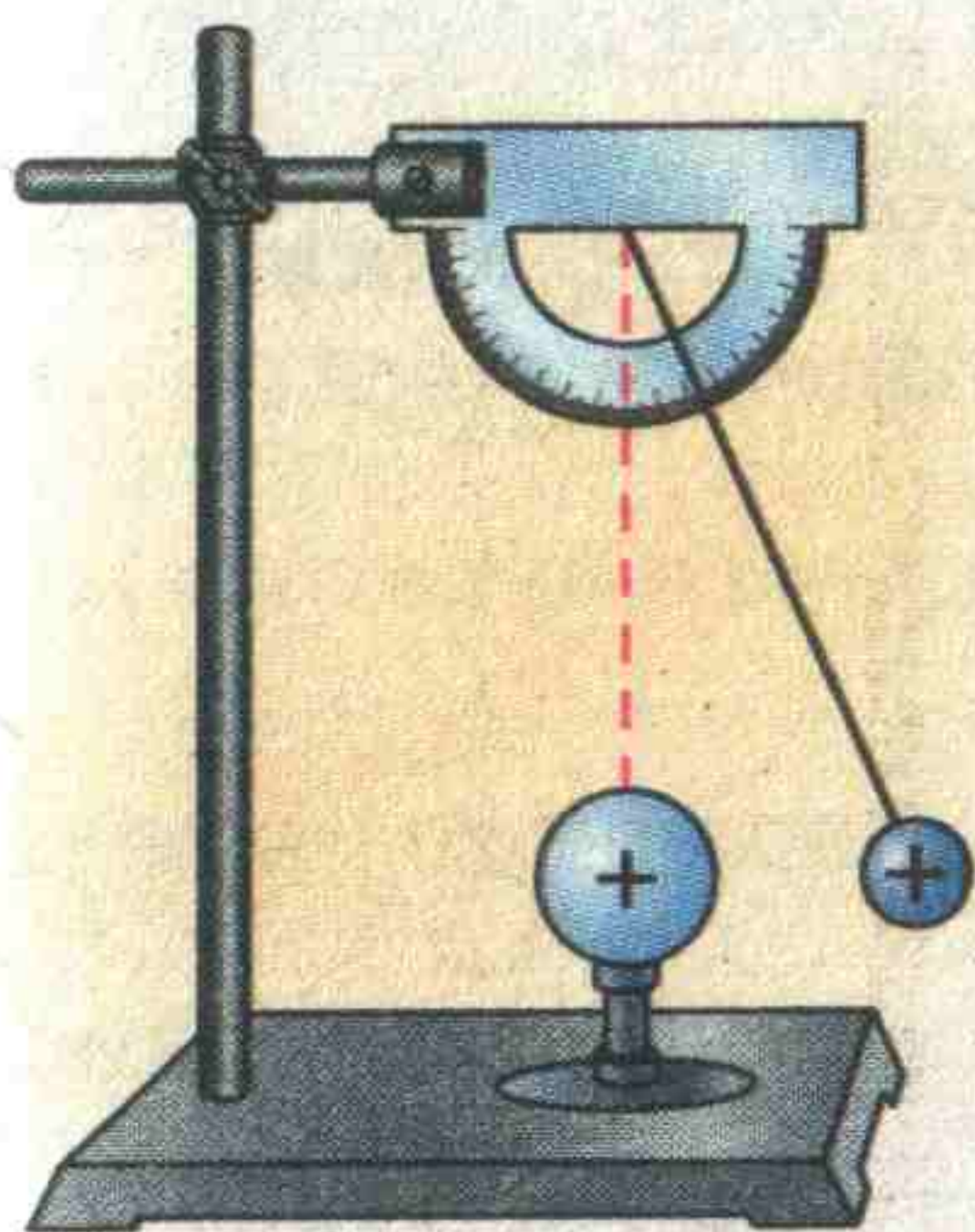


Рис. 1.4. Заряженный шарик отталкивается от одноименно заряженного шара

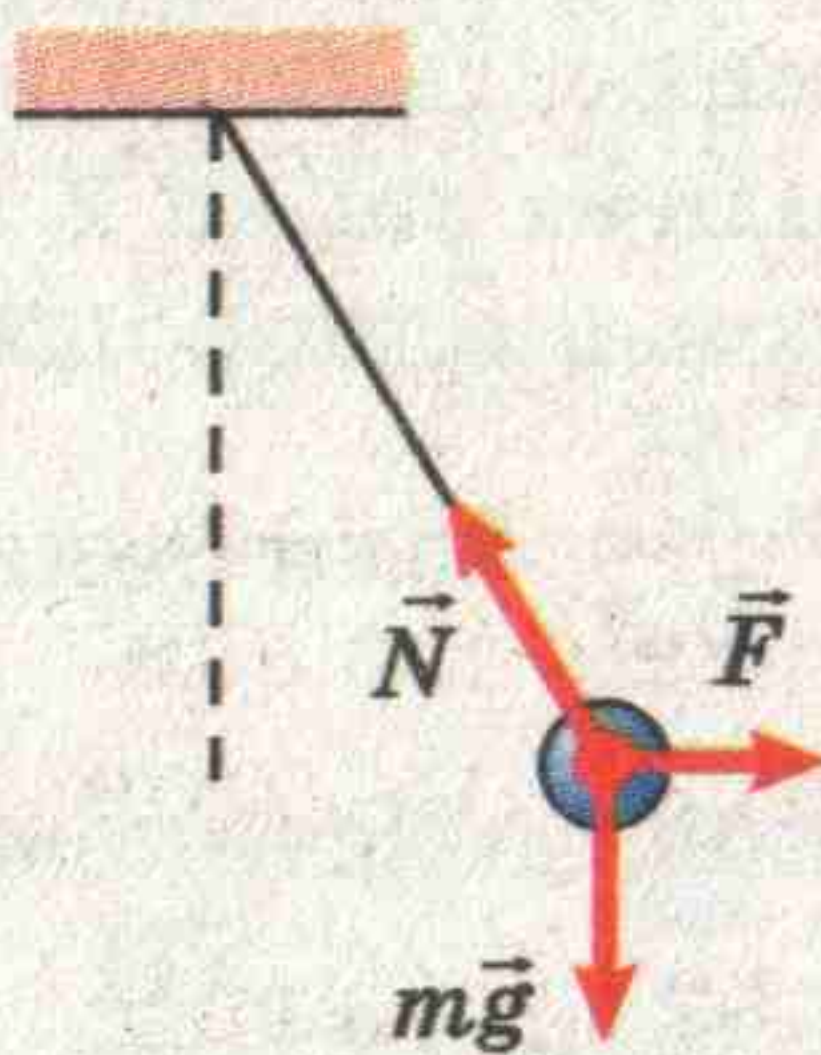


Рис. 1.5. Силы, действующие на заряженный шарик в электрическом поле

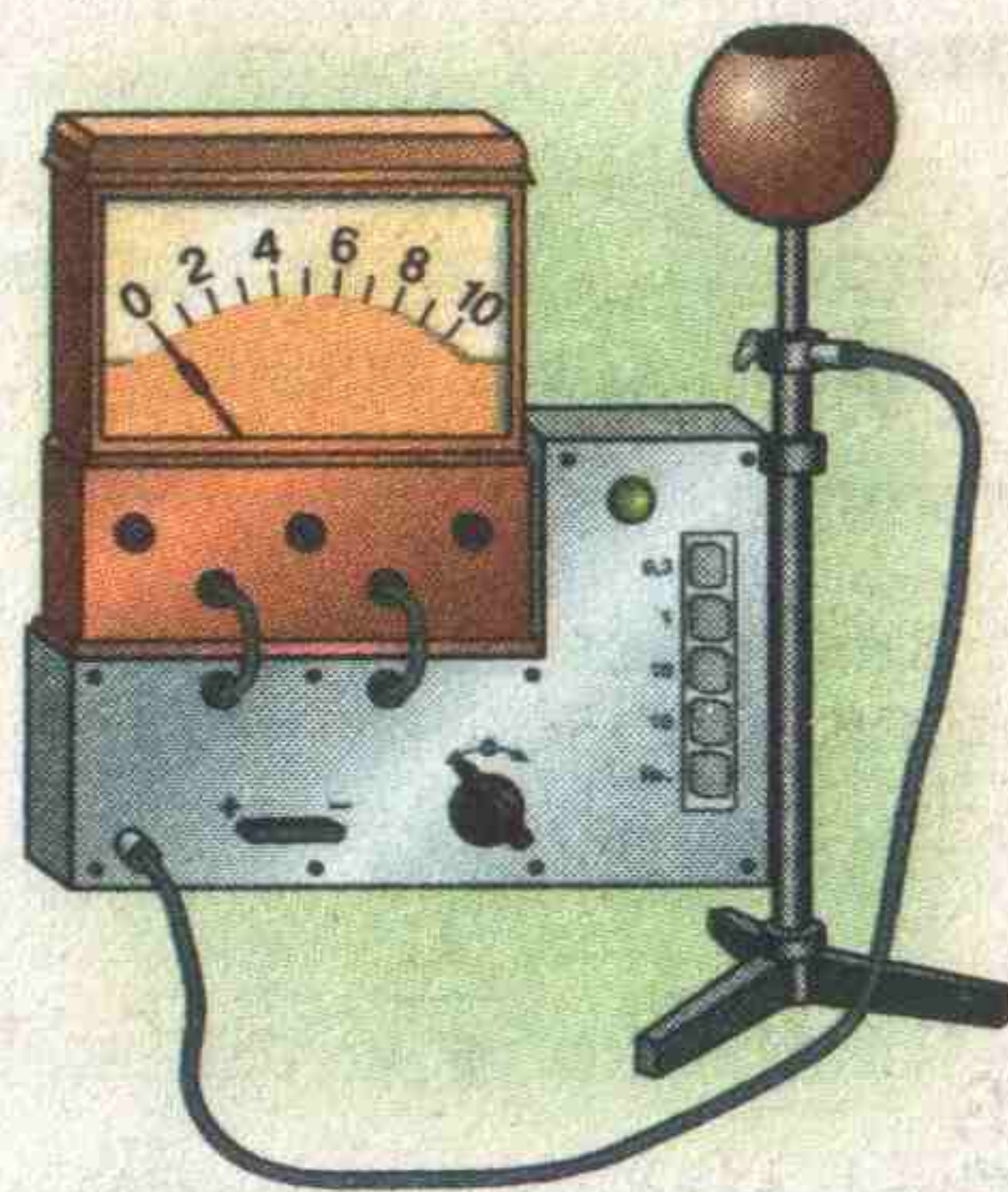


Рис. 1.6. Лабораторный измеритель напряженности электрического поля



Непосредственное измерение напряженности электрического поля позволяет заблаговременно рассчитывать силу, действующую на данное тело:

$$\vec{F} = Q\vec{E}.$$

Если в различных точках поля на заряженное тело действуют одинаковые силы, то такое поле называют *однородным*.



Если в различных точках поля на заряженное тело действуют не одинаковые силы, то такое поле называют *неоднородным*.



10

1. Какое свойство электрического поля описывает напряженность?
2. Какую физическую величину называют напряженностью электрического поля?
3. Каковы единицы напряженности электрического поля?
4. Какие преимущества прямых измерений напряженности электрического поля перед косвенными?
5. С какой целью измеряют напряженность электрического поля?
6. Как рассчитать силу, действующую на заряженное тело в электрическом поле?
7. Какое электрическое поле называют однородным? Неоднородным?

### Упражнение 1

1. Модуль напряженности электрического поля в точке, где находится тело, заряд которого  $0,2 \text{ мкКл}$ , равен  $8 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ . Каково значение силы, действующей на тело?

2. На тело, имеющее заряд  $6 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ , действует сила  $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$ . Какова напряженность электрического поля в этой точке?

3. В некоторой точке на тело с зарядом  $4 \text{ мкКл}$  действует сила  $0,6 \text{ мкН}$ . Какова напряженность поля в этой точке?

4. Шарик массой  $5 \text{ г}$  имеет заряд  $2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ . С каким ускорением он будет двигаться в однородном электрическом поле с напряженностью  $3 \cdot 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ , если сила тяжести будет компенсирована?

5. Электрон только под действием однородного электрического поля напряженностью  $182 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$  движется с ускорением. Определить ускорение электрона.

6\*. В однородном электрическом поле двух вертикальных параллельных пластин поместили шарик массой  $2 \text{ г}$ , подвешенный на тонкой нерастяжной и непроводящей нити. Шарик сообщил заряд  $10^{-6} \text{ Кл}$ . Определить напряженность



электрического поля, если нить отклонилась на  $30^\circ$  от вертикали.

7\*. Какое расстояние пролетит электрон в однородном электрическом поле напряженностью  $200 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$  до полной остановки, если он влетает в электрическое поле с начальной скоростью  $5 \cdot 10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  в направлении силовых линий поля?

### § 3. Принцип суперпозиции электрических полей

Одной из особенностей электрического поля является то, что в одной и той же точке пространства могут существовать поля различных источников и происхождения. При этом каждое из них сохраняет свои характеристики и не изменяется под действием остальных полей.

Пусть в некоторой точке  $A$  пространства находится некоторое тело с электрическим зарядом  $Q_1$  (рис. 1.7).

Если в произвольную точку  $B$  внесем точечное тело с положительным зарядом  $Q_0$ , на него будет действовать сила  $F_1$  как результат взаимодействия заряда тела  $B$  с электрическим полем тела  $A$ .

В произвольную точку пространства  $C$  внесем тело с зарядом  $Q_2$  (рис. 1.8). Его поле будет действовать на тело  $B$  с силой  $F_2$ . Никаких изменений с силой  $F_1$  не произойдет. Но из механики известно, что если на тело действует несколько сил, то их можно заменить равнодействующей (рис. 1.9). Для случая нескольких сил

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n.$$

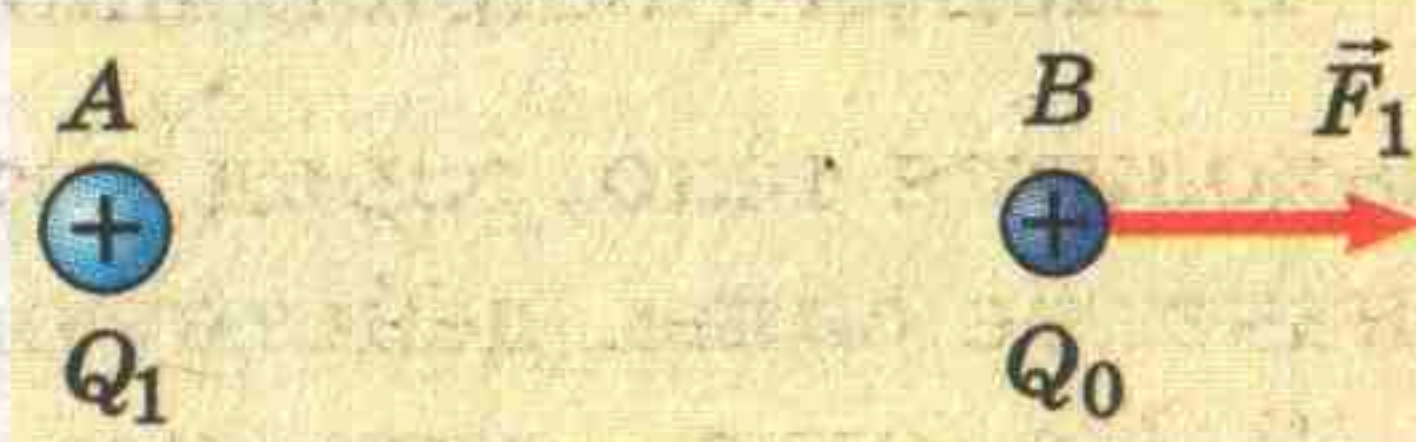


Рис. 1.7. Силы, действующие в электрическом поле на точечное заряженное тело

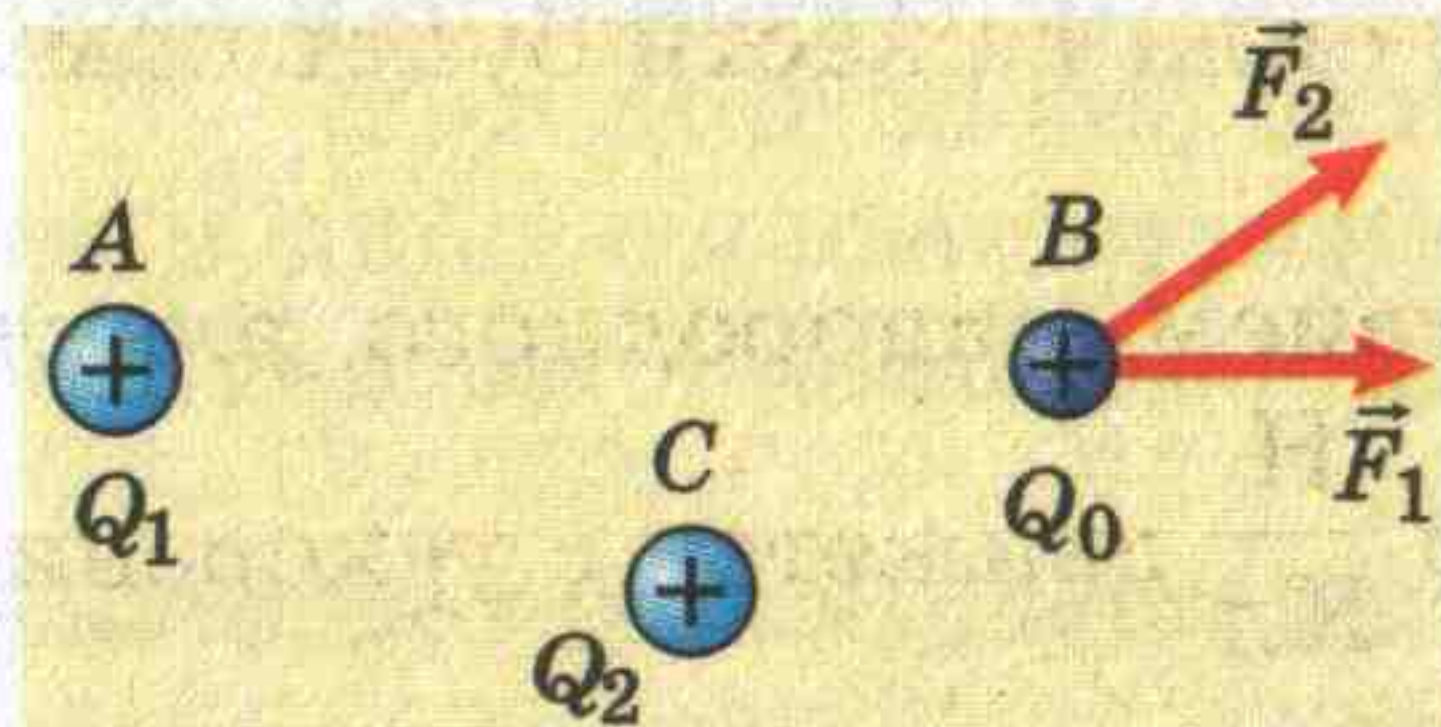


Рис. 1.8. Силы, действующие на точечное заряженное тело в поле двух электрических заряженных тел

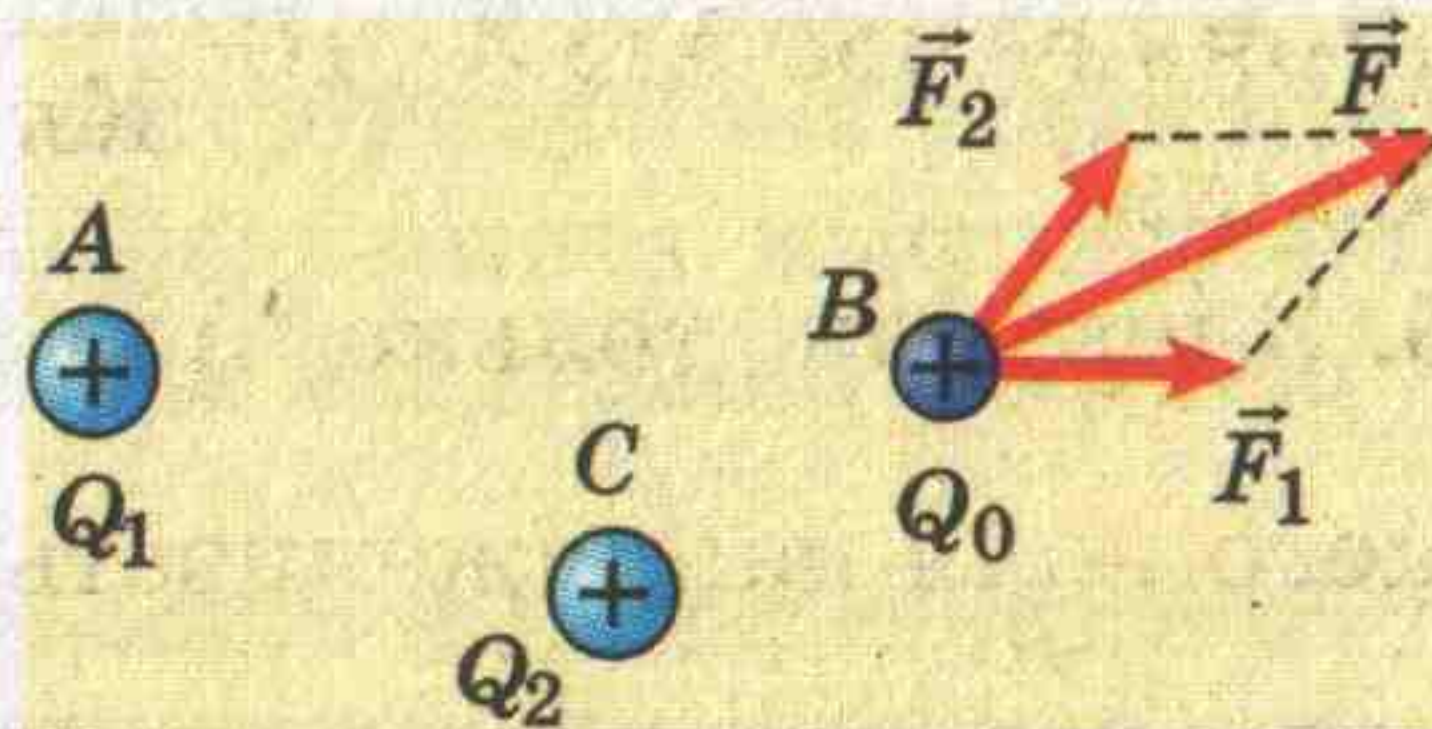


Рис. 1.9. Равнодействующая двух электрических сил



Если обе части уравнения разделить на  $Q_0$ , то получим

$$\frac{\vec{F}}{Q_0} = \frac{\vec{F}_1}{Q_0} + \frac{\vec{F}_2}{Q_0} + \frac{\vec{F}_3}{Q_0} + \dots + \frac{\vec{F}_n}{Q_0},$$

или

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n,$$

где  $\vec{E}$  – напряженность поля системы всех тел;  $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \dots, \vec{E}_n$  – напряженности поля каждого отдельного тела.

Таким образом, при расчете взаимодействия заряженного тела с полем нескольких источников можно пользоваться понятием «суммарного» поля всех источников – заряженных тел. Этот вывод называют принципом суперпозиции электрических полей: *напряженность электрического поля нескольких заряженных тел в любой точке пространства равна векторной сумме напряженностей полей отдельных тел в этой точке.*

$$\vec{E} = \sum_{n=1}^{\infty} \vec{E}_n.$$

12



**Напряженность нескольких заряженных тел в любой точке пространства равна векторной сумме напряженностей отдельных тел в этой точке.**



1. Как формулируется принцип суперпозиции?
2. Какое свойство электрического поля положено в основу принципа суперпозиции?
3. Как понимать выражение «суммарное» поле?

## § 4. Проводники в электрическом поле

Действие электрического поля распространяется на все без исключения природные объекты – от макроскопических тел до микроскопических частиц, входящих в состав вещества: электроны, протоны, позитроны и т. д. Именно эти частицы определяют электрические свойства различных тел.

Рассмотрим взаимодействие электрического поля с наиболее распространенным классом проводников – металлами.



**Электрические свойства вещества определяются наличием в них электронов, протонов, ионов.**

Возьмем два металлических цилиндра и соединим каждый со стержнем заземленного электрометра. Расположим цилиндры между двумя параллельными металлическими пластинами



так, чтобы они, касаясь друг друга, составляли единое целое (рис. 1.10). Если зарядим пластины разноименными зарядами, то увидим, что стрелки электрометров отклонятся от положения равновесия и засвидетельствуют наличие заряда на цилиндре (рис. 1.11).

**Явление возникновения зарядов на проводниках в электрическом поле называется электростатической индукцией.**

Если с пластин убрать заряды, то заряды исчезнут и на цилиндрах. Это подтверждает, что на проводнике заряды возникли под действием электрического поля пластин.

Явление возникновения зарядов на проводниках в электрическом поле называется *электростатической индукцией*.

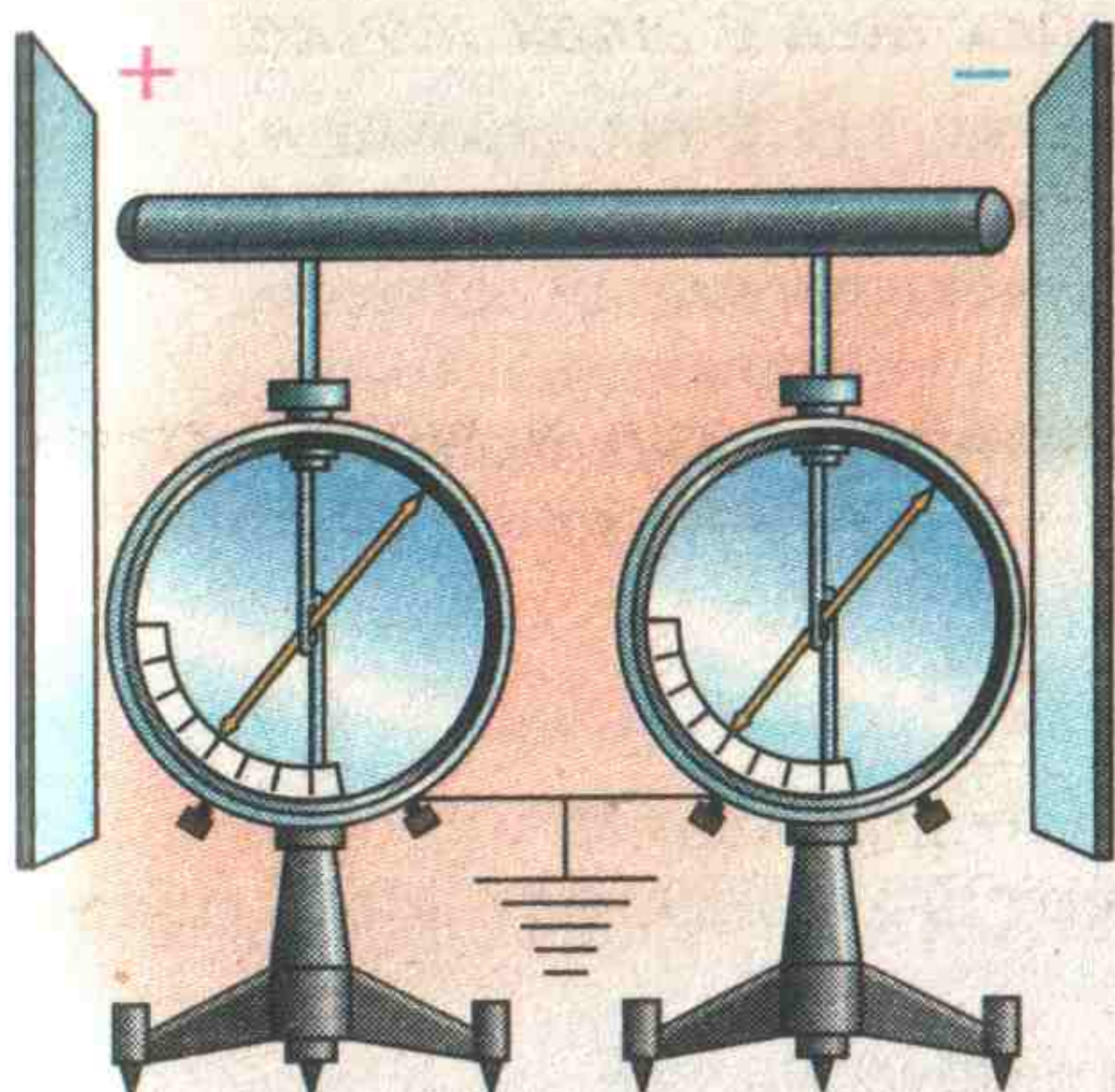


Рис. 1.10. Электростатическая индукция

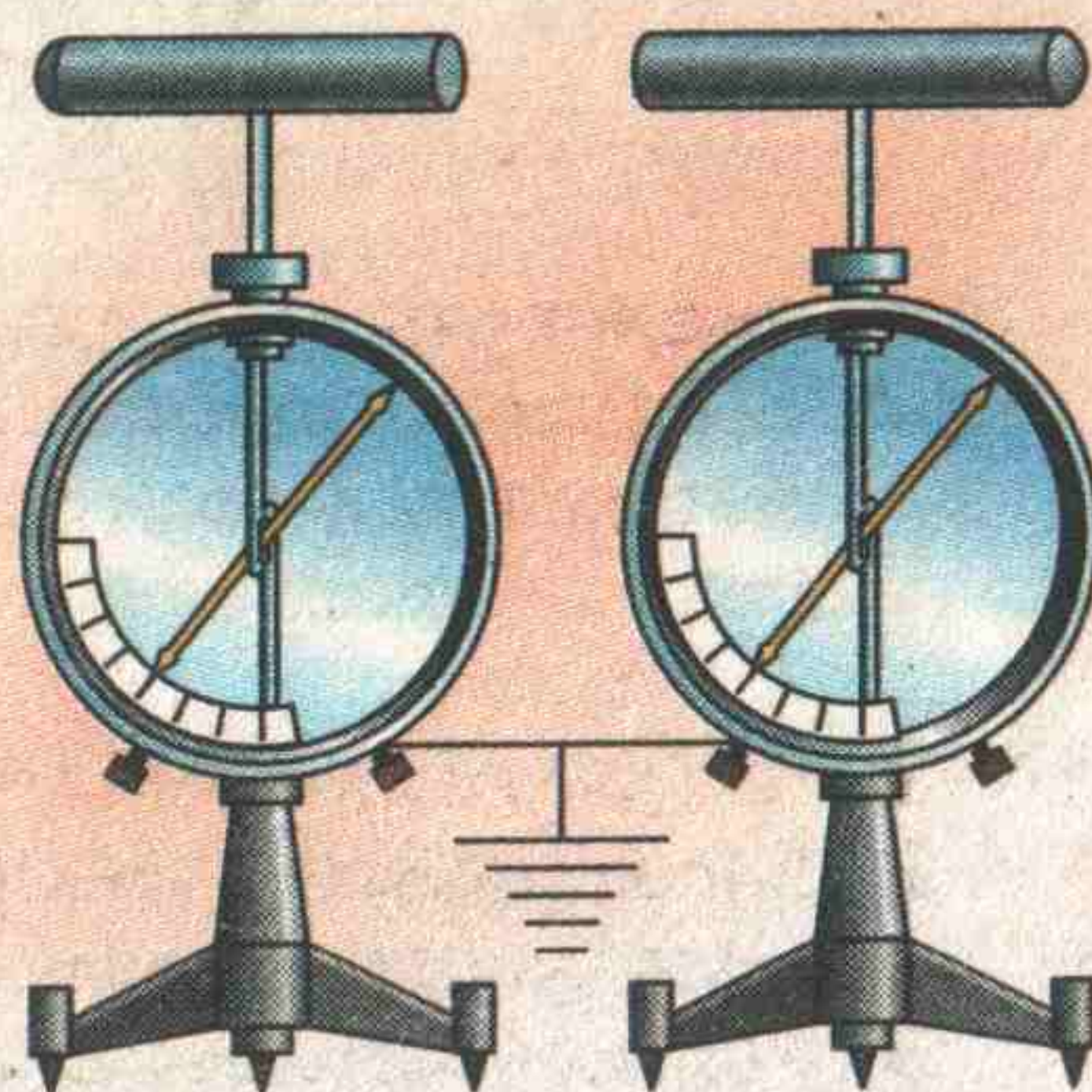


Рис. 1.11. Металлические цилиндры в электрическом поле пластин зарядились разноименно

Проведем предыдущий опыт повторно. Но после того как электрометры отметят наличие зарядов на концах проводника, разведем цилиндры и разрядим пластины. Электрометры и после этого будут отмечать наличие зарядов на цилиндрах (рис. 1.11).

Исследовав с помощью эбонитовой палочки знак заряда цилиндра, увидим, что цилиндры имеют разноименные заряды.

Подобное явление наблюдается при электризации всех металлических тел в электрическом поле. Если к металлическому шарiku, не заряженному изначально, поднести наэлектризованную эбонитовую или стеклянную палочку, то шарик будет притягиваться к ней. Это можно объяснить тем, что под действием электрического поля заряженной палочки в шарике



происходит перераспределение заряженных частиц (рис. 1.12). Поэтому внутри металлических проводников отсутствует электрическое поле. Это явление применяют для изготовления металлических экранов, защищающих различные приборы от действия электрического поля (рис. 1.13).

Металлические экраны устраняют также нежелательное электрическое взаимодействие в различных электронных устройствах.

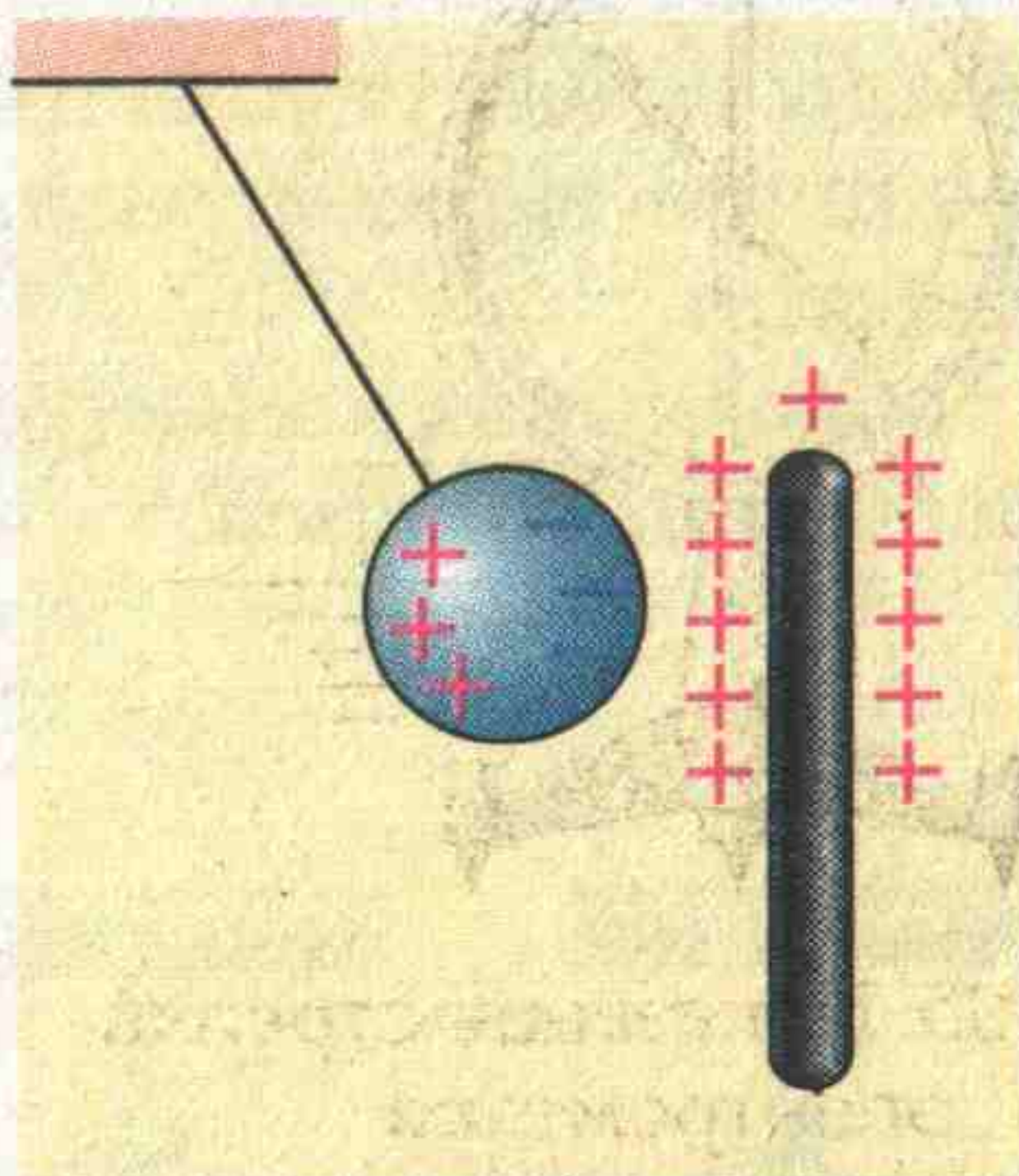


Рис. 1.12. Взаимодействие металлического шарика и заряженной палочки

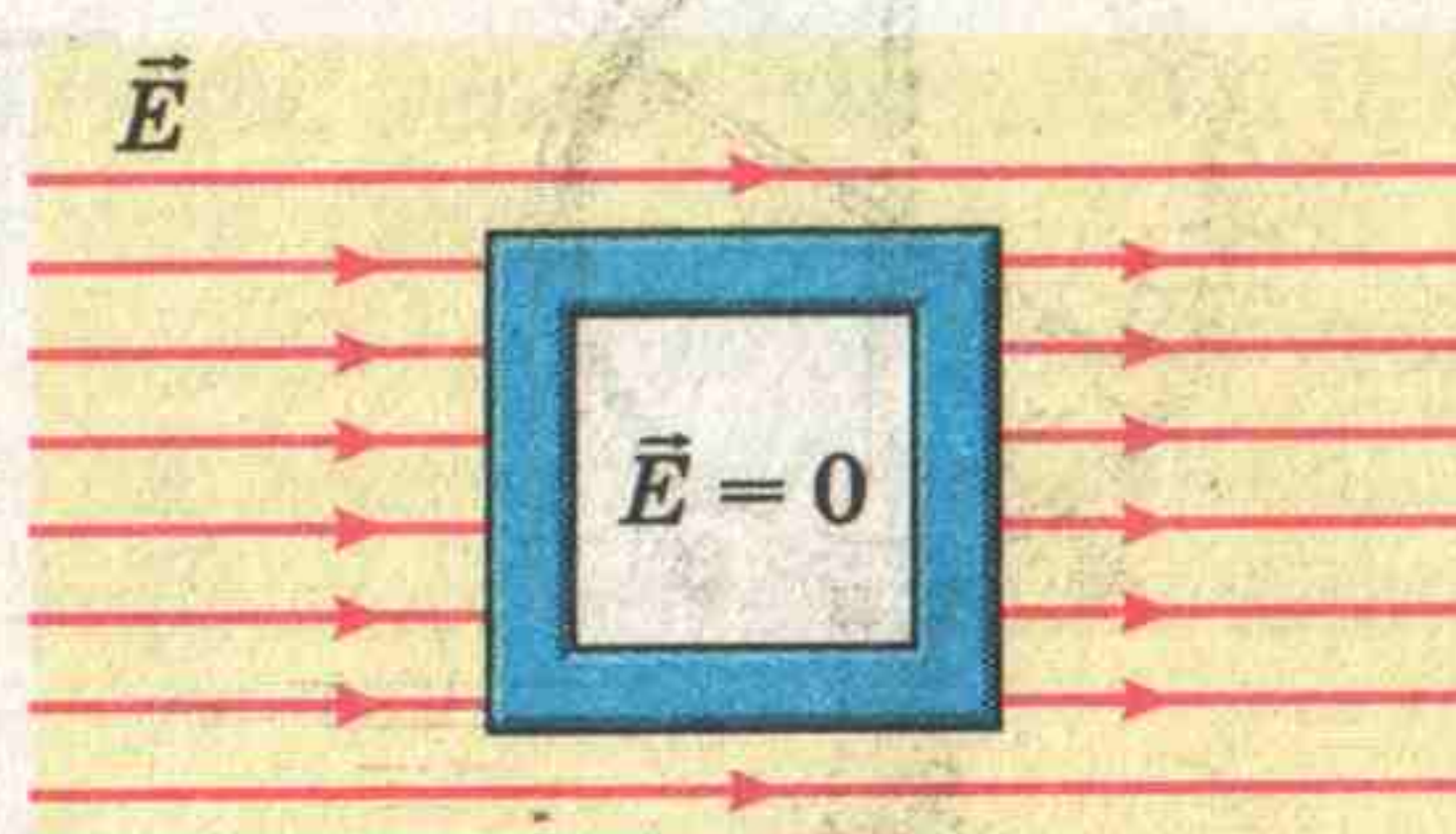


Рис. 1.13. В пространстве, ограниченном металлическим экраном, напряженность электрического поля равна нулю

14

1. Что происходит при внесении металлического проводника в электрическое поле?
2. Какое явление называют электростатической индукцией?
3. Как зарядить два тела разноименными зарядами, не касаясь их другим заряженным телом?
4. Почему в металлическом проводнике отсутствует электрическое поле?
5. С какой целью применяют электрические экраны?

## § 5. Диэлектрики в электрическом поле

Укрепим на стержне электрометра металлическую пластину и сообщим ей некоторый заряд. При этом стрелка отклонится от положения равновесия (рис. 1.14).

Поднесем к диску пластину из плексигласа или другого диэлектрика. Показания стрелки электрометра заметно уменьшатся (рис. 1.15).

Похожее явление будем наблюдать в случае приближения к пластине палочки, заряженной зарядом противоположного



знака. Это позволяет сделать вывод, что при приближении диэлектрика к пластине на нем образуется электрический заряд противоположного знака.

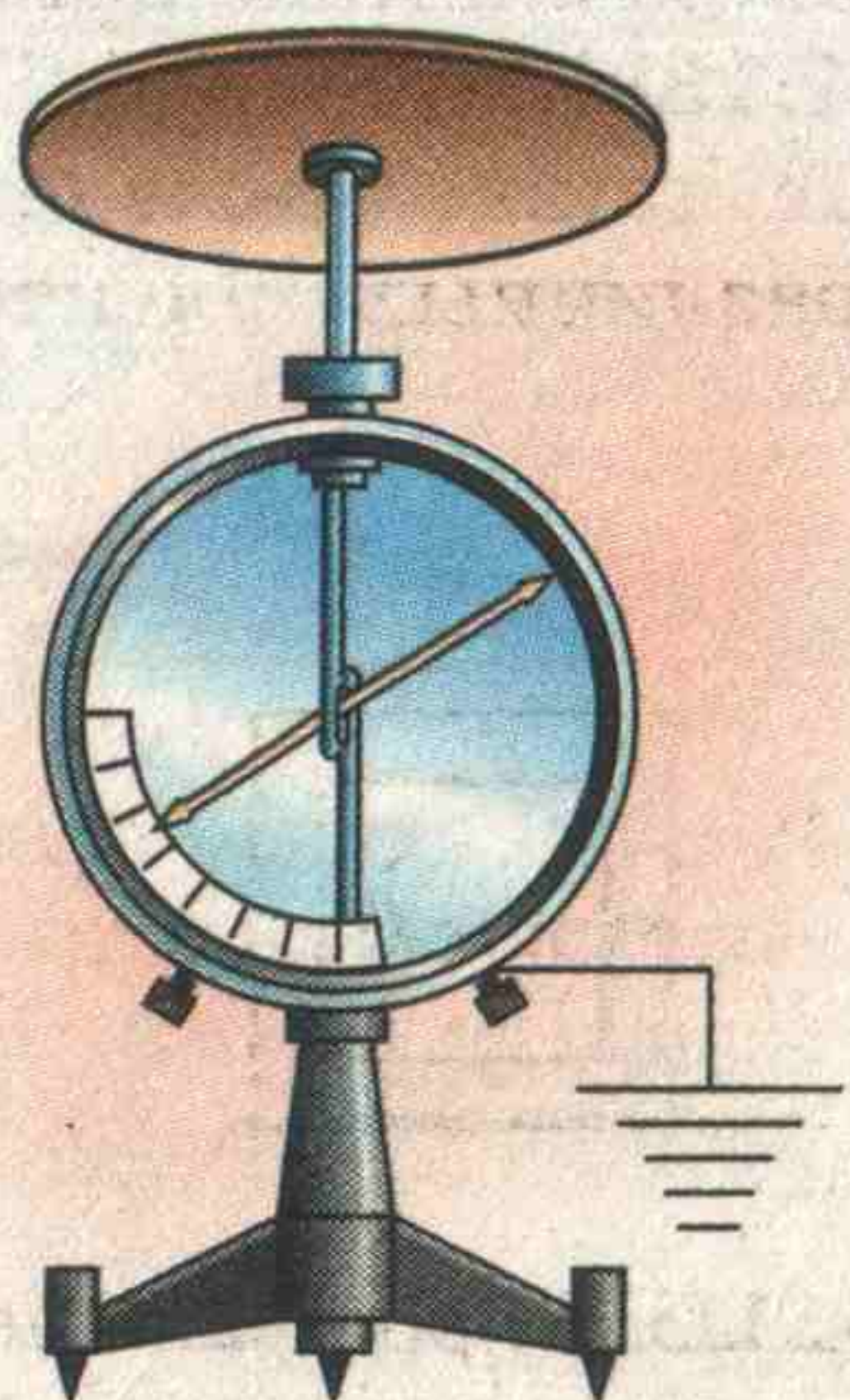


Рис. 1.14. Заряженная пластина на стержне электрометра

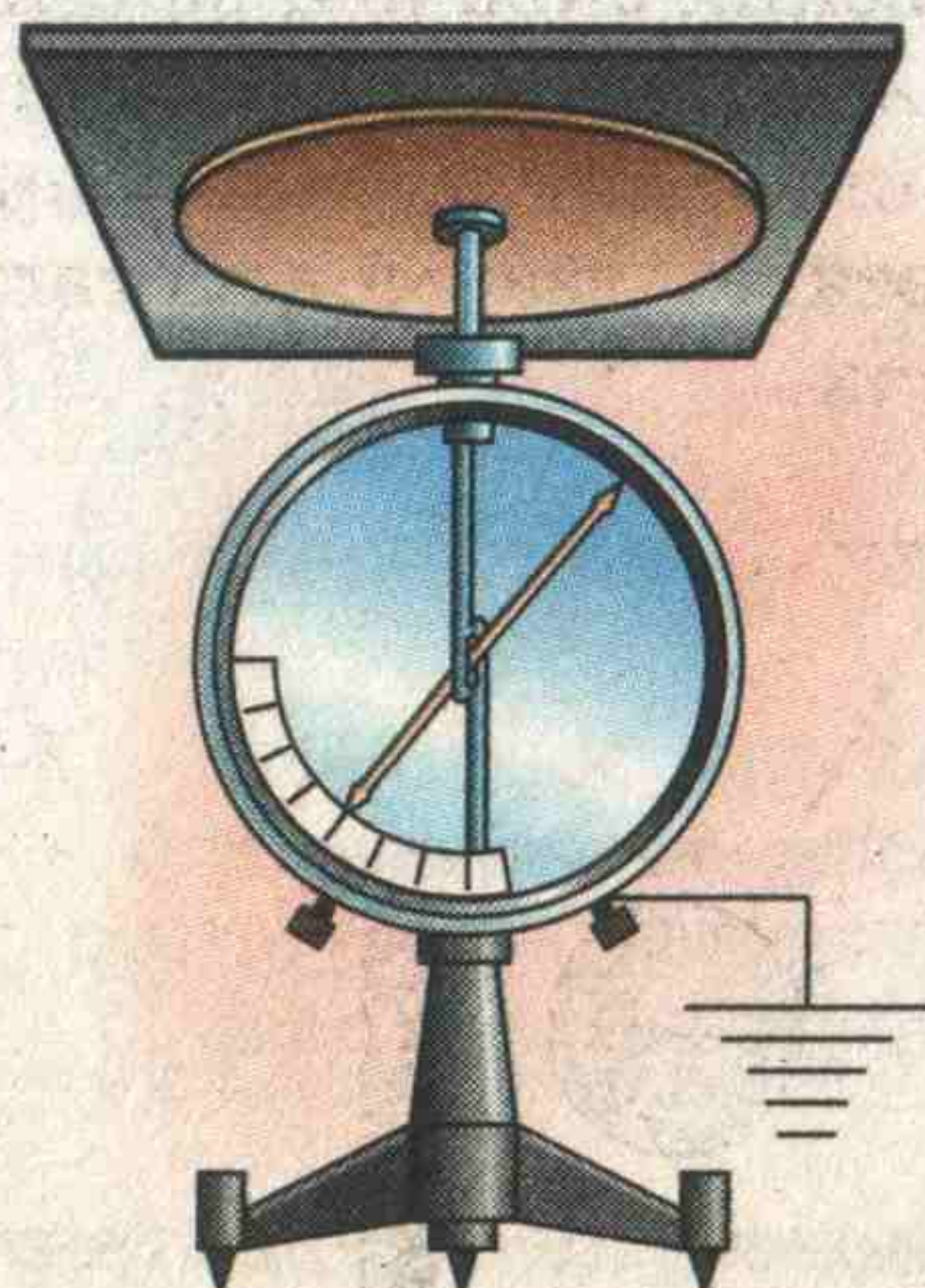


Рис. 1.15. Показания стрелки электрометра уменьшаются, когда к пластине подносят диэлектрик

Как же объяснить это явление?

В диэлектриках, в отличие от проводников, отсутствуют свободные носители электрического заряда. Образуя молекулы, атомы диэлектрика обмениваются электронами, но не теряют связи с ними. Если такой диэлектрик поместить в электрическом поле, то изменения происходят в самих молекулах. Эти изменения имеют электрическую природу, но для разных диэлектриков они проявляются по-разному. Это зависит от строения молекул.

У многих диэлектриков молекулы представляют собой диполи, в которых разноименно заряженные частицы, входящие в состав молекулы, смещены от центра в противоположные стороны (рис. 1.16).

При отсутствии электрического поля молекулы расположены неупорядоченно и совершают только колебательные тепловые движения (рис. 1.17). При внесении диэлектрика в электрическое поле происходит ориентация молекул вдоль линий напряженности внешнего электрического поля (рис. 1.18). Таким образом в диэлектрике появляется некоторая упорядоченность в расположении молекул так, что в одном направлении преобладают отрицательно

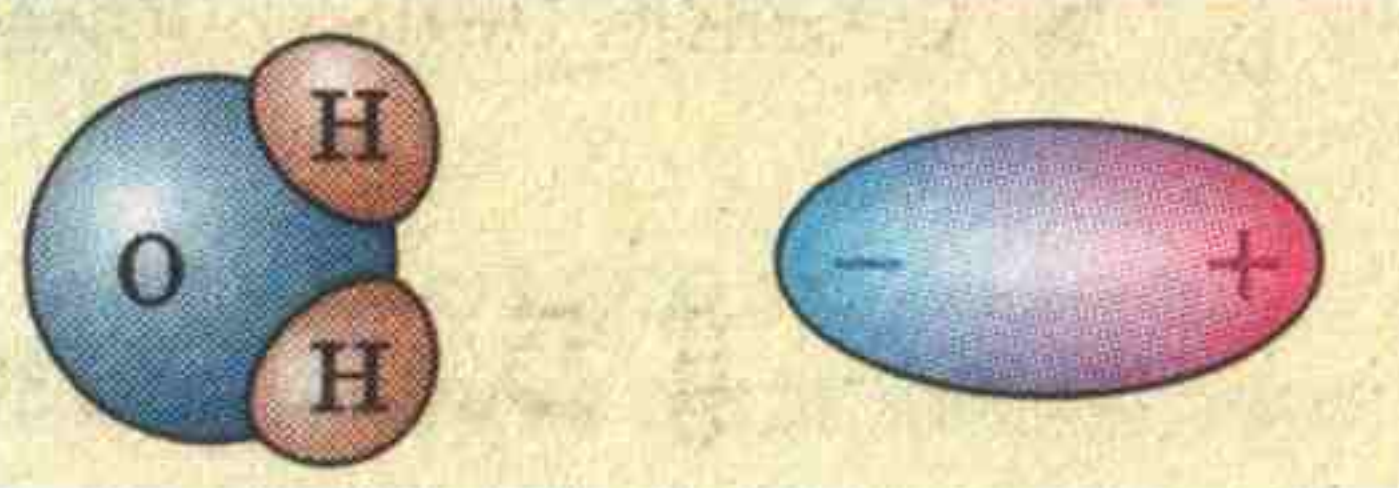


Рис. 1.16. Полярные молекулы – диполи



заряженные частицы, а в другом – положительно. Такое состояние диэлектрика называют *поляризацией*.

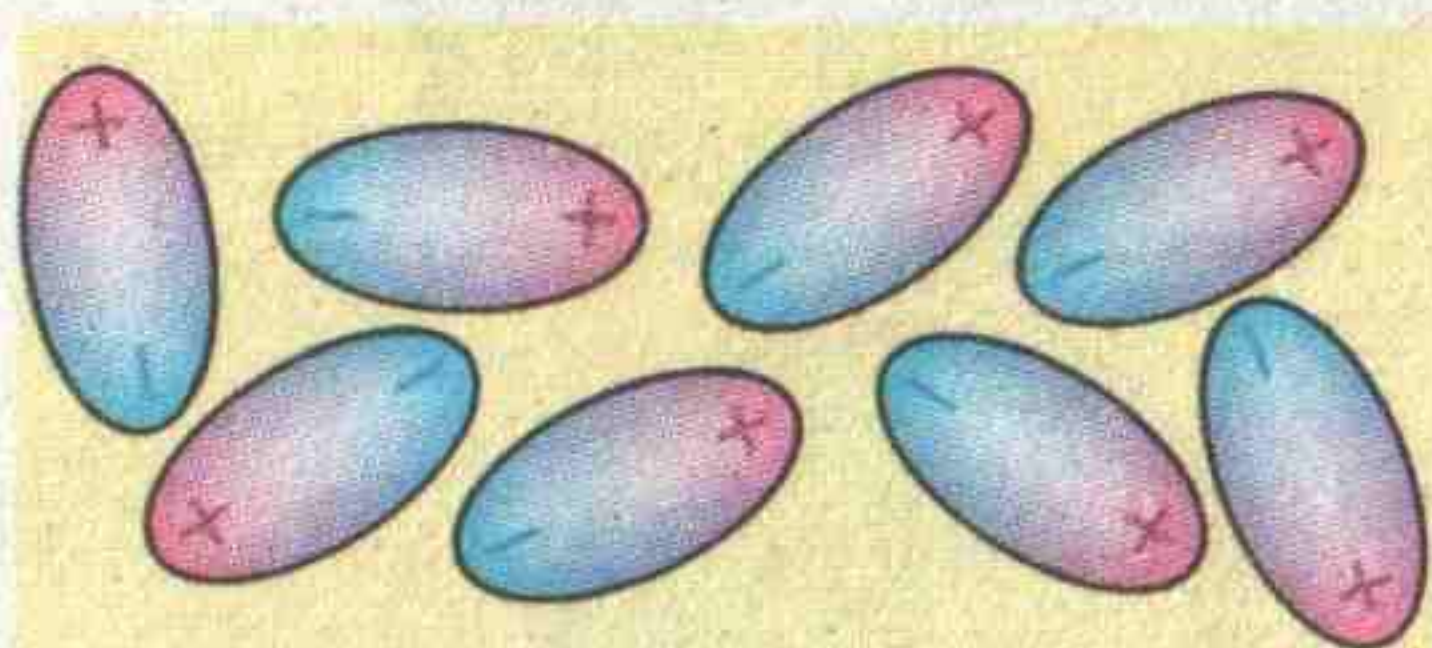


Рис. 1.17. Ориентация полярных молекул в диэлектрике при отсутствии электрического поля

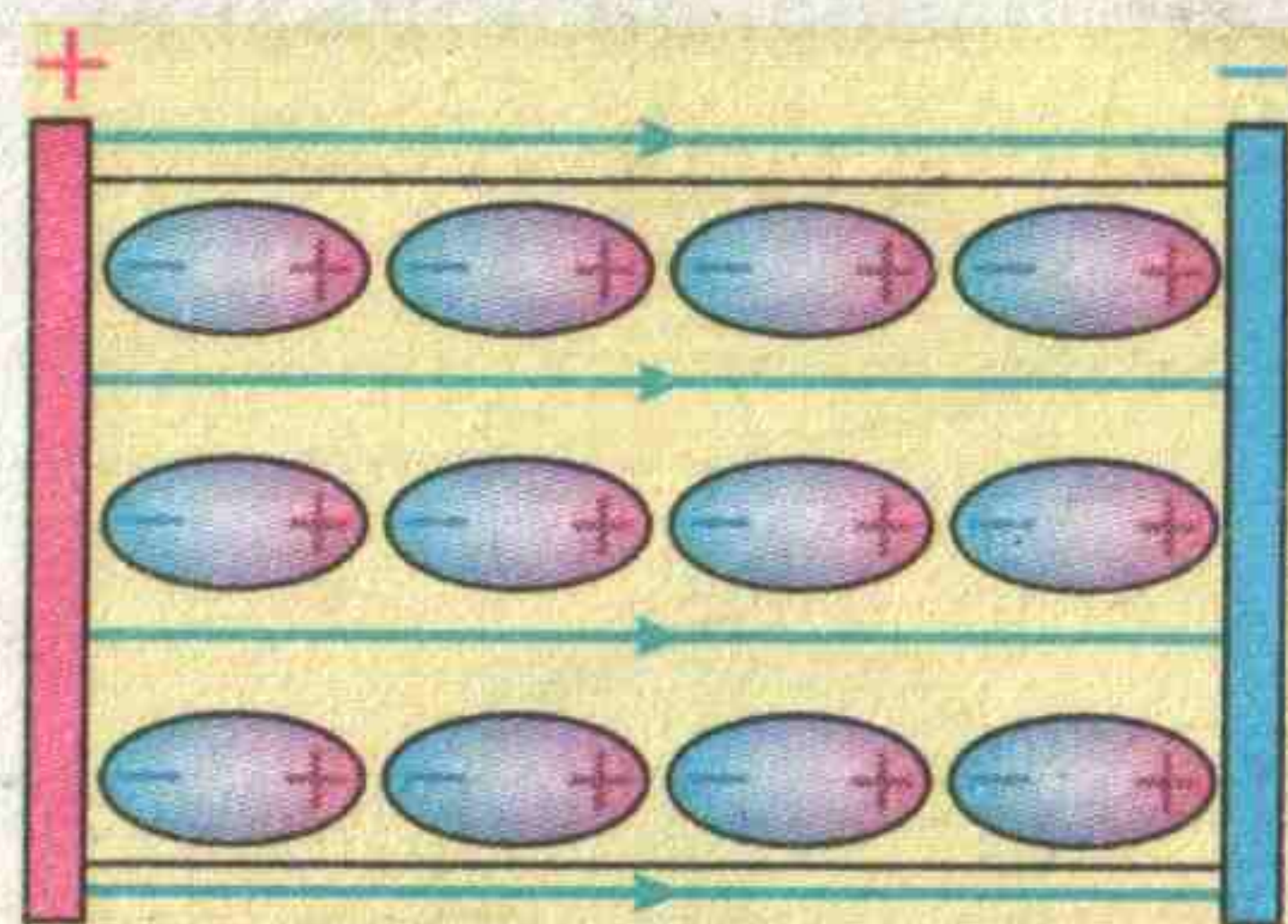


Рис. 1.18. Ориентация полярных молекул диэлектрика в электрическом поле

Если молекулы диэлектрика неполярны, то под действием электрического поля электроны смещаются и их орбиты изменяются так, что образуют диполи, изначально ориентированные вдоль электрического поля. Естественно, что вследствие этого диэлектрик поляризуется.

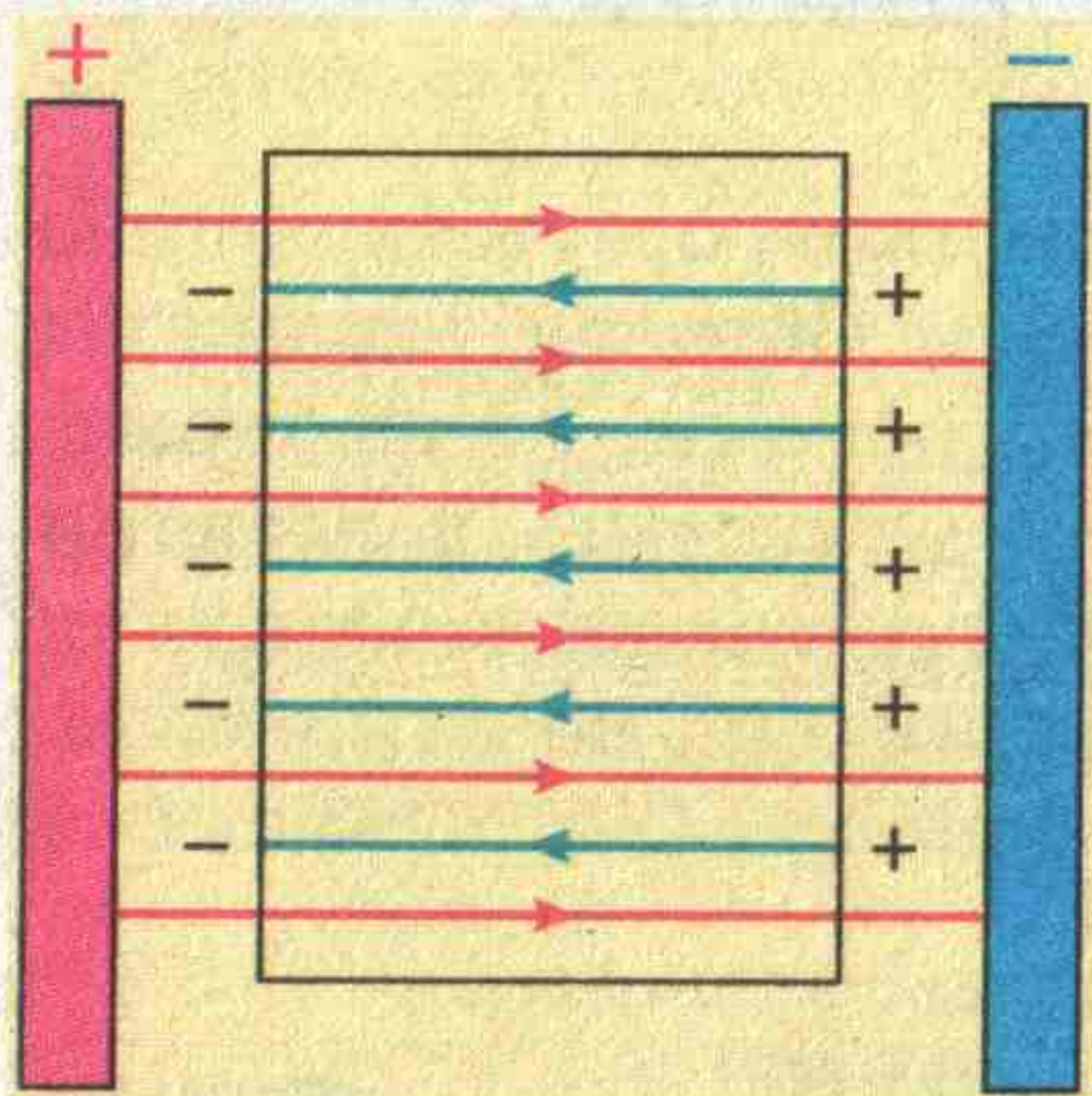


Рис. 1.19. Напряженность электрического поля внутри диэлектрика меньше напряженности внешнего электрического поля

Поляризация диэлектриков приводит к тому, что в них появляется дополнительное электрическое поле, направление линий напряженности  $\vec{E}'$  которого будет противоположным к направлению линий напряженности внешнего поля  $\vec{E}_0$  (рис. 1.19).

Соответственно напряженность электрического поля в диэлектрике будет меньше, чем вне его.

$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \vec{E}', \quad \vec{E} < \vec{E}_0.$$

Таким образом диэлектрик ослабляет электрическое поле. Поскольку в различных диэлектриках это ослабление различно, то для характеристики их электрических свойств вводят физическую величину, которую называют *относительной диэлектрической проницаемостью* или просто *диэлектрической проницаемостью*  $\epsilon$ . Она показывает, во сколько раз напряженность электрического поля в диэлектрике меньше, чем вне его.

$$\epsilon = \frac{E_0}{E},$$



где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $E_0$  – модуль вектора напряженности электрического поля вне диэлектрика;  $E$  – модуль вектора напряженности электрического поля в диэлектрике.

Влияние вещества на электрическое поле приводит к изменению силы, действующей на заряженное тело, находящееся в этом веществе. По определению

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon}, \quad QE = \frac{QE_0}{\varepsilon}.$$

Из последнего следует, что сила, действующая на заряженное тело в веществе, меньше, чем в вакууме:

$$F = \frac{QE_0}{\varepsilon} < F_0.$$

Значения диэлектрической проницаемости для различных веществ различны. Ее значения для некоторых веществ приведены в таблице.

Таблица

**Диэлектрическая проницаемость для различных веществ (при нормальных условиях)**

17

Вещество	Диэлектрическая проницаемость
Воздух	1,000594
Азот	1,00058
Керосин	2,1
Кварц плавленый	3,75
Керамика ( $\text{CaTiO}_3$ )	150...165
Стекло	8...11
Эбонит	3
Картон	4
Парафин	2
Слюда	6
Воск пчелиный	3
Сегнетовая соль	10 000
Трансформаторное масло	2,2...2,5
Вода	81

**Значения диэлектрической проницаемости существенно зависят от химического состава диэлектрика.**



Даже незначительные изменения химического состава приводят к существенным изменениям диэлектрической проницаемости. Благодаря этому созданы многочисленные



диэлектрики с уникальными электрическими свойствами, применяемые в современной электронной и электротехнической промышленности.

Среди них особое место занимают электреты – электрические аналоги магнитов.

**Диэлектрики, сохраняющие состояние поляризации при отсутствии постороннего поля, называют электретами.**

**Электреты – электрические аналоги магнитов.**

Если большинство диэлектриков теряют поляризацию при отсутствии внешнего электрического поля, то электреты могут длительное время сохранять это состояние. Они стали базой для создания высокоэффективных электретных микрофонов, имеющих большую чувствительность, небольшие габариты и массу. К их преимуществам необходимо отнести и то, что они не создают магнитного поля, что важно при плотной упаковке элементов современной электронной аппаратуры.

В современной технике широко используются жидкие кристаллы.

Имея полярную структуру молекул, они существенно изменяют свои физические свойства под действием электрического поля.

**Жидкие кристаллы изменяют свои свойства под действием электрического поля.**

Так, если жидкость относится к категории жидких кристаллов и имеет полярные молекулы, в обычном состоянии совершенно прозрачна, то в электрическом поле ее прозрачность существенно уменьшается. С этим явлением мы встречаемся всегда, когда наблюдаем за дисплеем микрокалькулятора, мобильного телефона или ноутбука, панель которого состоит

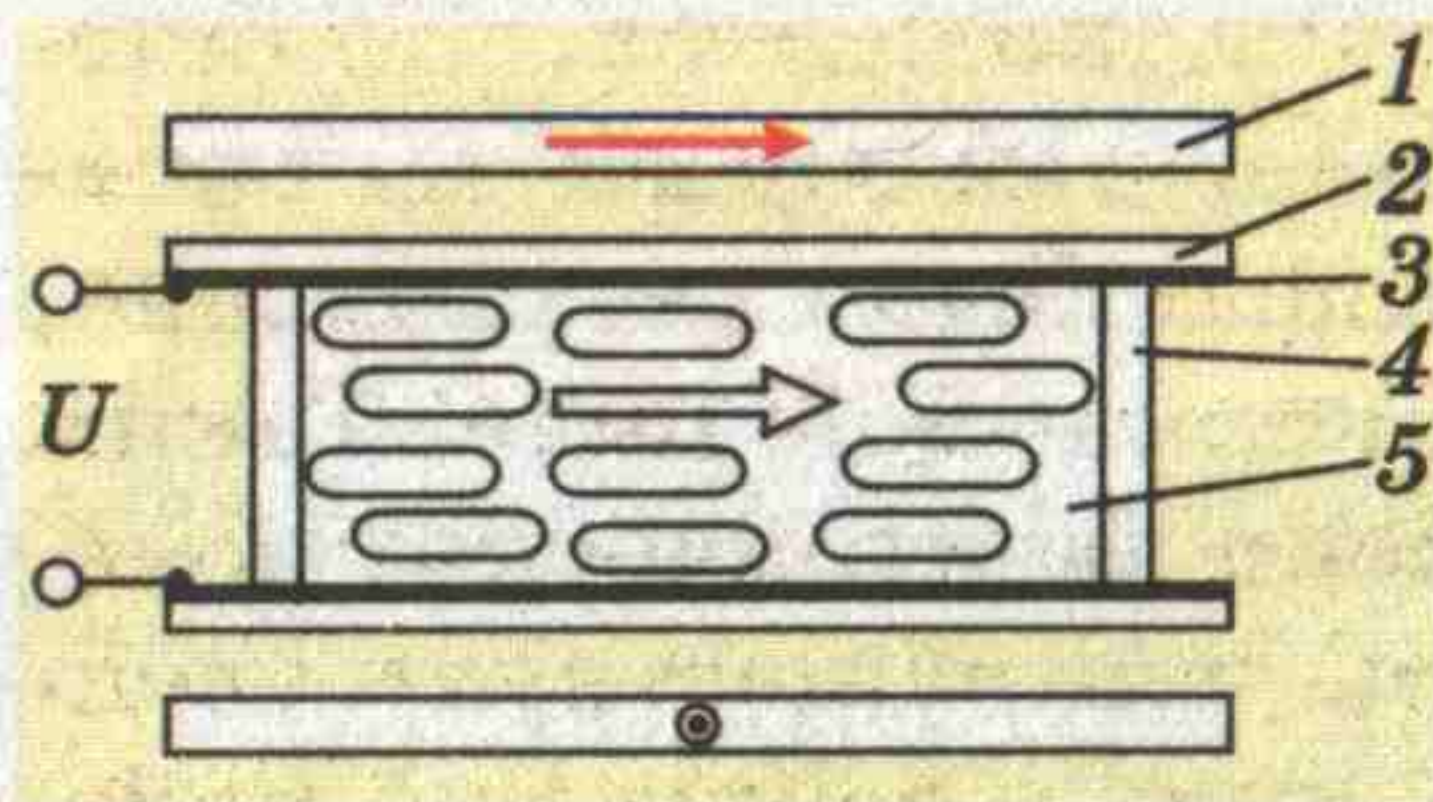


Рис. 1.20. Устройство жидкокристаллической электрооптической ячейки

из отдельных ячеек, наполненных жидкокристаллическим веществом. Устройство такой ячейки показано на рисунке 1.20.

Жидкий кристалл 5 в ячейке расположен между двумя плоскопараллельными прозрачными пластинами 2, на внутренних поверхностях которых нанесены прозрачные электроды 3.



Расстояние между электродами составляет несколько десятков микрометров и устанавливается диэлектрическими прокладками между пластинами 4. На внешние поверхности пластин наносятся поляроидные пленки 1 (о них ты подробнее узнаешь позже, при изучении оптики). Если ячейка должна работать в отраженном свете (как в микрокалькуляторе), то на нижнюю поверхность пластин наносят зеркальное покрытие с хорошими отражательными свойствами. При отсутствии электрического поля молекулы расположены параллельно пластинам и жидкость непрозрачна для света. Вся ячейка будет темной. Приложение напряжения к пластинам создаст электрическое поле, под действием которого ориентация молекул изменится. Ячейка станет прозрачной. Управляя системой таких электрооптических жидкокристаллических ячеек, можно создавать изображение цифр, геометрических фигур или более сложных объектов.

1. Каковы особенности внутреннего строения диэлектрика?
2. Какие физические процессы происходят в диэлектрике при внесении его в электрическое поле?
3. Почему в обычных условиях диэлектрик не имеет электрического поля?
4. Почему в электрическом поле диэлектрик поляризуется?
5. Как изменяется напряженность электрического поля в диэлектрике при его поляризации?
6. Что такое диэлектрическая проницаемость?
7. Почему диэлектрическая проницаемость у различных веществ разная?
8. Каковы свойства электретов?
9. Почему жидкие кристаллы изменяют свои свойства в электрическом поле?

## § 6. Закон Кулона



Экспериментальными исследованиями установлено, что электрически заряженные тела взаимодействуют между собой – притягиваются или отталкиваются. Количественно это отображено в законе Кулона, с которым ты ознакомился ранее. В предыдущих параграфах было установлено, что каждое заряженное тело имеет электрическое поле. Таким образом, если в пространстве обнаружено электрическое поле, то можно с уверенностью утверждать, что существует электрически заряженное тело, которому принадлежит это поле. Если рядом находятся два небольших заряженных тела с зарядами  $Q_1$  и  $Q_2$ , то первое из них будет находиться в поле второго и на него будет действовать сила



$$\vec{F}_1 = Q_1 \vec{E}_2,$$

где  $Q_1$  — заряд первого тела;  $\vec{E}_2$  — напряженность поля второго тела в этой точке. На второе тело, соответственно, будет действовать сила

$$\vec{F}_2 = Q_2 \vec{E}_1,$$

где  $Q_2$  — заряд второго тела;  $\vec{E}_1$  — напряженность поля первого тела.

Если эти тела настолько малы, что их можно считать точечными, то  $E_1 = k \frac{Q_1}{r^2}$ , где  $k$  — коэффициент пропорциональности, а  $r$  — расстояние от тела до точки наблюдения.

Аналогично для поля второго заряженного тела

$$E_2 = k \frac{Q_2}{r^2}.$$

$$\text{Здесь } k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}.$$

20

Известный французский физик Ш.О. Кулон в 1785 г. в экспериментальных исследованиях открыл фундаментальный закон электродинамики:

*сила, действующая на неподвижное точечное тело с электрическим зарядом  $Q_1$ , находящееся в поле второго точечного неподвижного тела с зарядом  $Q_2$ , пропорциональна произведению зарядов этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.*

$$F = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}.$$

В формуле для расчета силы взаимодействия записаны значения зарядов обоих тел. Поэтому можно сделать вывод, что силы, действующие на каждое тело, по модулю равны, но по направлению они противоположны.

Если заряды одноименны, то тела отталкиваются (рис. 1.21). Если заряды имеют противоположные знаки, то тела притягиваются (рис. 1.22).

Легко заметить, что при электрическом взаимодействии двух тел справедлив третий закон Ньютона:

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

Если заряженные тела находятся в диэлектрике, то сила взаимодействия будет зависеть от диэлектрической проницаемости этого диэлектрика:

$$F = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{\epsilon r^2},$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды.



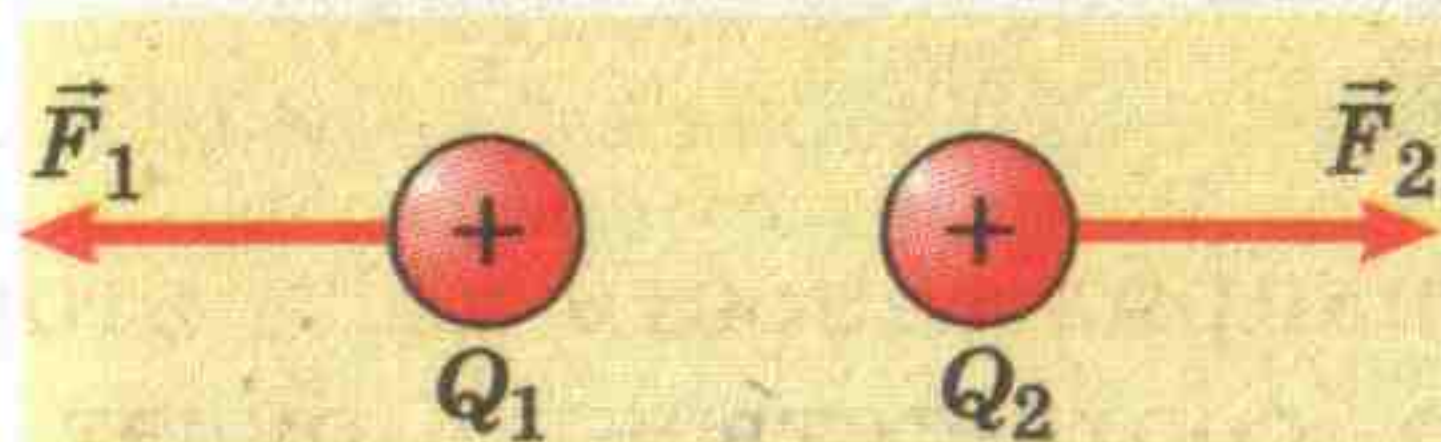


Рис. 1.21. Силы, действующие на одноименно заряженные тела, имеют противоположные направления

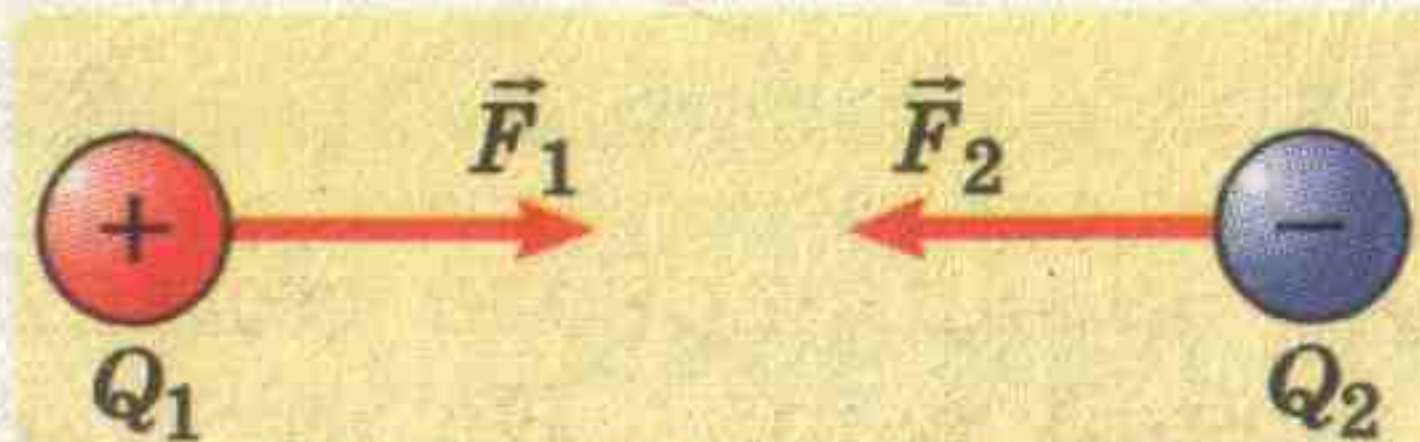


Рис. 1.22. Силы, действующие на разноименно заряженные тела, имеют противоположные направления

Закон Кулона является фундаментальным законом природы. На нем построена вся электродинамика, не замечено ни единого случая нарушения этого закона. Но существует ограничение, касающееся расстояния между заряженными телами. Принято считать, что закон Кулона действует на расстояниях, больших  $10^{-16}$  м и меньших нескольких километров.

**Задача.** Два одинаковых маленьких шарика подвешены на тонких нитях длиной 1 м в одной точке. Шарика имеют одинаковые заряды  $3 \cdot 10^{-7}$  Кл и расходятся на расстояние 10 см. Каково натяжение нити?

Д а н о :

$$\begin{aligned} l &= 1 \text{ м}, \\ Q_1 &= Q_2 = Q = \\ &= 3 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}, \\ r &= 10 \text{ см}. \\ F_{\text{нат}} &= ? \end{aligned}$$

Р е ш е н и е

На каждый из шариков действуют три силы: сила тяжести  $m\vec{g}$ , сила натяжения нити  $\vec{F}_{\text{упр}}$  и электрическая сила  $\vec{F}$  (рис. 1.23).

Исходя из условия равновесия шариков, можно для каждого записать уравнение:

$$m\vec{g} + \vec{F}_{\text{упр}} + \vec{F} = 0.$$

Спроектировав векторы на ось  $OX$ , получим

$$-F_{\text{упр}} \sin \alpha + F = 0.$$

$$\text{Отсюда } F_{\text{упр}} = \frac{F}{\sin \alpha}.$$

$$\text{Поскольку } \sin \alpha = \frac{r}{2l}, \text{ а } F = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2},$$

$$\text{то } F_{\text{упр}} = k \frac{Q^2 2l}{r^3}.$$

Подставив значения величин, получим

$$F_{\text{упр}} = \frac{9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot 9 \cdot 10^{-14} \text{ Кл}^2 \cdot 2 \cdot 1 \text{ м}}{10^{-3} \text{ м}^3} = 1,6 \text{ Н}.$$

**Ответ:** натяжение нити 1,6 Н.

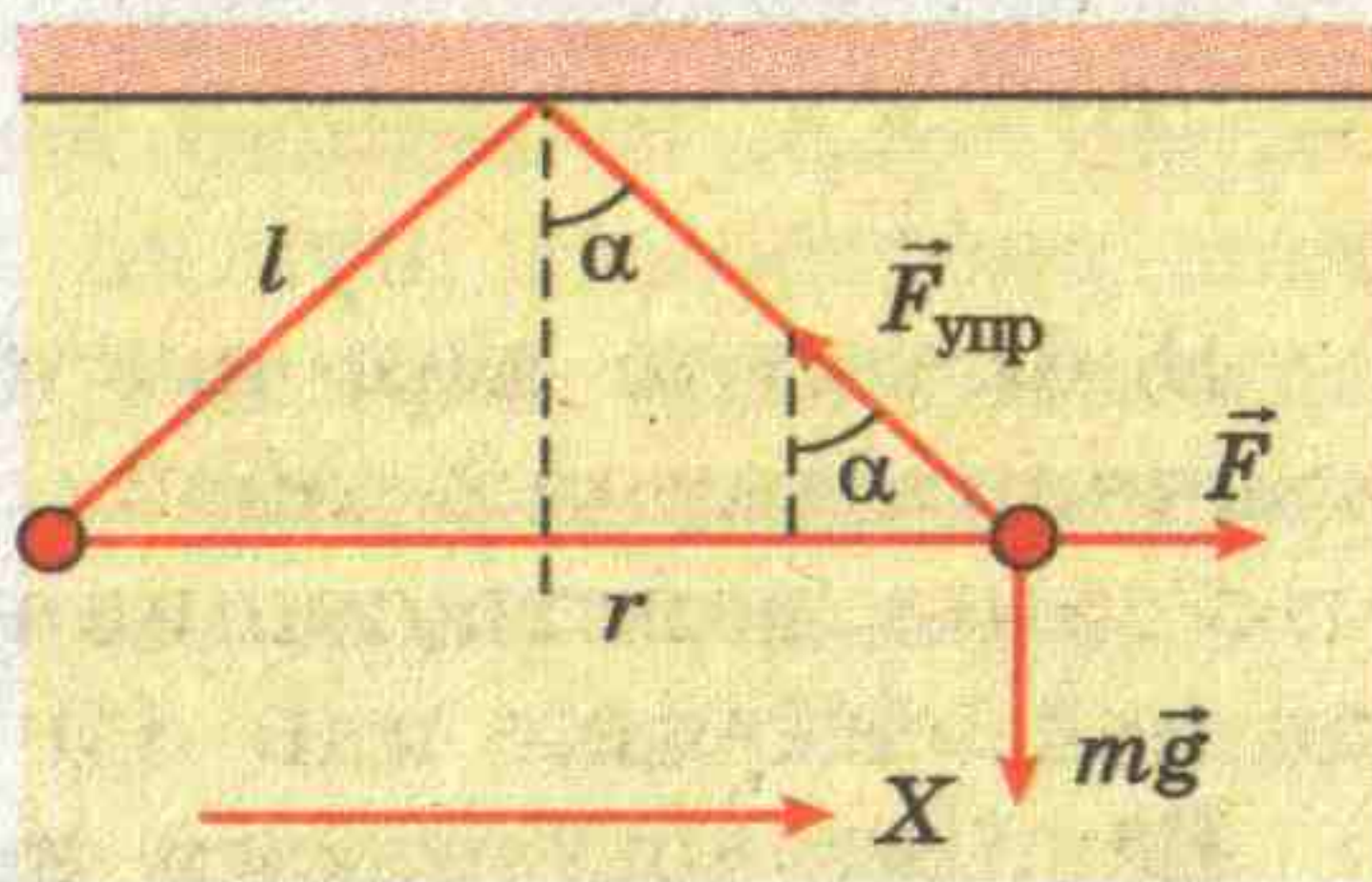


Рис. 1.23





1. Как происходит взаимодействие между заряженными телами?
2. Почему можно говорить о взаимодействии между заряженными телами?
3. Какие существуют ограничения в формулировке закона Кулона относительно взаимодействующих тел?
4. Как формулируется закон Кулона?
5. Как в законе Кулона учитывается влияние окружающей среды?
6. Какие ограничения существуют относительно сферы действия закона Кулона?

## Упражнение 2

22

1. Два маленьких металлических шарика, каждый из которых имеет заряд  $10^{-7}$  Кл, находятся на расстоянии 0,1 м друг от друга. Найти силу взаимодействия между ними.

2. С какой силой взаимодействуют два маленьких шарика с зарядами  $0,66 \cdot 10^{-7}$  Кл и  $1,1 \cdot 10^{-7}$  Кл на расстоянии 3,3 см?

3. Как изменится сила взаимодействия между двумя точечными заряженными телами, если значения заряда каждого тела увеличатся в 4 раза, а расстояния уменьшатся в 2 раза?

4. Найти силу притяжения между ядром атома Гидрогена и электроном. Радиус орбиты электрона  $0,5 \cdot 10^{-8}$  см. Заряд ядра этого атома равен по значению, но противоположен по знаку к заряду электрона.

5. Два точечных заряженных тела имеют заряды  $+3 \cdot 10^{-7}$  Кл и  $+2 \cdot 10^{-7}$  Кл и находятся на расстоянии 10 см друг от друга. Где нужно расположить третье тело, чтобы оно было в равновесии?

6. Маленький шарик массой 0,3 г, который имеет заряд  $3 \cdot 10^{-7}$  Кл, подвешен на тонкой непроводящей нити. На каком расстоянии нужно поместить под ним второй шарик с одноименным зарядом  $5 \cdot 10^{-8}$  Кл, чтобы натяжение нити уменьшилось в 2 раза?

7. На каком расстоянии друг от друга точечные тела с зарядами  $1 \cdot 10^{-7}$  нКл и  $3 \cdot 10^{-7}$  нКл взаимодействуют с силой 9 мН?

8\*. Два маленьких шарика одинаковой массы и радиуса подвешены в воздухе на нитках одинаковой длины в одной точке. Когда шарикам сообщили одноименные заряды по  $40 \cdot 10^{-8}$  Кл, они отклонились на угол  $60^\circ$ . Найти массу каждого шарика, если расстояние от точки подвеса до центров шариков составляет 20 см.

9\*. Сила тяжести между двумя маленькими заряженными шариками массами по 1 г уравновешена силой электрического взаимодействия. Считая заряды шариков одинаковыми, найти их значения.

10. Во сколько раз изменится сила взаимодействия двух заряженных тел, если их заряды удвоятся, а расстояние между ними уменьшится в 3 раза и при этом их переместить в керосин?



## § 7. Работа в электрическом поле

Рассмотрим точечное тело, имеющее положительный заряд  $Q_0$  и находящееся в однородном электрическом поле между двумя параллельными пластинами. Пластины заряжены разноименно и имеют размеры, намного больше расстояния между ними (рис. 1.24).

На тело, находящееся в точке  $A$ , действует электрическая сила

$$\vec{F}_{\text{эл}} = Q\vec{E},$$

имеющая постоянное значение и направление. Тело находится на расстоянии  $l_1$  от левой (по рисунку) пластины.

В некоторый момент тело начинает двигаться из точки  $A$  в точку  $B$  под действием электрической силы  $\vec{F}_{\text{эл}}$ . Эта сила будет выполнять работу

$$A = F_{\text{эл}} s \cos \alpha.$$

Точка  $B$  расположена на расстоянии  $l_2$  от левой пластины.

Модуль перемещения в этом случае будет  $s = AB$ .

Построим проекцию этого перемещения на направление действия силы. На рисунке 1.25 его показано отрезком  $AC$ .

Согласно правилам построения проекций в нашем случае можно сделать вывод, что найденная точка  $C$ , как и точка  $B$ , находится на расстоянии  $l_2$  от левой пластины.

Учитывая последнее, можно записать, что  $s \cos \alpha = l_1 - l_2$ .

Таким образом,  $A = F_{\text{эл}} (l_1 - l_2) = Q_0 E (l_1 - l_2)$ .

Такая же работа будет выполнена при перемещении заряженного тела из точки  $A$  в точку  $B$  или  $E$ . Ведь для этих перемещений

$$s \cos \alpha = (l_1 - l_2).$$

Аналогичный результат получится при перемещении тела в точку  $C$  из любых иных точек, находящихся на расстоянии  $l_1$  от левой пластины.

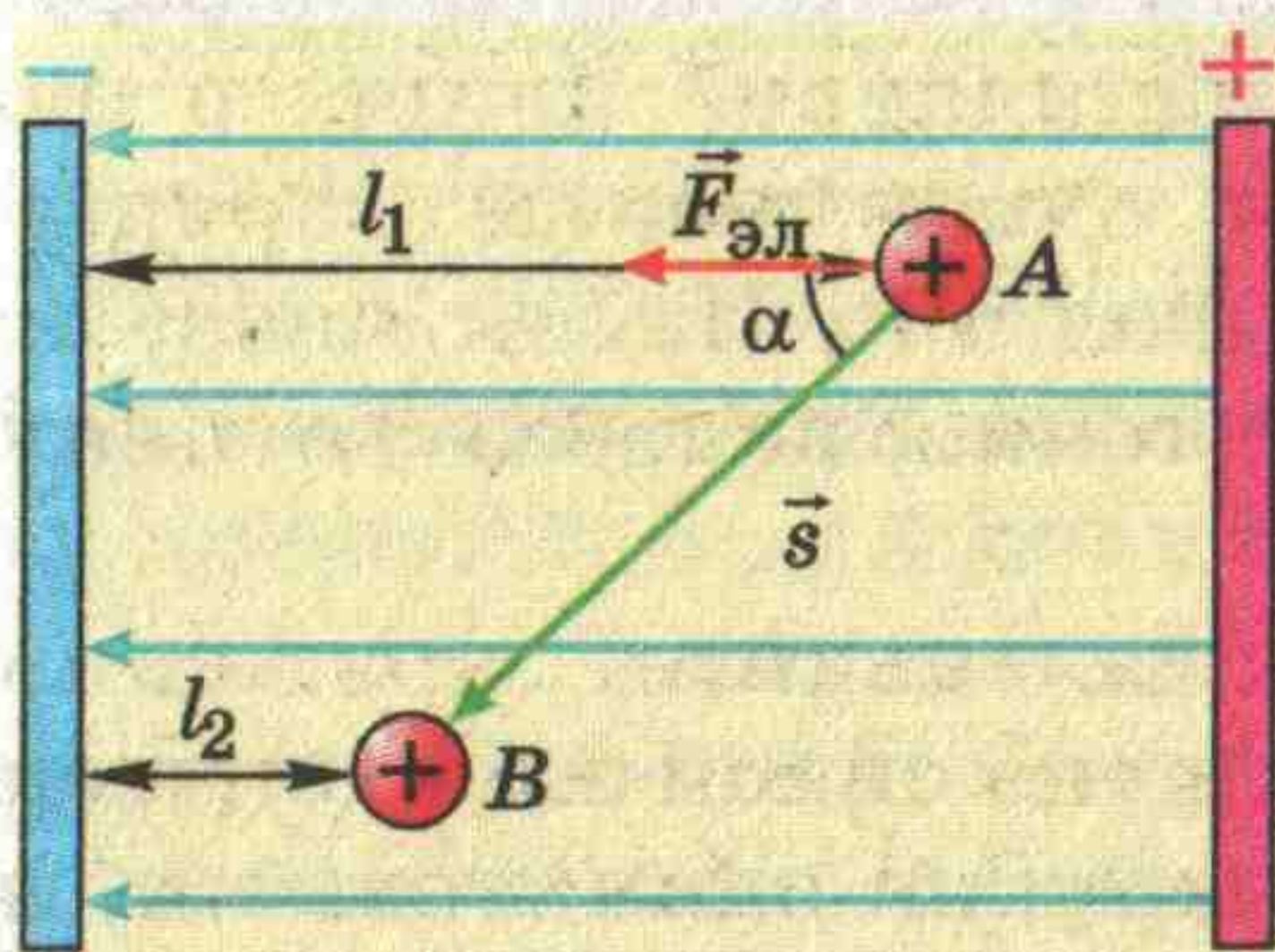


Рис. 1.24. Перемещение заряженного тела в электрическом поле

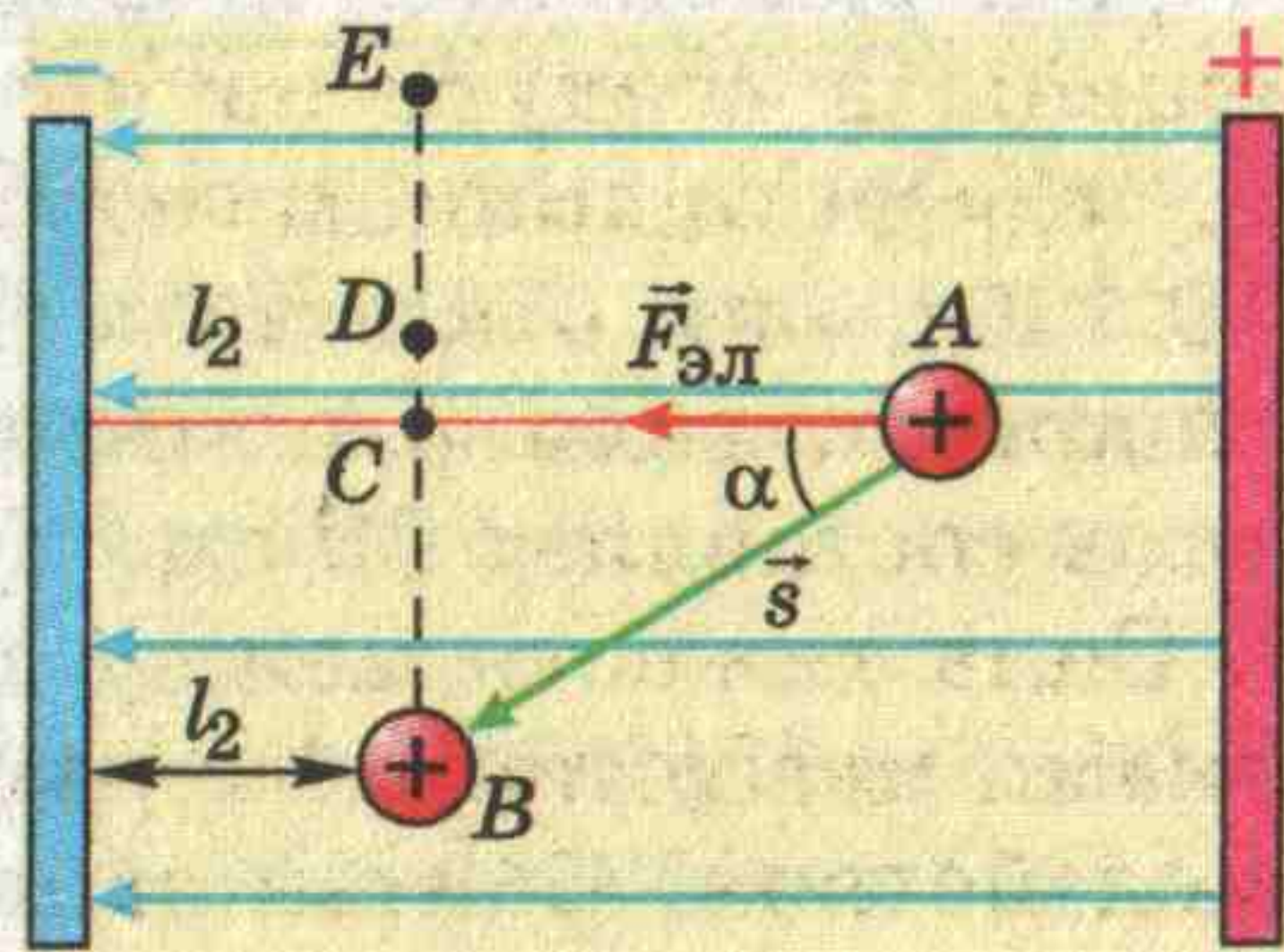


Рис. 1.25. К расчету работы электрического поля



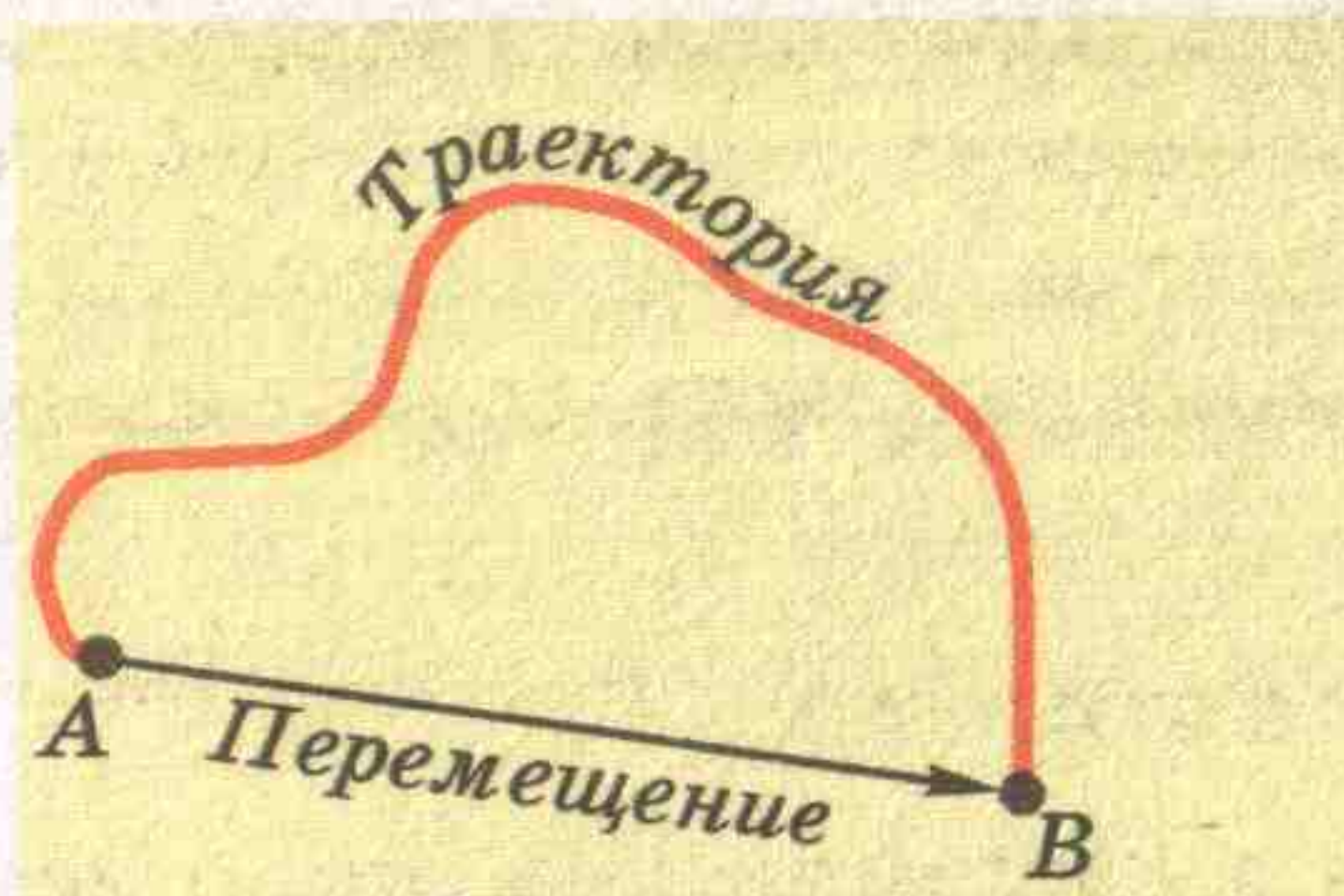


Рис. 1.26. Работа не зависит от формы траектории движения

Работа по перемещению заряженного тела в однородном электрическом поле не зависит от пути перемещения, а зависит от положения начальной и конечной точек.

Подобный вывод касается и других случаев, когда тело движется траекторией произвольной формы. Если тела будут описывать различные кривые, которые начинаются в точке A и оканчиваются в точке B (рис. 1.26), то модуль перемещения

будет одним и тем же.

Таким образом, *работа по перемещению заряженного тела в электрическом поле не зависит от формы траектории движения.*

24

**Работа по перемещению заряженного тела в электрическом поле не зависит от формы траектории движения тела, а определяется положением начальной и конечной точек движения.**

Если в процессе движения заряженного тела в электрическом поле оно описывает замкнутую траекторию, т. е. возвращается в начальную точку, то работа электрического поля равна нулю. Ведь когда  $l_1 = l_2$ , то

$$A = Q_0 E (l_1 - l_1) = 0.$$

**При перемещении заряженного тела в однородном электрическом поле по замкнутой траектории работа равна нулю.**

Изложенные выше выводы аналогичны выводам относительно работы силы тяжести, которая рассматривалась в механике. В частности,

$$A = mg(h_1 - h_2),$$

а при  $h_1 = h_2$

$$A = mg(h_1 - h_1) = 0.$$

Физические поля, в которых работа не зависит от формы траектории, а определяется только начальным и конечным положением тела, называются **потенциальными**.

Таким образом, заряженное тело, находящееся в электрическом поле, имеет потенциальную энергию, как и тело определенной массы в поле тяжести.

**Заряженное тело в электрическом поле имеет потенциальную энергию.**



**Задача.** Расстояние между параллельными пластинами 5 см, напряженность электрического поля между ними  $10^2$  Н/Кл. Электрон летит вдоль силовой линии от одной пластины к другой без начальной скорости. Какую скорость будет иметь электрон в конце пути?

Д а н о:

$$l = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м},$$

$$E = 10^2 \text{ Н/Кл},$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг},$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}.$$

$v = ?$

Р е ш е н и е

На электрон в электрическом поле действует сила, которая выполняет работу и изменяет его кинетическую энергию. Согласно закону сохранения энергии это изменение равно выполненной работе:

$$\Delta W = A. \quad (1)$$

Поскольку начальная скорость электрона равна нулю, то в конце движения его кинетическая энергия будет равна

$$\Delta W = \frac{m_e v^2}{2}. \quad (2)$$

Работа электрического поля будет равна

$$A = eEl. \quad (3)$$

Учтя (1), (2) и (3), получим

$$\frac{m_e v^2}{2} = eEl.$$

Отсюда

$$v = \sqrt{\frac{2eEl}{m_e}}.$$

Подставив значения физических величин и произведя расчеты, получим

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 10^2 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}} \approx 1,33 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

**Ответ:** скорость движения электрона в конце движения в электрическом поле  $1,33 \cdot 10^7$  м/с.

1. При каких условиях в электрическом поле выполняется работа?
2. От чего зависит работа в однородном электрическом поле?
3. Как доказать, что работа в электрическом поле не зависит от формы траектории?
4. Почему работа при движении заряженного тела по замкнутой траектории в электрическом поле равна нулю?
5. Почему электростатическое поле является потенциальным?





## Упражнение 3

✓ 1. Какую работу выполняет однородное электростатическое поле напряженностью  $50 \text{ Н/Кл}$  при перемещении тела с зарядом  $4 \text{ мкКл}$  на  $5 \text{ см}$  в направлении, которое образует угол  $60^\circ$  с направлением линии напряженности поля?

2. Каково значение электрического заряда тела, если при его перемещении на  $10 \text{ см}$  в однородном электрическом поле напряженностью  $2 \cdot 10^3 \text{ Н/Кл}$  вдоль линий напряженности выполнена работа  $4 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$ ?

3\*. Линии напряженности однородного электрического поля напряженностью  $500 \text{ Н/Кл}$  направлены вдоль оси  $Ox$  прямоугольной системы координат. Определить работу по перемещению тела с зарядом  $4 \text{ мкКл}$  из точки с координатами  $(2 \text{ м}; 1 \text{ м})$  в точку с координатами  $(3 \text{ м}; 4 \text{ м})$ .

4\*. Частица массой  $10^{-9} \text{ кг}$  и зарядом  $1 \text{ мкКл}$  влетает в однородное электрическое поле с напряженностью  $10^3 \text{ Н/Кл}$  перпендикулярно к линиям напряженности поля. Определить работу в первую миллисекунду.

26

5\*. Электрон движется в направлении линий напряженности однородного электрического поля с напряженностью  $120 \text{ Н/Кл}$ . Какое расстояние пролетит электрон до полной остановки, если его начальная скорость равна  $100 \text{ км/с}$ ? За какое время электрон пролетит это расстояние?

## § 8. Потенциал электрического поля

Электрические и гравитационные взаимодействия имеют много общего. В частности, работа силы тяжести и работа электрической силы выражаются похожими зависимостями. Для силы тяжести:

$$A = mgh_1 - mgh_2.$$

Для электрической силы:  $A = Q_0El_1 - Q_0El_2 = Q_0E(l_1 - l_2)$ .

Учитывая, что при выполнении работы происходит изменение потенциальной энергии, можно сделать вывод, что заряженное тело в электрическом поле имеет потенциальную энергию

$$W_{\text{п}} = QE l.$$

Потенциальная энергия заряженного тела в электрическом поле зависит как от электрических характеристик тела (его заряда), так и от характеристик поля в данной точке поля — напряженность и координата. Изменение одной из трех характеристик приводит к изменению потенциальной энергии тела в целом.



Исследуем одну из точек электрического поля с целью определения ее энергетических характеристик. Для этого проведем воображаемый эксперимент с точечным заряженным телом.

Представим, что точечное тело имеет заряд  $Q$  и находится в поле напряженностью  $E$  на расстоянии  $l$  от источника поля. Его потенциальная энергия будет равна

$$W_{\text{п}} = QEl.$$

Увеличим заряд в 2 раза. Его потенциальная энергия будет:

$$W_{\text{п1}} = 2QEl.$$

Очевидно, что потенциальная энергия увеличилась тоже в 2 раза. Любые изменения заряда тела будут вызывать соответствующие изменения потенциальной энергии. Но в каждом случае отношение потенциальной энергии заряженного тела к его заряду будет оставаться постоянным.

$$\frac{W_{\text{п}}}{Q} = El.$$

В последней формуле отсутствует заряд тела, поэтому полученное математическое выражение характеризует лишь данную точку поля.

*Физическая величина, которая является энергетической характеристикой электрического поля и равна отношению потенциальной энергии заряженного тела в электрическом поле к его заряду, называется потенциалом данной точки поля.*

**Физическая величина, которая является энергетической характеристикой электрического поля и равна отношению потенциальной энергии заряженного тела в электрическом поле к его заряду, называется потенциалом данной точки поля:**

$$\varphi = \frac{W_{\text{п}}}{Q}.$$

Для измерения потенциала применяют единицу, которая называется вольт (В), названную в честь итальянского ученого Алессандро Вольты.



**Алессандро Вольта (1745–1825) – итальянский физик и физиолог, один из основателей учения об электрическом токе, исследовал вопрос получения электрического тока с помощью гальванических элементов.**





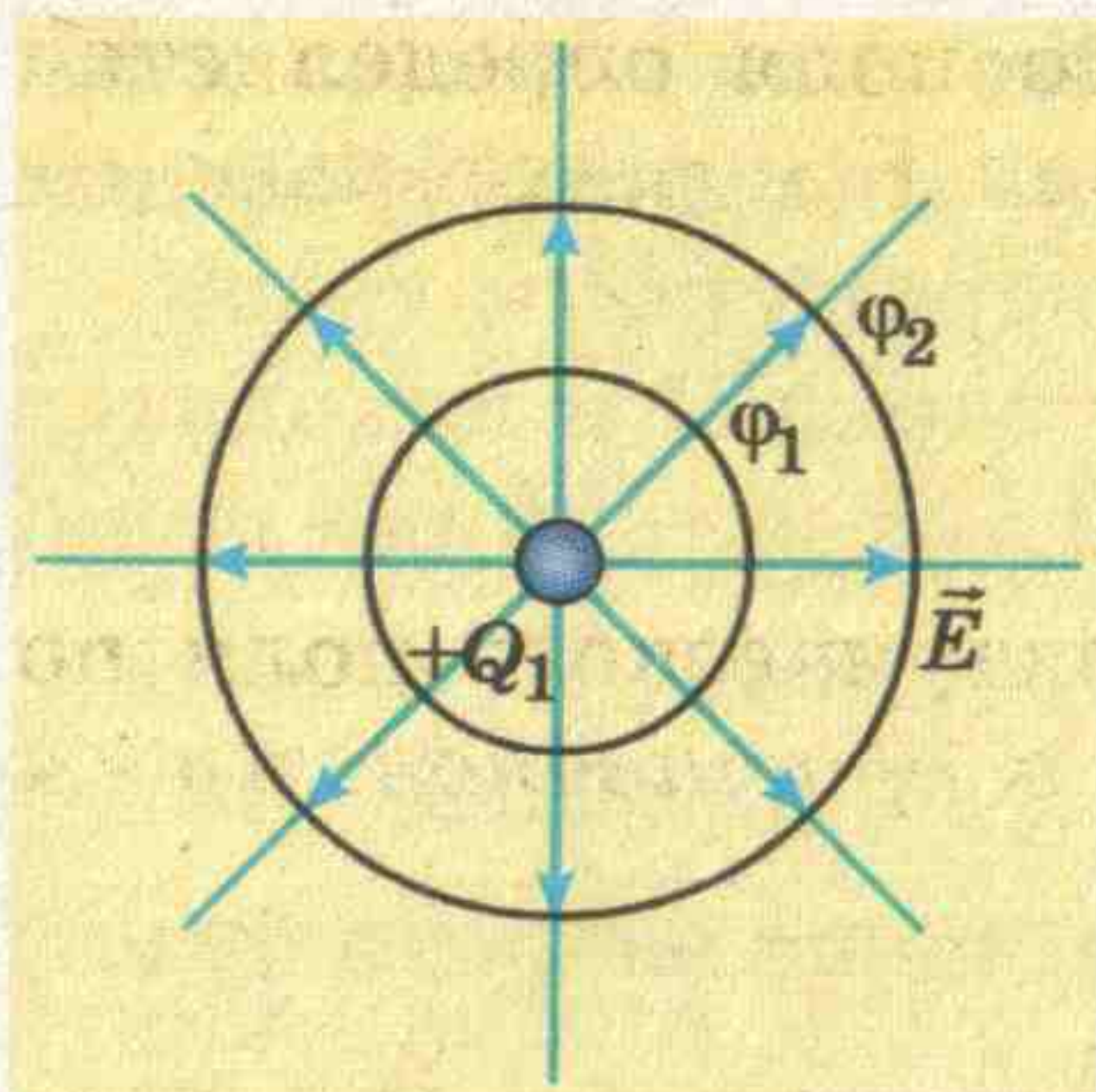


Рис. 1.27. Эквипотенциальные поверхности заряженного шара

Применяются также кратные и долевые единицы потенциала:

- 1 милливольт = 1 мВ =  $10^{-3}$  В;
- 1 микровольт = 1 мкВ =  $10^{-6}$  В;
- 1 киловольт = 1 кВ =  $10^3$  В;
- 1 мегавольт = 1 МВ =  $10^6$  В.

Потенциал является скалярной величиной и не имеет направления. Поэтому можно говорить, что вокруг точечного заряженного тела находится множество точек, имеющих одинаковый потенциал. Все они образуют поверхность, которая называется *эквипотенциальной*.



**Эквипотенциальная поверхность – это геометрическое место точек одинакового потенциала.**

28

Если силовые линии образуют силовую «картину» поля, то эквипотенциальные поверхности позволяют графически показать энергетическую структуру поля.

Для поля точечного заряженного тела эквипотенциальные поверхности представляют собой концентрические сферы (рис. 1.27).

Эквипотенциальные поверхности – это не просто геометрические построения. Они отображают тот факт, что при перемещении заряженного тела по эквипотенциальной поверхности работа равна нулю, поскольку потенциальная энергия тела при этом не изменяется. Типичной эквипотенциальной поверхностью является поверхность заряженного проводника, все точки которой имеют одинаковый потенциал.



1. Почему заряженное тело в электрическом поле имеет потенциал?
2. От чего зависит потенциальная энергия заряженного проводника в электрическом поле?
3. Какое свойство электрического поля характеризует потенциал?
4. Как определяется потенциал поля точечного заряженного тела?
5. Какая поверхность называется эквипотенциальной?
6. Назовите единицы измерения электрического потенциала.

## § 9. Разность потенциалов

Характеризуя потенциальную энергию тела в электрическом поле, потенциал не может иметь единственного значения, поскольку значение потенциальной энергии зависит от выбора нулевого уровня энергии.



Так, потенциал точки электрического поля определяется через напряженность электрического поля  $E$  и расстояние от «нулевой» точки  $l$ :

$$\varphi = \frac{W_n}{Q} = El.$$

Приняв во внимание, что работа электрического поля по определению равна изменению энергии с противоположным знаком, будем иметь:

$$A = QEl_1 - QEl_2.$$

$$A = Q(\varphi_1 - \varphi_2) = Q\Delta\varphi.$$

Отсюда  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{Q}.$

Таким образом, разность потенциалов равна отношению работы по перемещению заряженного тела из одной точки поля в другую к значению заряда.

Физическую величину, которая характеризует энергетическое состояние поля и равна отношению работы по перемещению заряженного тела из одной точки поля в другую, называют разностью потенциалов:  $\Delta\varphi = \frac{A}{Q}.$



29

Для однородного поля существует связь между разностью потенциалов и напряженностью электрического поля:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = E(l_1 - l_2).$$

Отсюда

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l_1 - l_2} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta l}.$$

Последнее выражение используют для введения единицы напряженности электрического поля. В частности, если  $\Delta\varphi = 1$  В и  $\Delta l = 1$  м, получим единицу напряженности электрического поля 1 В/м.

**Задача.** Определить изменение энергии и скорости электрона, который пролетает в ускорителе от точки с потенциалом  $\varphi_1$  до точки с потенциалом  $\varphi_2$ , если  $\Delta\varphi = 2 \cdot 10^6$  В.

Д а н о:

$$\Delta\varphi = 2 \cdot 10^6 \text{ В},$$

$$Q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл},$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}.$$

$$\Delta W_k = ? \quad \Delta v = ?$$

Р е ш е н и е

Кинетическая энергия электрона изменяется вследствие того, что во время движения электрона поле выполняет работу

$$A = \Delta W_k.$$

Учитывая, что  $\Delta W_k = \frac{m_e v^2}{2}$  и  $A = Q\Delta\varphi$ , получим  $\frac{m(\Delta v)^2}{2} = Q\Delta\varphi.$



Таким образом, изменение кинетической энергии  $\Delta W_k = Q\Delta\varphi$ , а


изменение скорости  $\Delta v = \sqrt{\frac{2Q\Delta\varphi}{m}}$ .

Подставив значения физических величин, получим

$$\Delta W_k = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 2 \cdot 10^6 \text{ В} = 3,2 \cdot 10^{-13} \text{ Дж},$$

$$\Delta v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 2 \cdot 10^6 \text{ В}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}} = 0,83 \cdot 10^9 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

**Ответ:** изменение кинетической энергии  $3,2 \cdot 10^{-13}$  Дж, а скорости —  $0,83 \cdot 10^9$  м/с.

- 
1. Почему не всегда удобно пользоваться понятием потенциала для решения практических задач?
  2. Что такое разность потенциалов?
  3. Какие единицы измерения разности потенциалов?

## Упражнение 4

1. Найти разность потенциалов между двумя точками электрического поля, если при перемещении между ними точечного тела с зарядом  $0,012$  Кл поле выполнило работу  $0,36$  Дж.

2. Тело с зарядом  $4,6 \cdot 10^{-6}$  Кл перемещается в поле между двумя точками с разностью потенциалов  $2000$  В. Какая работа при этом выполняется?

3. Определить изменение скорости пылинки массой  $0,01$  г и с зарядом  $5$  мкКл, если она пройдет через точки поля с разностью потенциалов  $100$  В.

4. Как изменилась кинетическая энергия электрона, если он прошел разность потенциалов  $10^6$  В?

5. Какую работу необходимо выполнить, чтобы два точечных тела, имеющие заряды по  $3 \cdot 10^{-6}$  Кл и находящиеся в трансформаторном масле на расстоянии  $0,6$  м, сблизить до  $0,2$  м? Вязкость масла не учитывать.

6. Какими будут показания электрометра, если пробный шарик, соединенный длинным проводником со стержнем заземленного электрометра, перемещать по поверхности заряженного металлического проводника произвольной формы?

## § 10. Емкость

Сообщая телу определенный заряд, мы изменяем его потенциал. Это изменение непосредственно связано со значением заряда, сообщаемого телу.



Для исследования зависимости потенциала тела от его заряда проведем опыт с электрометром, корпус которого соединен с поверхностью Земли. Такая система может измерять потенциал тела относительно Земли. Укрепим на стержне этого электрометра пустотелый металлический шар и будем сообщать ему заряд с помощью маленького металлического шарика на изоляционной ручке. Если коснуться заряженным шариком внутренней поверхности металлического шара, то весь его заряд перейдет на шар, а стрелка электрометра покажет увеличение потенциала шара. Последовательно повторяя опыт с переносом заряда на большой шар, заметим, что каждый раз его потенциал увеличивается (рис. 1.28).

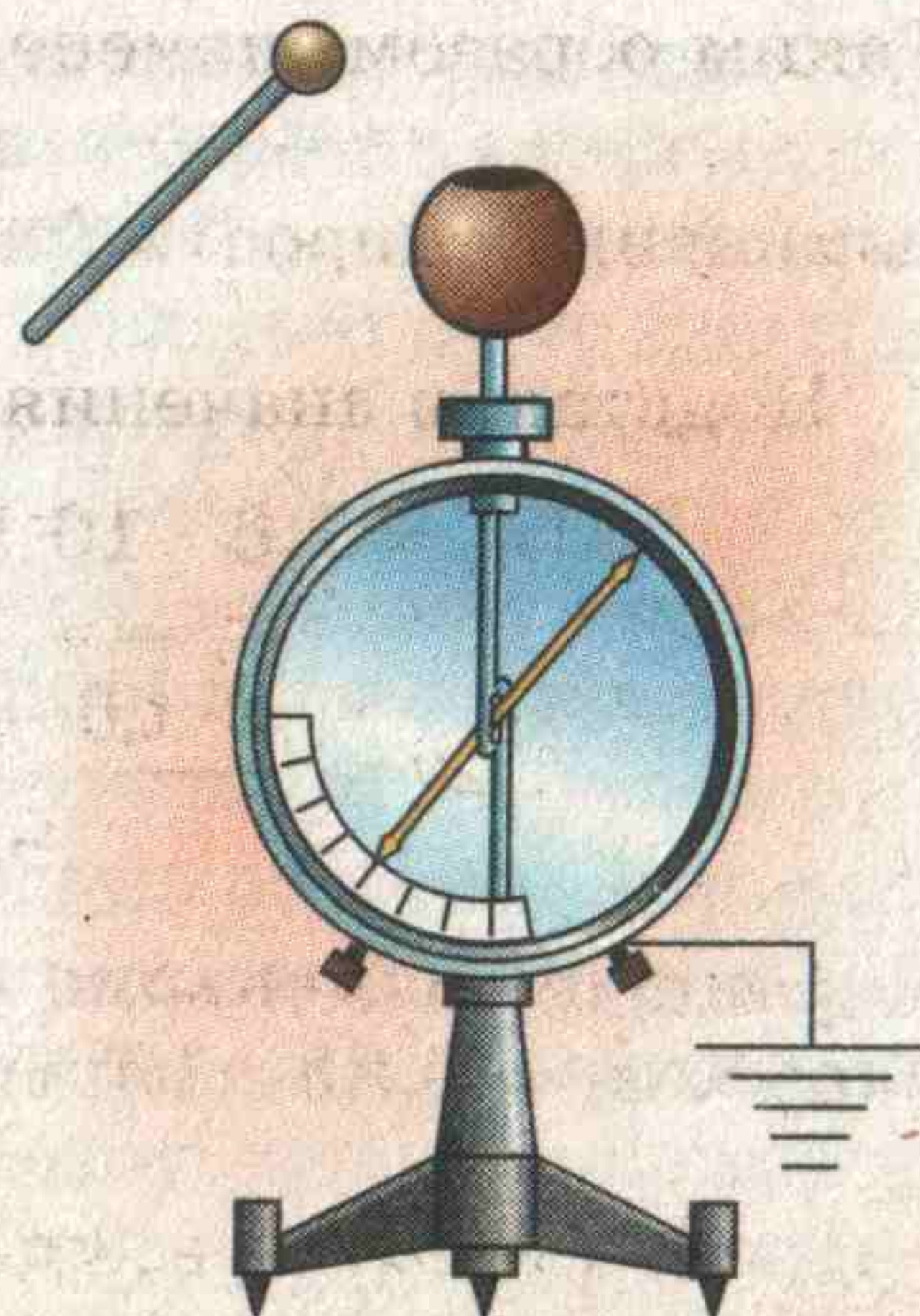


Рис. 1.28. Постепенное сообщение шару электрического заряда

Применяя более точные способы измерения заряда и потенциала, можно установить, что потенциал возрастает пропорционально возрастанию заряда. Потенциал пропорционален заряду шара. Результаты одного из таких опытов отражены на графике (рис 1.29).

31

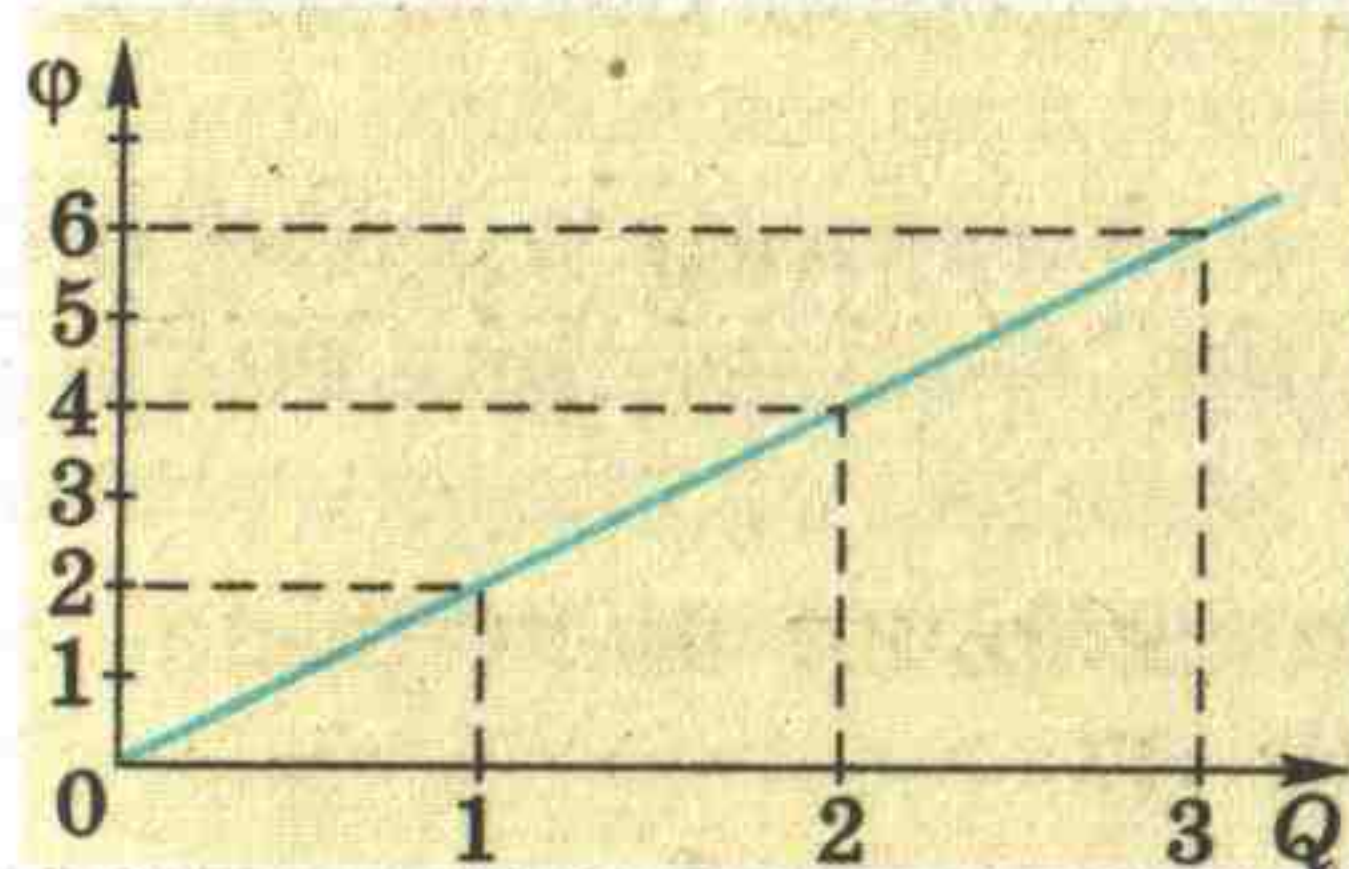


Рис. 1.29. Прямо пропорциональная зависимость потенциала шара определенного размера от сообщенного ему заряда

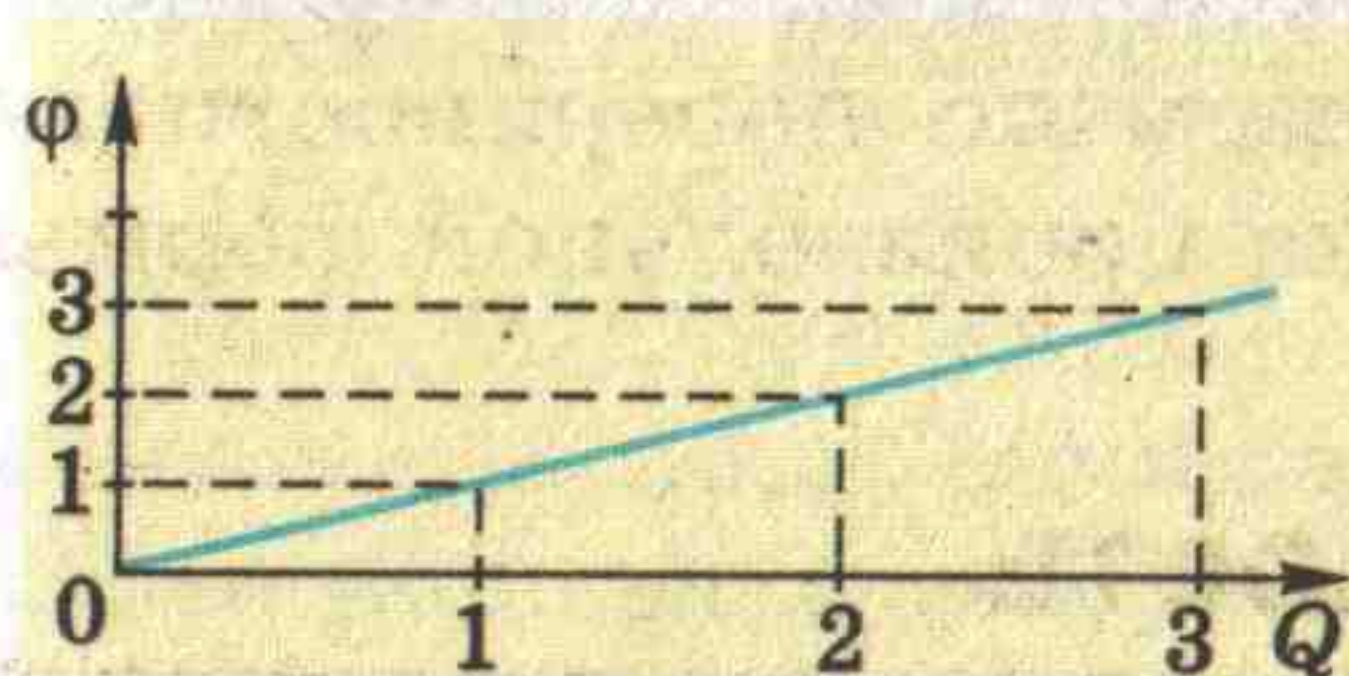


Рис. 1.31. Зависимость потенциала шара большего диаметра от значения его заряда

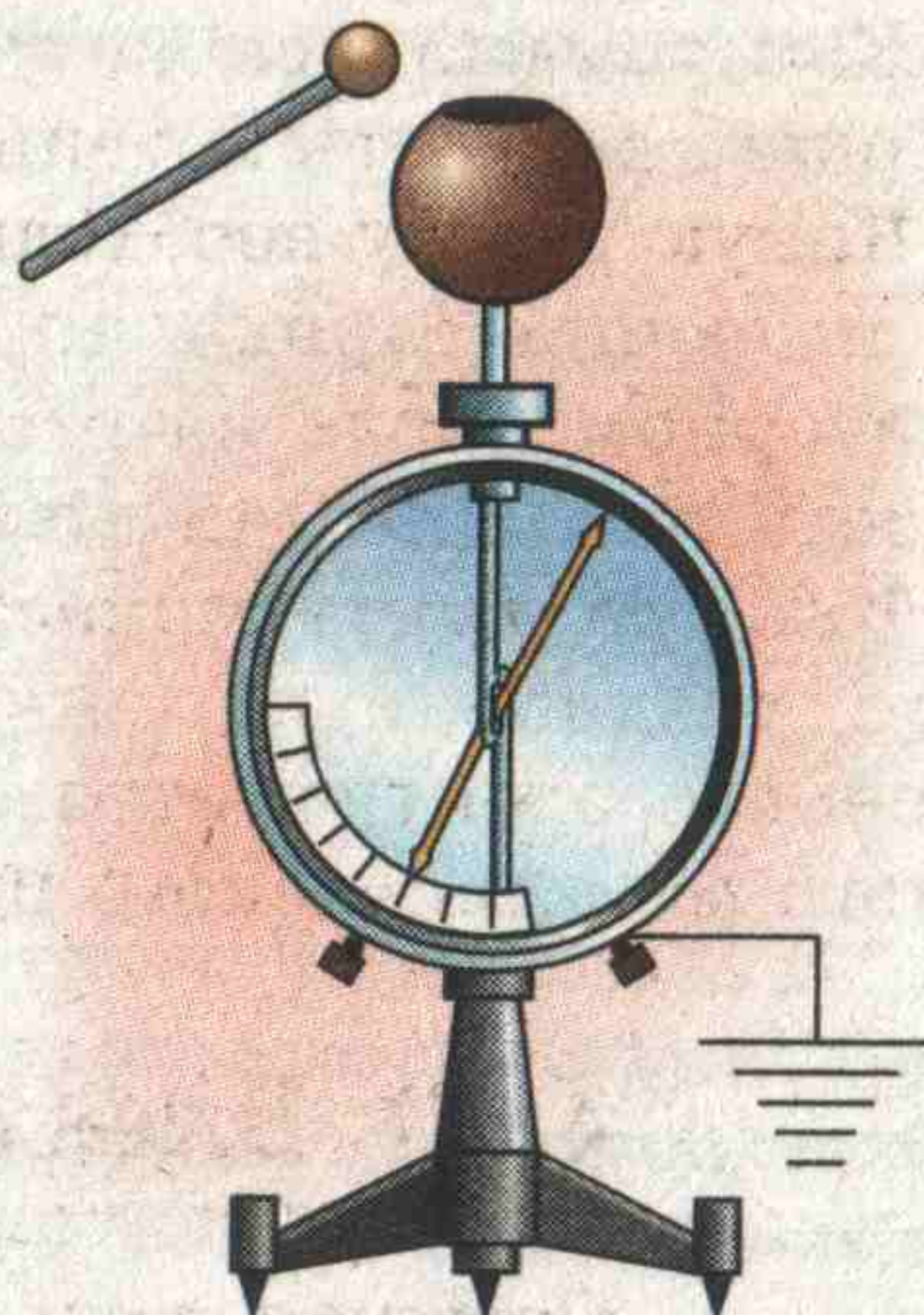


Рис. 1.30. Электризация шара большего диаметра



Если на стержне электрометра укрепим шар большего (меньшего) диаметра и продолжим опыты (рис. 1.31), то увидим, что скорость зарядки изменилась, соответственно уменьшилась (увеличилась).

Процесс электризации шара большего диаметра отображен графиком на рисунке 1.32.

Сопоставив графики, которые иллюстрируют процессы зарядки шаров различных диаметров (рис. 1.30 и 1.32), увидим, что графики имеют различный наклон относительно горизонтальной оси. Это свидетельствует о том, что при одинаковых значениях заряда шары разных диаметров будут иметь разные потенциалы. Оказывается, что на связь между зарядом и потенциалом шара существенно влияют геометрические размеры шаров.



**Потенциал металлического шара пропорционален его заряду; коэффициент пропорциональности для различных шаров разный.**

32

Анализируя результаты опытов и соответствующие графики, можно сделать выводы:

1) потенциал каждого шара пропорционален его заряду:

$$\varphi \sim Q;$$

2) для тел различных размеров коэффициент пропорциональности разный.

Установлено, что этот коэффициент для каждого тела имеет вполне определенное значение, что отражает способность тела накапливать электрический заряд. Физическая величина, равная отношению электрического заряда, сообщенного телу, к его потенциалу, называется электроемкостью тела.

$$C = \frac{Q}{\varphi},$$

где  $C$  – электроемкость проводника;  $Q$  – заряд;  $\varphi$  – потенциал.

Для измерения электроемкости в физике применяют единицу, которую называют фарад (Ф).

Тело имеет электроемкость в 1 фарад, если при изменении его заряда на 1 кулон потенциал изменяется на 1 вольт:

$$1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}.$$



**Электроемкость 1 фарад имеют тела, у которых при изменении заряда на 1 кулон потенциал изменяется на 1 вольт.**

1 Ф – довольно большое значение электроемкости. Например, электроемкость Земли, имеющей радиус 6400 км, состав-



ляет всего  $7 \cdot 10^4$  Ф. Поэтому на практике используют единицу электроемкости, кратную фараду:

$$1 \text{ микрофарад} = 1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф.}$$

$$1 \text{ пикофарад} = 1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф.}$$

**Задача.** Два шара, электроемкости которых 50 мкФ и 80 мкФ, а потенциалы 120 В и 50 В соответственно, соединяют проводом. Найти потенциал шаров после соединения.

Д а н о:

$$C_1 = 50 \text{ мкФ,}$$

$$C_2 = 80 \text{ мкФ,}$$

$$\varphi_1 = 120 \text{ В,}$$

$$\varphi_2 = 50 \text{ В.}$$

$$\varphi = ?$$

Р е ш е н и е

Заряд каждого шара соответственно равен:

$$Q_1 = C_1 \varphi_1,$$

$$Q_2 = C_2 \varphi_2.$$

После соединения шаров произойдет перераспределение зарядов между ними так, что их потенциалы станут одинаковыми. Согласно закону сохранения электрических зарядов

$$Q_1 + Q_2 = Q'_1 + Q'_2.$$

Отсюда

$$C_1 \varphi_1 + C_2 \varphi_2 = C_1 \varphi + C_2 \varphi,$$

или

$$\varphi = \frac{C_1 \varphi_1 + C_2 \varphi_2}{C_1 + C_2}.$$

Подставив значения физических величин и произведя расчеты, получим:

$$\varphi = \frac{50 \text{ мкФ} \cdot 120 \text{ В} + 80 \text{ мкФ} \cdot 50 \text{ В}}{50 \text{ мкФ} + 80 \text{ мкФ}} = 77 \text{ В.}$$

**Ответ:** после соединения шары будут иметь потенциал 77 В.

1. Какова зависимость между зарядом и потенциалом проводника?
2. Какая физическая величина называется электроемкостью?
3. Как рассчитать электроемкость обособленного проводника?
4. Назовите единицы электроемкости.



## Упражнение 5

1. Проводящий шарик электризуется до потенциала  $6 \cdot 10^3$  В зарядом  $3 \cdot 10^{-8}$  Кл. Определить электроемкость шарика в воздухе.

2. Какой заряд необходимо сообщить проводнику, чтобы зарядить его до потенциала 30 В, если его электроемкость 150 пФ?

3. Найти потенциал металлического шарика электроемкостью  $0,45 \cdot 10^{-11}$  пФ, если ему сообщили заряд  $1,8 \cdot 10^{-7}$  Кл.



4\*. Два металлических шарика имеют емкости 10 пФ и 20 пФ и заряды соответственно  $1,5 \cdot 10^{-8}$  Кл и  $3 \cdot 10^{-8}$  Кл. Будет ли перемещаться заряд из одного шарика на другой, если их соединить проводником?

## § 11. Конденсатор

Чтобы экспериментально определить емкость проводника, как и его потенциал, нужно создать условия, исключающие влияние всех окружающих тел, которые, влияя на тело, изменяют его потенциал и емкость.

Это утверждение можно проверить опытом.

Укрепим на стержне электрометра металлический шар и сообщим ему определенный заряд. Стрелка прибора отклонится от положения равновесия и покажет определенное значение потенциала относительно земли.

Поднесем к шару металлическую пластину, соединенную проводником с землей (рис. 1.32).

Показания стрелки электрометра уменьшатся. Поскольку заряд шара в опыте не изменялся, то уменьшение потенциала свидетельствует об увеличении емкости шара. Изменение потенциала и соответственно емкости шара будет наблюдаться и в случае изменения расстояния между

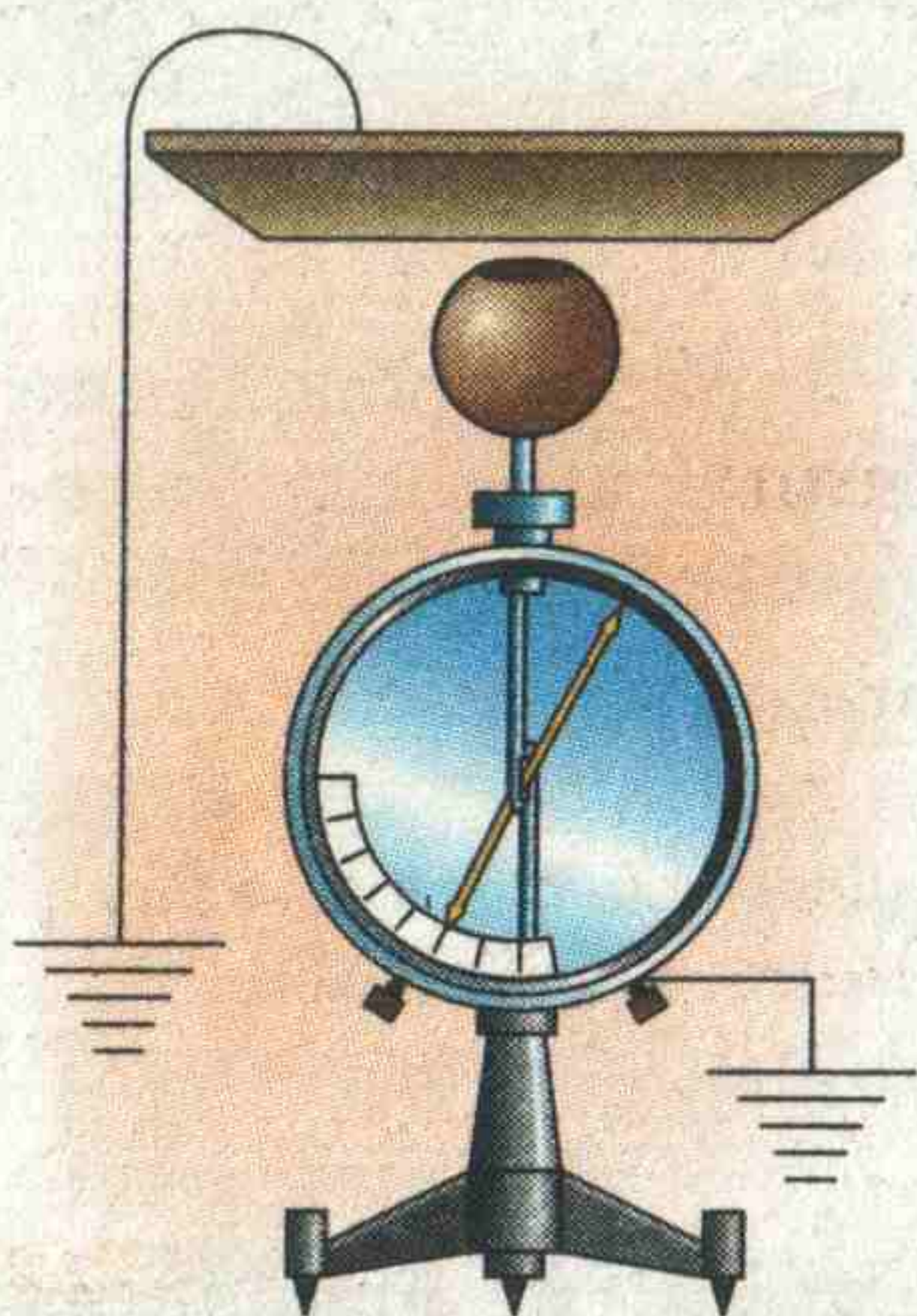


Рис. 1.32. Заземленная металлическая пластина влияет на емкость шара шаром и пластиной.

Таким образом, определяя емкость тела, необходимо учитывать также наличие окружающих тел. Поскольку на практике это сделать трудно, то применяют систему из двух или более проводников произвольной формы, разделенных диэлектриком. В этом случае электрические свойства такой системы проводников и диэлектрика не зависят от окружающих тел. Такую систему называют *конденсатором*. Простейшим для изучения и расчетов является конденсатор из двух металлических пластин, разделенных диэлектриком.

Емкость конденсатора, в отличие от обособленного тела, определяется по разности потенциалов между пластинами:

$$C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{Q}{\Delta\varphi},$$



где  $Q$  – заряд одной пластины;  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  и  $\Delta\varphi$  – разность потенциалов между пластинами.

**Слово конденсатор обозначает накопитель. В электричестве понимают как «накопитель электрических зарядов».**



**Задача.** Какую емкость имеет конденсатор, если на его обкладках накапливается заряд 50 нКл при разности потенциалов 2,5 кВ?

**Дано:**

$$Q = 50 \text{ нКл},$$

$$\Delta\varphi = 2,5 \text{ кВ}.$$

$C = ?$

**Решение**

Используем формулу емкости конденсатора:

$$C = \frac{Q}{\Delta\varphi}.$$

Подставим значения физических величин:

$$C = \frac{50 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{2,5 \cdot 10^3 \text{ В}} = 2 \cdot 10^{-11} \text{ Ф} = 20 \text{ пФ}.$$

**Ответ:** емкость данного конденсатора 20 пФ.

1. Как устроен конденсатор?
2. Назовите основное свойство конденсатора.
3. Почему внешние тела не влияют на емкость конденсатора?
4. Какие диэлектрики применяются в современных конденсаторах?
5. Для чего применяют конденсаторы?



## Упражнение 6

1. Найти емкость конденсатора, если при зарядке до напряжения 1,5 В ему сообщают заряд 30 нКл.

2. Какой заряд на каждой из обкладок конденсатора, если разность потенциалов равна 1000 В, а емкость конденсатора 3 мкФ?

3\*. Конденсатор емкостью 0,05 мкФ соединили с источником тока, вследствие чего он получил заряд 50 нКл. Определить напряженность поля между пластинами конденсатора, если расстояние между ними 0,5 мм.

4\*. Определить заряд пластины плоского конденсатора емкостью 0,02 мкФ, если напряженность поля в конденсаторе  $320 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ , расстояние между пластинами 0,5 см.



Первый конденсатор был создан в 1745 г. голландским ученым Питером ван Мушенбруком, профессором Лейденского университета. Проводя опыты по электризации различных тел, он опустил проводник от кондуктора электрической машины в стеклянный графин с водой (рис. 1.33).



**Питер ван Мушенбрук (1692–1761) – голландский физик; работы посвящены электричеству, теплоте, оптике; изобрел первый конденсатор – лейденскую банку и провел опыты с ней.**

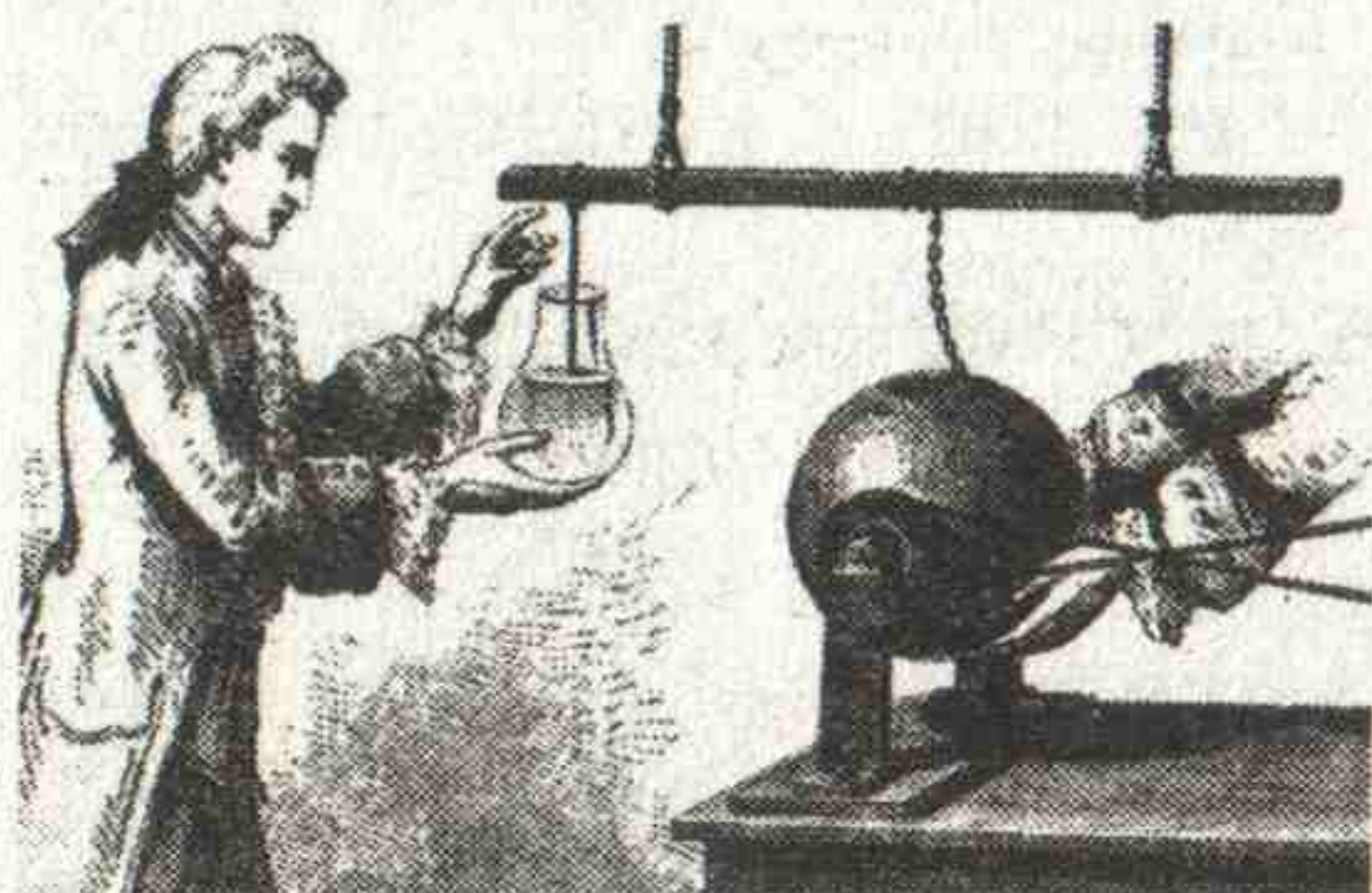


Рис. 1.33. Из истории открытия простейшего конденсатора – лейденской банки

Случайно коснувшись пальцем этого проводника, ученый ощутил сильный электрический удар. В дальнейшем жидкость заменили металлическими проводниками, укрепленными на внутренней и внешней поверхностях банки. Такой конденсатор называли лейденской банкой. В таком первоначальном виде она использовалась в лабораториях более 200 лет.

Более совершенные конденсаторы применяются в современной электротехнике и радиоэлектронике. Их можно найти в преобразователях напряжения (адаптерах), питающих постоянным электрическим током электронные приборы, в радиоприемниках и радиопередатчиках как составные части колебательных контуров. Они применяются практически во всех функциональных узлах электронной аппаратуры. В фотовспышках конденсаторы накапливают большие заряды, необходимые для действия вспышки.

В электротехнике конденсаторы обеспечивают необходимый режим работы электродвигателей, автоматических и релейных приборов, линий электропередач и т. п.

Во многих широкодиапазонных радиоприемниках конденсаторы переменной емкости (рис. 1.34) позволяют плавно изменять собственную частоту колебательного контура в процессе поиска передачи определенной радиостанции.

Весьма распространены конденсаторы *варикапы*, электроемкость которых можно изменять электрическим способом. Конструктивно они весьма схожи с полупроводниковыми диодами.

Конденсаторы могут быть плоскими, трубчатыми, дисковыми. В качестве диэлектрика в них используют парафинированную бумагу, слюду, воздух, пластмассы, керамику (рис. 1.35).





Рис. 1.34. Конденсатор переменной ёмкости с воздушным диэлектриком



Рис. 1.35. Различные типы конденсаторов

Искусственно созданные диэлектрические материалы позволяют создавать конденсаторы больших ёмкостей при небольших размерах.

## § 12. Электроёмкость плоского конденсатора

37



Плоским конденсатором обычно называют систему плоских проводящих пластин – обкладок, разделенных диэлектриком. Благодаря простоте конструкции такого конденсатора легко рассчитывать его ёмкость и получать значения, подтверждаемые опытами. Для этого достаточно знать его геометрические параметры и электрические свойства диэлектрика между его пластинами. Зависимость электроёмкости плоского конденсатора от указанных параметров можно исследовать в школьной лаборатории.

Создадим плоский конденсатор из двух плоских пластин. Для этого одну пластину укрепим на стержне электрометра, а другую – на изоляционной подставке, присоединив ее проводником к корпусу электрометра (рис. 1.36.). В такой системе электрометр будет измерять разность потенциалов между пластинами, образующими плоский конденсатор.

Проводя исследования, нужно помнить, что при постоянном значении заряда на пластинах уменьше-

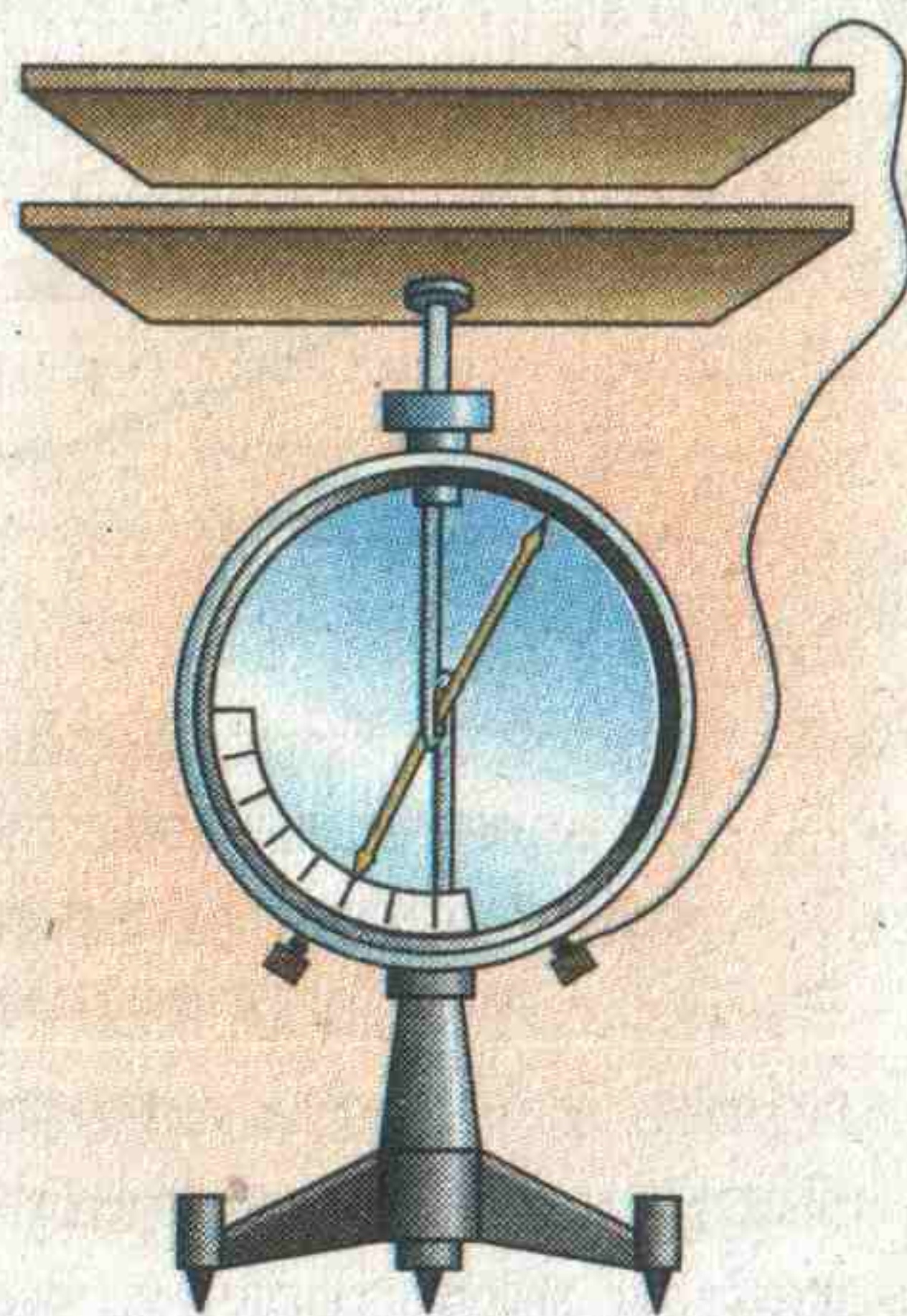


Рис. 1.36. Плоский конденсатор, присоединенный к электрометру



ние разности потенциалов свидетельствует об увеличении емкости конденсатора, и наоборот.



При постоянном значении заряда на пластинах уменьшение разности потенциалов свидетельствует об увеличении емкости конденсатора, и наоборот.

Сообщим пластинам некоторый заряд и отметим показания стрелки прибора. Когда начнем сближать пластины, уменьшая расстояние между ними, показания стрелки начнут уменьшаться. Это будет свидетельством того, что при уменьшении расстояния между пластинами емкость конденсатора будет увеличиваться. При увеличении расстояния между пластинами показания стрелки будут увеличиваться, что свидетельствует об уменьшении емкости.

Емкость плоского конденсатора обратно пропорциональна расстоянию между его обкладками.

$$C \sim \frac{1}{d},$$

38

где  $d$  – расстояние между обкладками.

Эту зависимость можно изобразить на графике как обратно пропорциональную зависимость (рис. 1.37).



Емкость плоского конденсатора обратно пропорциональна расстоянию между его обкладками.

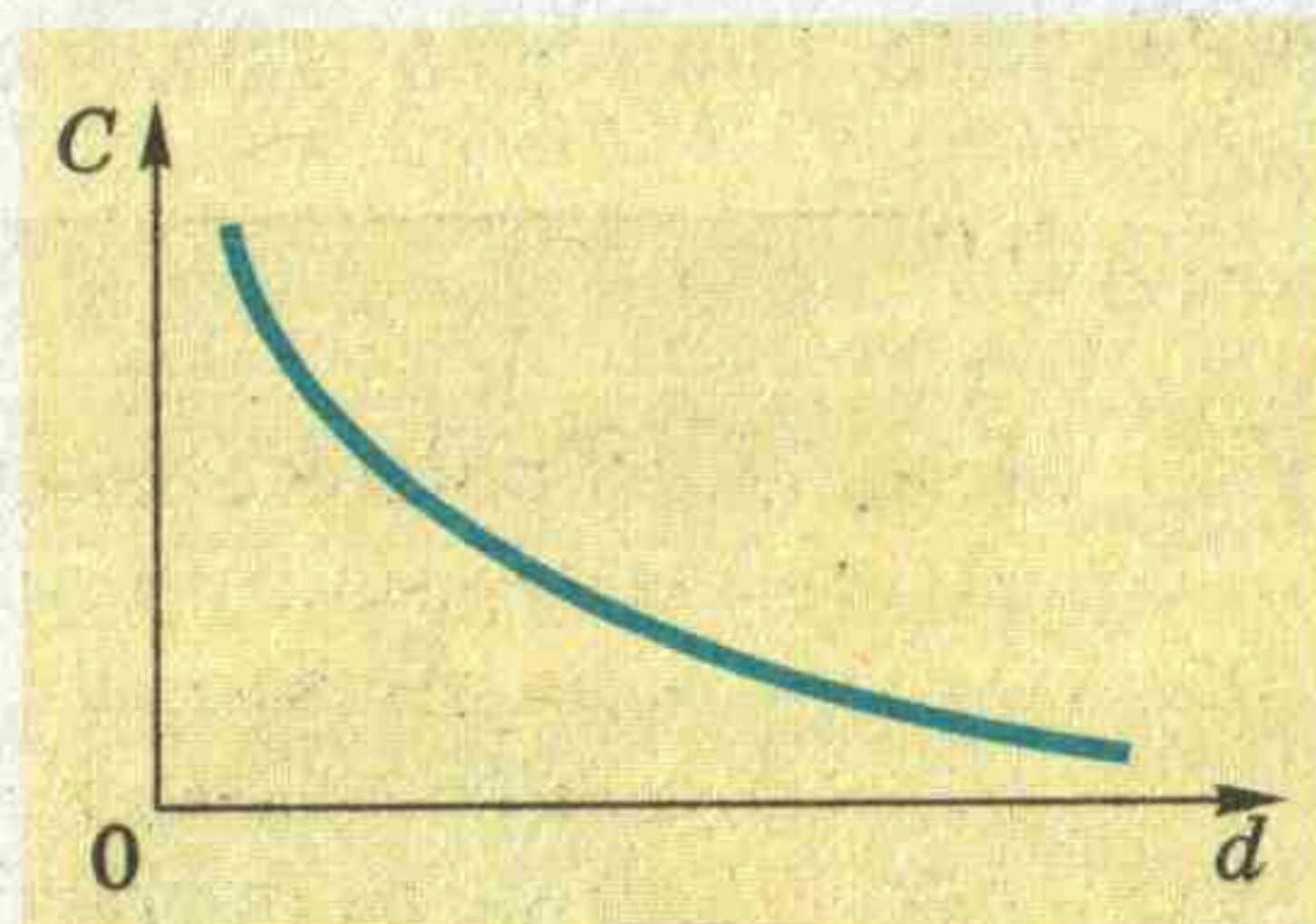


Рис. 1.37. График зависимости емкости плоского конденсатора от расстояния между пластинами

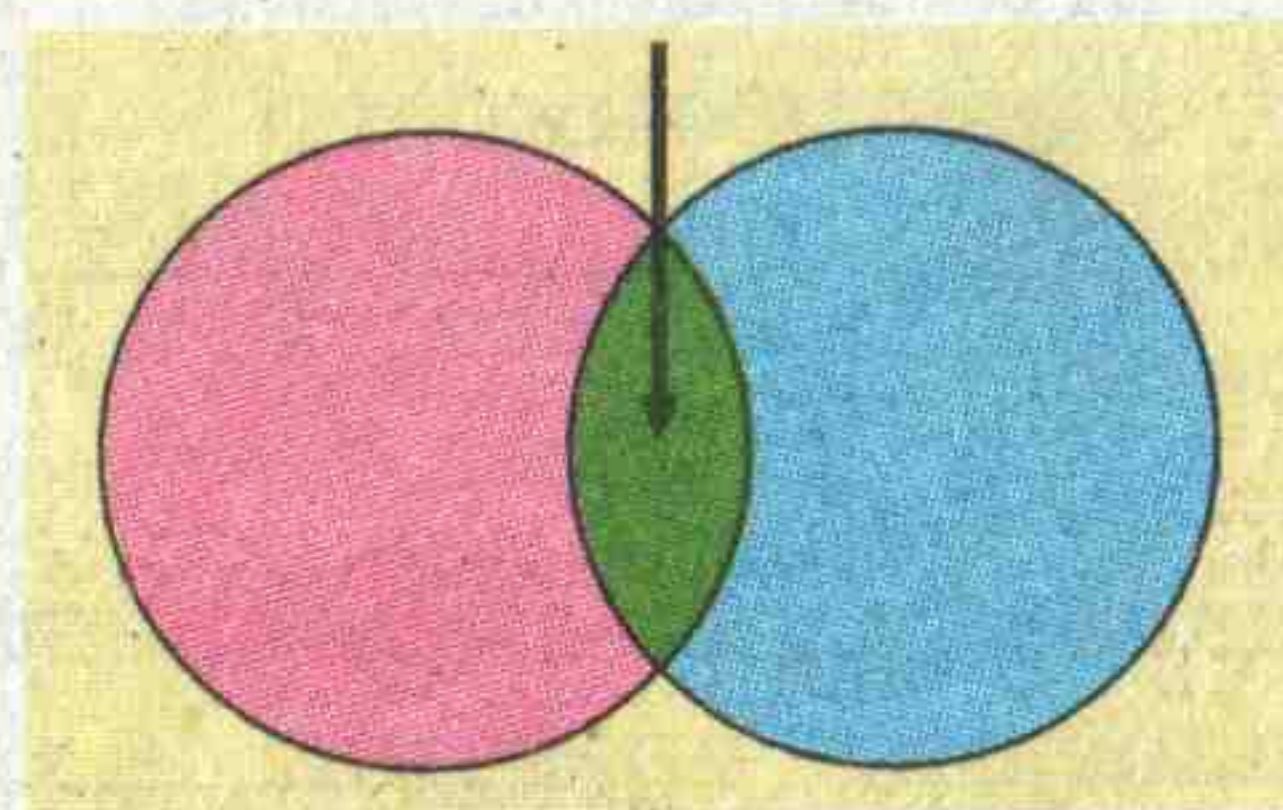


Рис. 1.38. При расчетах емкости плоского конденсатора учитывают площадь перекрытия пластин

Будем смещать одну пластину относительно другой в параллельных плоскостях, не изменяя расстояния между ними. При этом площадь перекрытия между пластинами будет изменяться (рис. 1.38). Изменение разности потенциалов, отмеченное электрометром, засвидетельствует изменение емкости.



Увеличение площади перекрытия приведет к увеличению электроемкости, при уменьшении – наоборот.

*Электроемкость плоского конденсатора пропорциональна площади пластин, которые перекрываются.*

$$C \sim S,$$

где  $S$  – площадь пластин, которые перекрываются.

**Электроемкость плоского конденсатора пропорциональна площади пластин, которые перекрываются.**

Эту зависимость можно изобразить графиком прямой пропорциональной зависимости (рис. 1.39).

Возвратив пластины в первоначальное положение, внесем в пространство между обкладками пластину из диэлектрика. Электрометр отметит уменьшение разности потенциалов между пластинами, что свидетельствует об увеличении электроемкости. Если внести пластину из другого диэлектрика (другая диэлектрическая проницаемость), то изменение электроемкости будет другим.

*Электроемкость плоского конденсатора зависит от диэлектрической проницаемости диэлектрика между обкладками.*

$$C \sim \epsilon,$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Эта зависимость изображена графиком на рисунке 1.40.

Результаты описанных выше исследований можно обобщить формулой электроемкости плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d},$$

где  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $d$  – расстояние между пластинами;  $S$  – площадь пластины.

**Электроемкость плоского конденсатора зависит от диэлектрической проницаемости диэлектрика.**

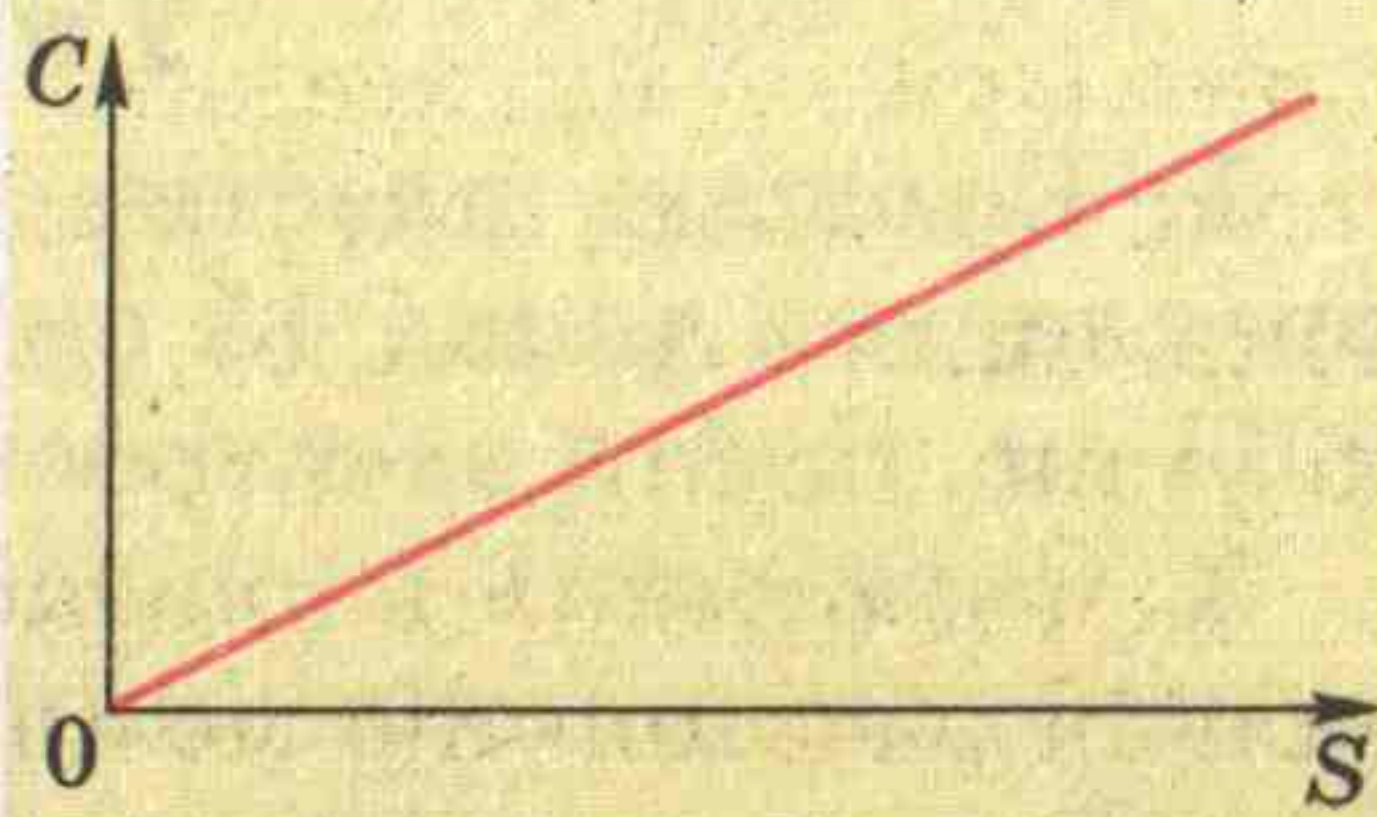


Рис. 1.39. График зависимости электроемкости плоского конденсатора от площади его пластин

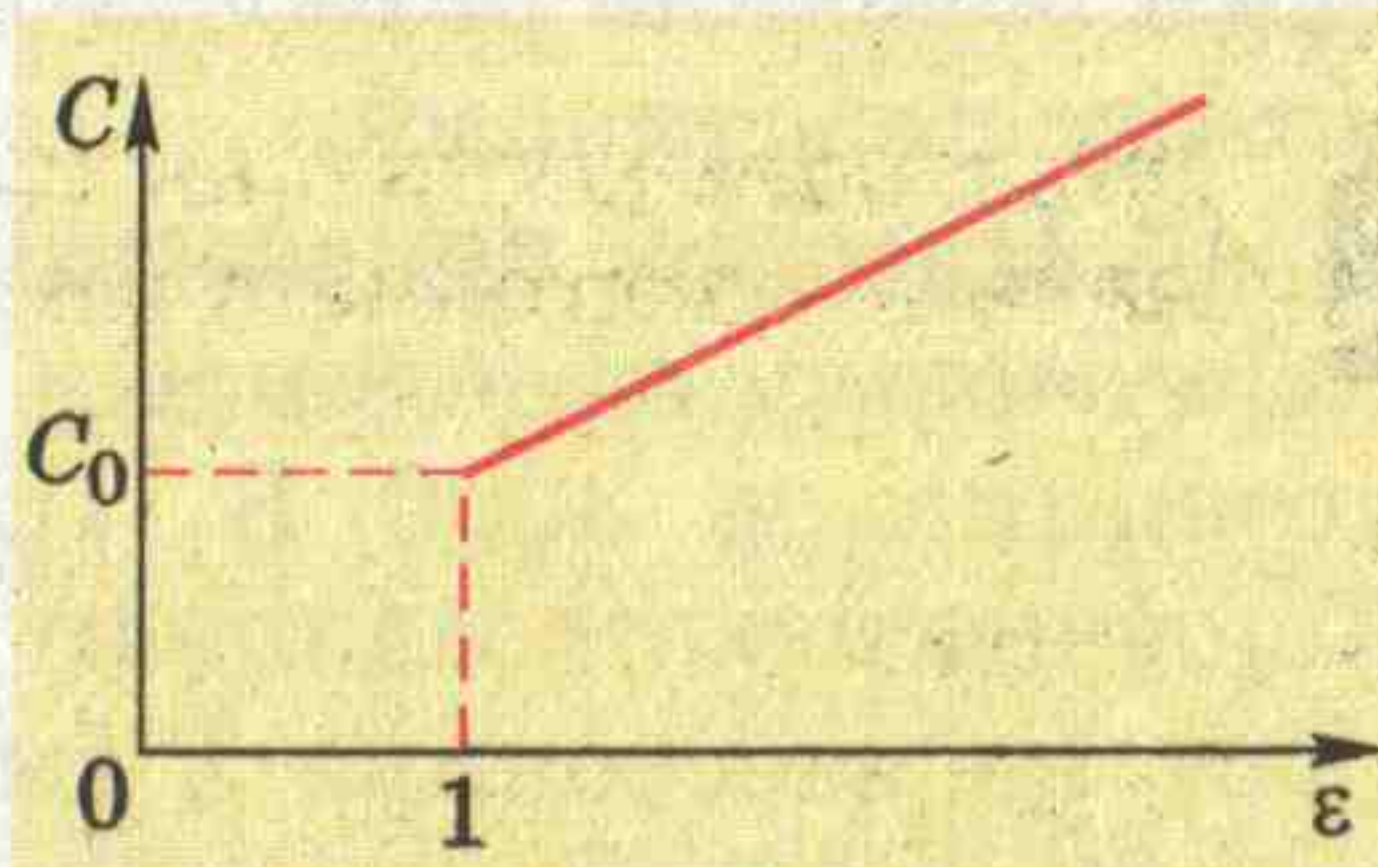


Рис. 1.40. График зависимости электроемкости плоского конденсатора от диэлектрической проницаемости диэлектрика





1. Как устроен плоский конденсатор?
2. По изменению какой величины в опыте можно делать выводы об изменении емкости?
3. Какова последовательность опытов по исследованию зависимости емкости конденсатора от его параметров?
4. Как зависит емкость плоского конденсатора от активной площади его пластин?
5. Как зависит емкость плоского конденсатора от расстояния между пластинами?
6. Как влияет диэлектрик на емкость плоского конденсатора?

### Упражнение 7

1. Площадь пластин плоского конденсатора со слюдяной прокладкой равна  $15 \text{ см}^2$ , а расстояние между пластинами —  $0,02 \text{ см}$ . Найти емкость конденсатора.

2. Определить площадь листа алюминиевой фольги, необходимого для изготовления плоского конденсатора емкостью  $1 \text{ мкФ}$ , если диэлектриком будет парафинированная бумага толщиной  $0,25 \text{ мм}$ .

3\*. Плоский конденсатор состоит из двух разделенных воздушным промежутком пластин площадью  $100 \text{ см}^2$  каждая. При сообщении одной из пластин заряда  $5 \text{ нКл}$  между пластинами возникла разность потенциалов  $120 \text{ В}$ . Найти расстояние между пластинами.

4\*. Плоский конденсатор с воздушным диэлектриком, расстояние между пластинами которого  $5 \text{ мм}$ , заряжен до разности потенциалов  $3000 \text{ В}$ . Площадь каждой пластины  $15,7 \text{ см}^2$ . Конденсатор отсоединяют от источника тока, а пластины раздвигают на расстояние  $1 \text{ см}$ . Определить емкость нового конденсатора и разность потенциалов между его пластинами.

## § 13. Соединение конденсаторов в батарее

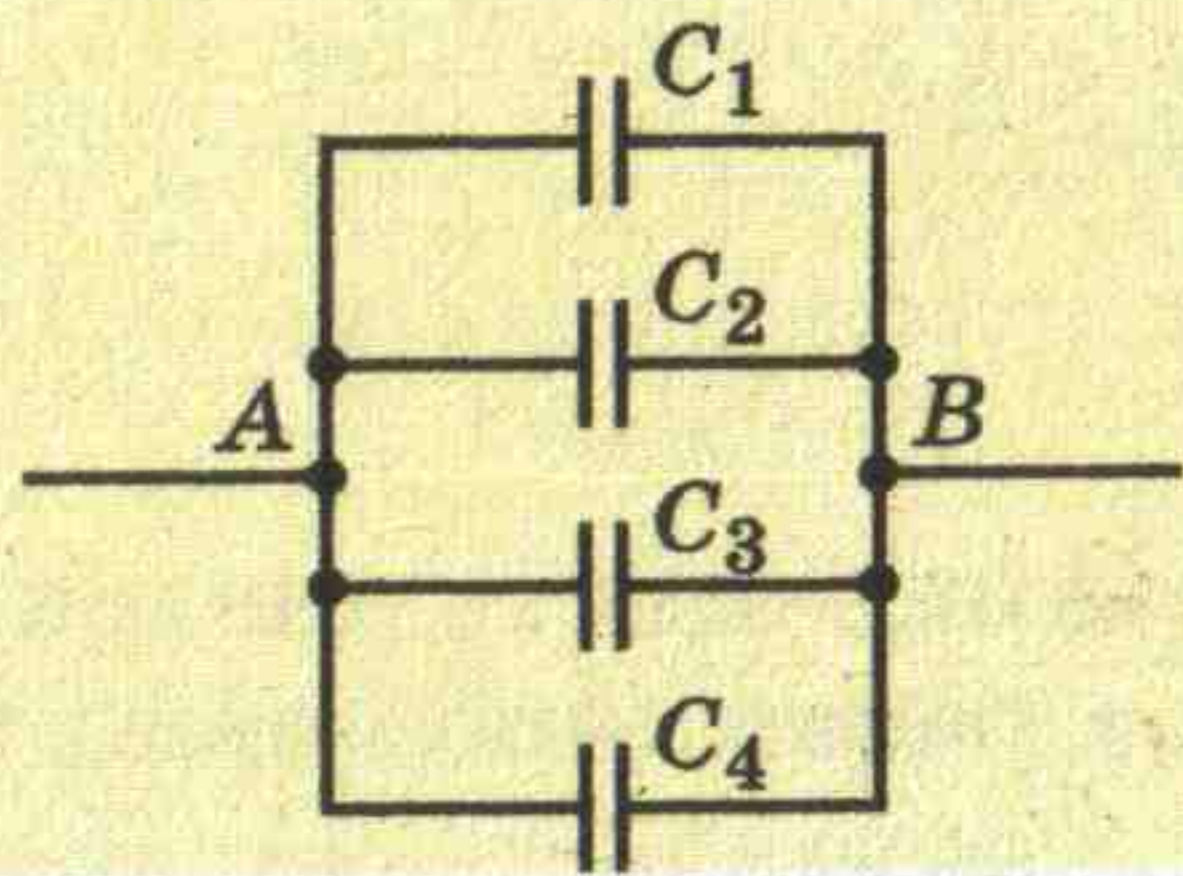


Рис. 1.41. Схема параллельного соединения конденсаторов

Для получения необходимых значений емкости конденсаторы соединяют в батареи. На практике встречается параллельное, последовательное и смешанное соединение конденсаторов.

При *параллельном* соединении конденсаторов все обкладки соединяются в две группы, в каждую из которых входит по одной обкладке каждого конденсатора. На рисунке 1.41 приведена схема такого соединения. При



таким соединении каждая группа обкладок имеет одинаковый потенциал.

Если батарею параллельно соединенных конденсаторов зарядить, то между обкладками каждого конденсатора будет одинаковая разность потенциалов. Общий заряд батареи будет равен сумме зарядов каждого из конденсаторов, входящих в батарею:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n.$$

Если учесть, что  $Q = C\Delta\varphi$ , то

$$C\Delta\varphi = C_1\Delta\varphi + C_2\Delta\varphi + C_3\Delta\varphi + \dots + C_n\Delta\varphi,$$

или

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n.$$

*Емкость батареи параллельно соединенных конденсаторов равна сумме емкостей всех конденсаторов.*

При последовательном соединении конденсаторов соединяются между собой только две пластины разных конденсаторов. Если в каждом конденсаторе пластины обозначить буквами  $A$  и  $B$ , то при последовательном соединении пластина  $B_1$  будет соединена с пластиной  $A_2$ , пластина  $B_2$  — с пластиной  $A_3$  и т. д. (рис. 1.43).

Если цепочку последовательно соединенных конденсаторов присоединить к источнику тока, то об-

кладка  $A_1$  и обкладка  $B_1$  будут иметь одинаковые по значению заряды  $+Q$  и  $-Q$ . Благодаря этому все обкладки внутри цепочки будут иметь такие же, но попарно противоположные по знаку заряды:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = \dots = Q_n = Q.$$

Вместе с тем общая разность потенциалов на концах цепочки будет равна сумме разностей потенциалов на каждом конденсаторе:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_3 + \dots + \Delta\varphi_n.$$

Учитывая, что  $\Delta\varphi = \frac{Q}{C}$ , будем иметь

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} + \dots + \frac{Q}{C_n}.$$

Разделим левую и правую части равенства на  $Q$ :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$

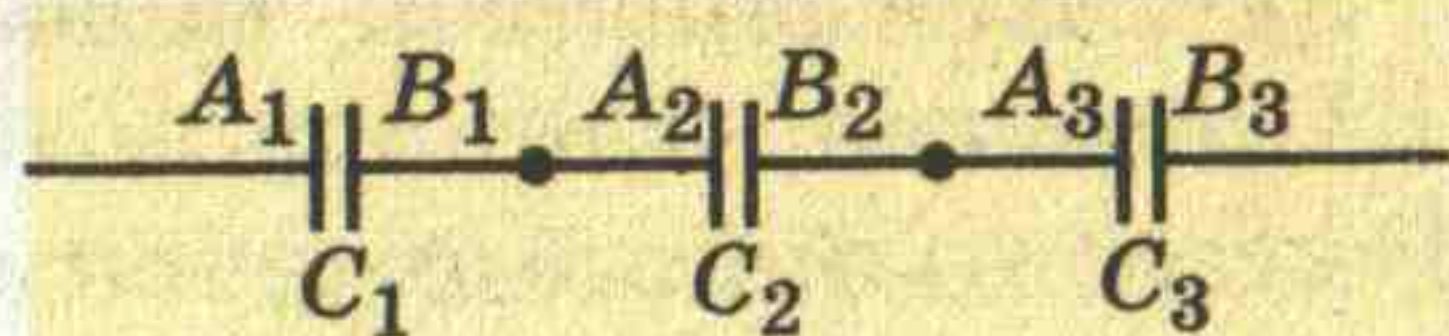


Рис. 1.42. Последовательное соединение конденсаторов



При последовательном соединении конденсаторов обратное значение электроемкости цепочки равно сумме обратных значений электроемкостей каждого из конденсаторов.



При последовательном соединении конденсаторов обратное значение электроемкости цепочки равно сумме обратных значений электроемкостей каждого из конденсаторов.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

При последовательном соединении конденсаторов разной электроемкости  $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$  общая электроемкость  $C$  будет меньше электроемкости самого меньшего конденсатора.

Если  $C_1 < C_2 < C_3 < \dots < C_n$ , то  $C < C_1$ .

### Упражнение 8

42

1. Четыре конденсатора имеют электроемкости 2 пФ, 5 пФ, 10 пФ, и 20 пФ. Определить их общую электроемкость при параллельном и последовательном соединении.

2\*. Конденсатор переменной электроемкости состоит из 12 пластин, площадь каждой из которых составляет 10 см<sup>2</sup>. Воздушный промежуток между соседними пластинами составляет 1 мм. Какая максимальная электроемкость этого конденсатора?

3. Два конденсатора электроемкостью 2 мкФ и 4 мкФ соединены последовательно и заряжены так, что разность потенциалов между крайними точками соединения составляет 60 В. Найти заряд и разность потенциалов каждого конденсатора.

4. Два конденсатора, электроемкости которых 4 мкФ и 1 мкФ, соединены последовательно и заряжены от источника тока. Разность потенциалов на соединении составляет 220 В. Определить заряд и разность потенциалов на каждом конденсаторе.

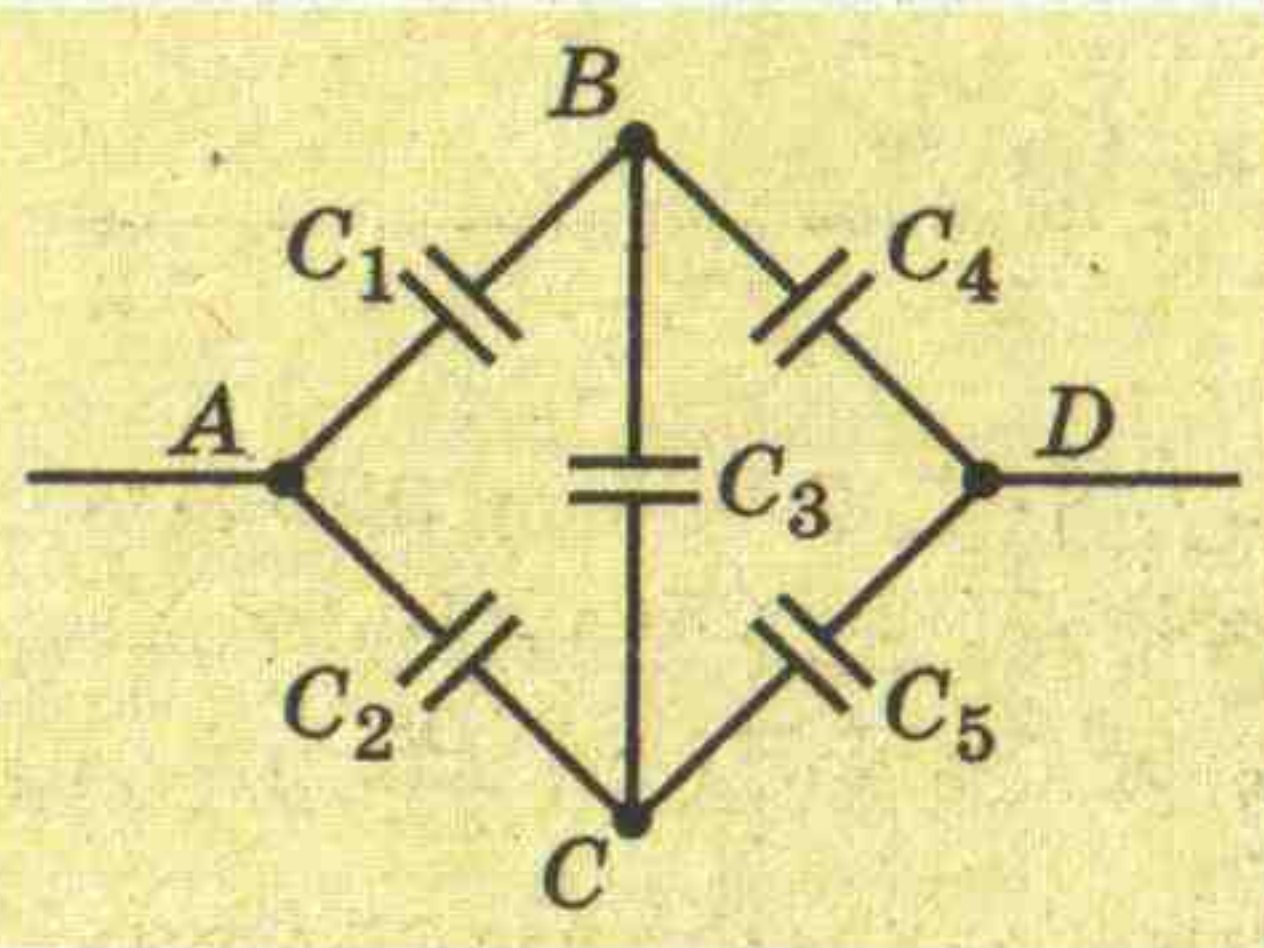


Рис. 1.43. К задаче 6

5. Разность потенциалов на обкладках конденсатора электроемкостью 6 мкФ составляет 127 В. К нему подсоединили параллельно конденсатор, имеющий электроемкость 4 мкФ и разность потенциалов 220 В. Определить электроемкость батареи и разность потенциалов между ее выводами.

6. Найти электроемкость системы конденсаторов, схема соединения которых показана на рисунке 1.43.



## § 14. Энергия электрического поля

В заряженном конденсаторе обкладки имеют разноименные заряды и взаимодействуют благодаря наличию электрического поля. О телах, которые взаимодействуют, говорят, что они имеют энергию. Таким образом можно утверждать, что заряженный конденсатор имеет энергию.

Наличие энергии в заряженном конденсаторе можно подтвердить опытами. Для этого возьмем конденсатор довольно большой емкости, источник тока, лампочку и составим цепь, показанную на рисунке 1.44. Сначала переведем переключатель в положение 1, зарядив таким образом конденсатор от источника тока.

Если после этого перевести переключатель в положение 2, то увидим кратковременную вспышку света вследствие накала нити лампочки. Наблюдаемое явление можно объяснить тем, что заряженный конденсатор имел энергию, благодаря которой была выполнена работа по накалу спирали лампочки.

Согласно закону сохранения энергии работа, выполненная при разрядке конденсатора, равна работе, выполненной при его зарядке. Расчет этой работы и соответственно потенциальной энергии заряженного конденсатора должен учитывать особенности процесса зарядки конденсатора. Зависимость заряда  $Q$  от времени зарядки  $t$  показана на графике (рис. 1.45).

Поскольку заряд конденсатора изменяется не пропорционально времени, вести расчет на основании формулы  $A = QEd$  нельзя, ведь напряженность поля также все время изменяется. Вместе с тем разность потенциалов между обкладками при зарядке линейно изменяется от нуля до определенного максимального значения (рис. 1.46). Поэтому работа, которая выполняется при зарядке конденсатора, равна:

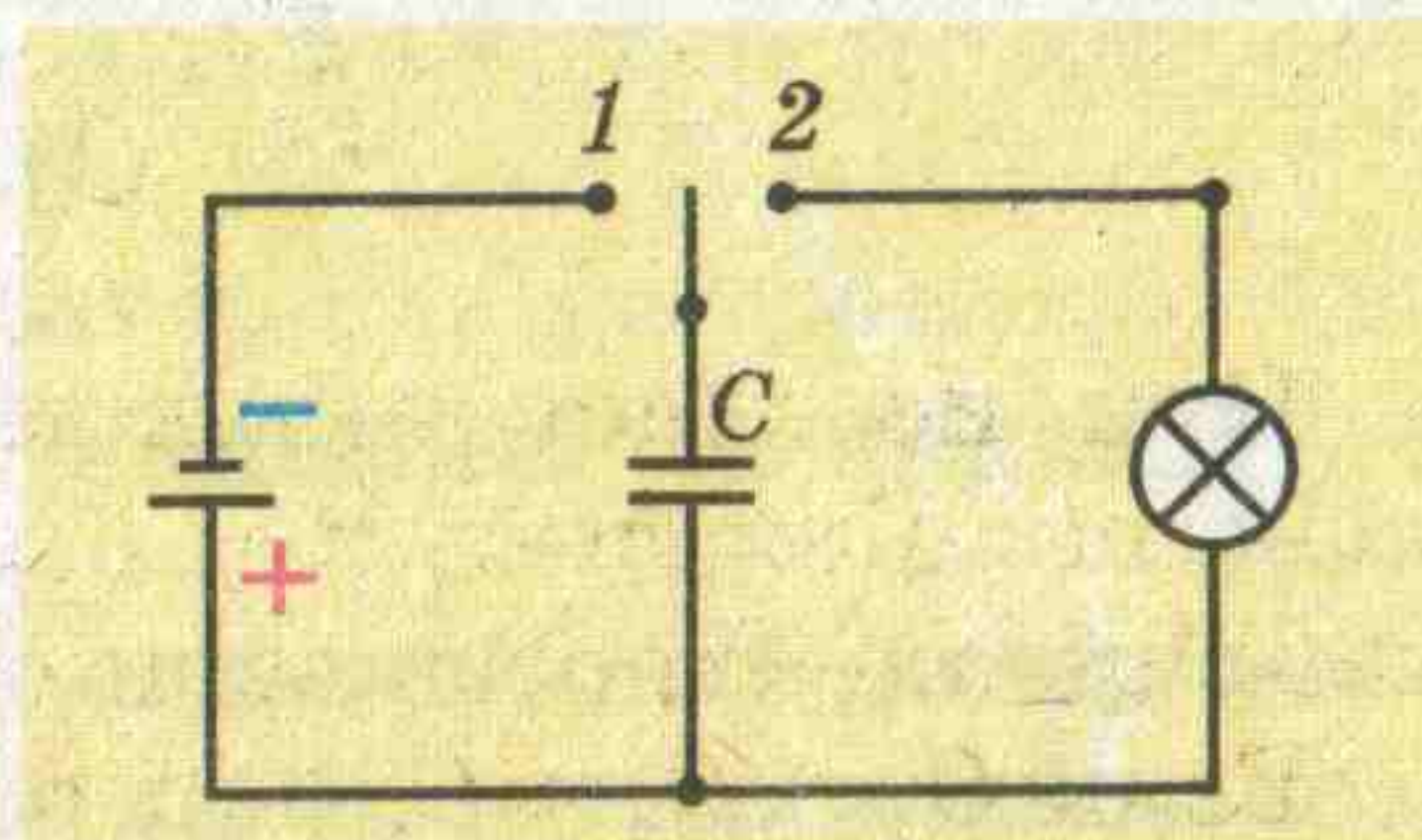


Рис. 1.44. Схема цепи, в которой лампочка вспыхивает за счет энергии заряженного конденсатора

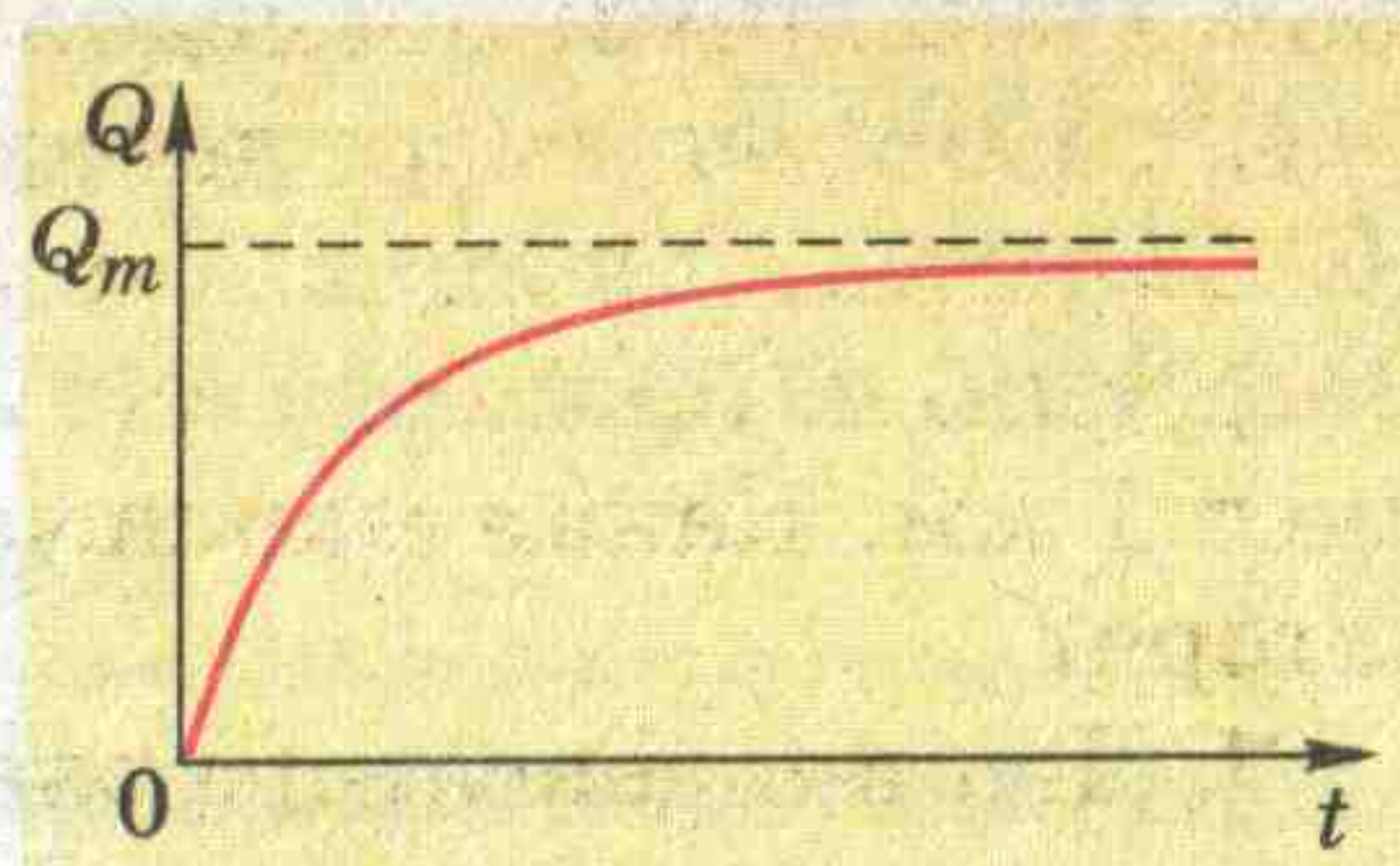


Рис. 1.45. Изменение заряда конденсатора при его зарядке

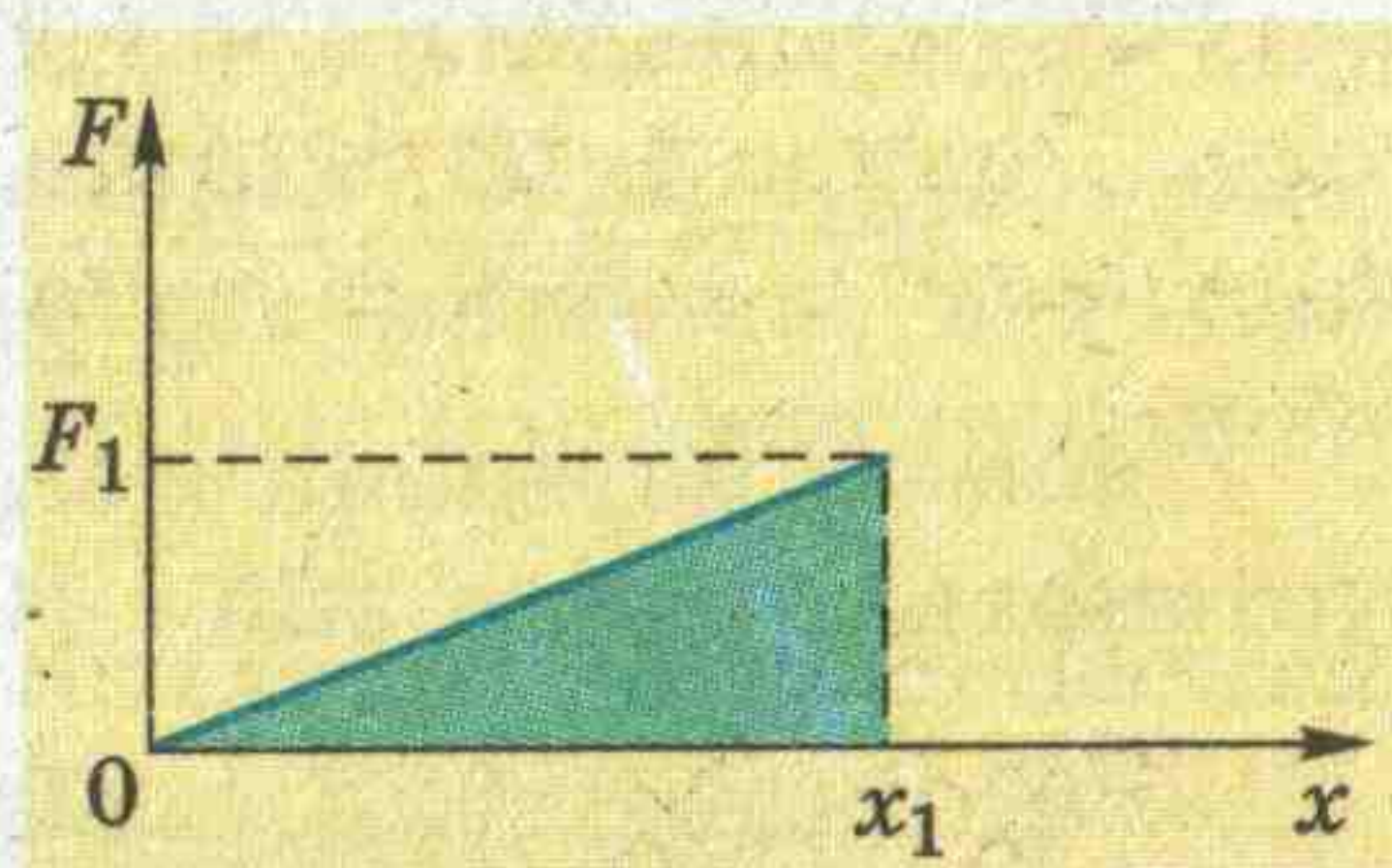


Рис. 1.46. К расчету работы электрического поля в конденсаторе



$$A = Q \cdot \frac{\Delta\varphi^*}{2}.$$

Если учесть, что  $Q = C\Delta\varphi$ , то

$$A = Q \cdot \frac{\Delta\varphi}{2} = C \cdot \frac{(\Delta\varphi)^2}{2}.$$

Таким образом, энергия электрического поля в конденсаторе равна:

$$W = A = C \cdot \frac{(\Delta\varphi)^2}{2}.$$

Приняв во внимание, что  $\Delta\varphi = \frac{Q}{C}$ , получим:  $W = \frac{Q}{2} \cdot \frac{Q}{C} = \frac{Q^2}{2C}$ .

**Задача.** Импульсную контактную сварку медной проволоки совершают при помощи разряда конденсатора электроемкостью 1000 мкФ при разности потенциалов между обкладками 1500 В. Какова средняя мощность импульсного разряда, если его длительность 2 мкс и КПД установки равен 4 %?

44

Д а н о:

$C = 1000$  мкФ,  
 $\Delta\varphi = 1500$  В,  
 $t = 2$  мкс,  
 $\eta = 4$  %.

$N - ?$

Р е ш е н и е

Работа по сварке проволоки выполняется за счет энергии заряженного конденсатора:

$$A = \frac{\eta C \cdot (\Delta\varphi)^2}{2}.$$

Средняя полезная мощность определяется с учетом времени выполнения работы:

$$N = \frac{A}{t} = \frac{\eta C \cdot (\Delta\varphi)^2}{2t}.$$

Подставив значения физических величин, получим:

$$N = \frac{4 \cdot 10^{-2} \cdot 1000 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \cdot 1500^2 \text{ В}}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}} = 225 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}.$$

**Ответ:** полезная мощность, которую развивает сварочная установка, равна  $225 \cdot 10^{-5}$  Вт.

1. Почему заряженный конденсатор имеет энергию?
2. Каково происхождение энергии заряженного конденсатора?
3. Назовите особенность процесса зарядки конденсатора.
4. Как определить энергию заряженного конденсатора с помощью графика?
5. Какие физические величины определяют энергию конденсатора?

\* Вспомните аналогичные рассуждения при расчете силы упругости в механике.



**Упражнение 9**

1. Определить энергию конденсатора, емкость которого  $2100 \text{ мкФ}$ , если разность потенциалов на его обкладках равна  $1000 \text{ В}$ .

2. Заряд конденсатора  $4,8 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}$ , разность потенциалов на обкладках  $600 \text{ В}$ . Какую энергию имеет конденсатор?

3. Определить энергию плоского конденсатора с площадью каждой обкладки  $400 \text{ см}^2$ . Толщина диэлектрика между обкладками  $1,5 \text{ мм}$ , заряд на обкладке  $2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$  ( $\epsilon = 6$ ).

4. Энергия заряженного конденсатора емкостью  $400 \text{ мкФ}$  равна  $200 \text{ Дж}$ . Определить разность потенциалов между его обкладками.

5. Определить емкость конденсатора, если при разности потенциалов на его обкладках  $1000 \text{ В}$  его энергия равна  $100 \text{ Дж}$ .

6. Плоский конденсатор с площадью пластин по  $200 \text{ см}^2$  и расстоянием между ними  $3 \text{ см}$  заряжается до разности потенциалов  $2 \cdot 10^3 \text{ В}$ , после чего его отсоединяют от источника. Потом пластины раздвигают на расстояние  $7 \text{ см}$ . Определить выполненную в этом случае работу.

**§ 15. Влияние электрического поля на живые организмы**

Многие люди понятие электричества и электрического поля связывают только с электризацией различных тел, мощными электрическими машинами, средствами электроники и т. п. Вместе с тем электрические явления происходят и в живой природе. И это не только электризация шерсти кошки или собаки, когда их гладят рукой, но и более сложные формы, связанные с их жизнедеятельностью. В природе существуют живые организмы, способные генерировать электричество и использовать его для охоты, защиты и ориентирования в пространстве.

Одним из таких живых существ является электрический угорь (рис. 1.47). Он может генерировать разность потенциалов между отдельными частями своего тела до  $360 \text{ В}$ . Разряды, которые создает эта рыба, живые существа ощущают на расстоянии до  $20 \text{ см}$ .

Свойства электрического угря использовали древние врачи для лечения подагры, мигрени, эпилепсии и т. п.

Аналогичные свойства и у электрического ската-торпедо (рис. 1.48). Он может на протяжении  $15 \text{ с}$  генерировать до  $150$  разрядов за секунду по  $80 \text{ В}$  каждый.



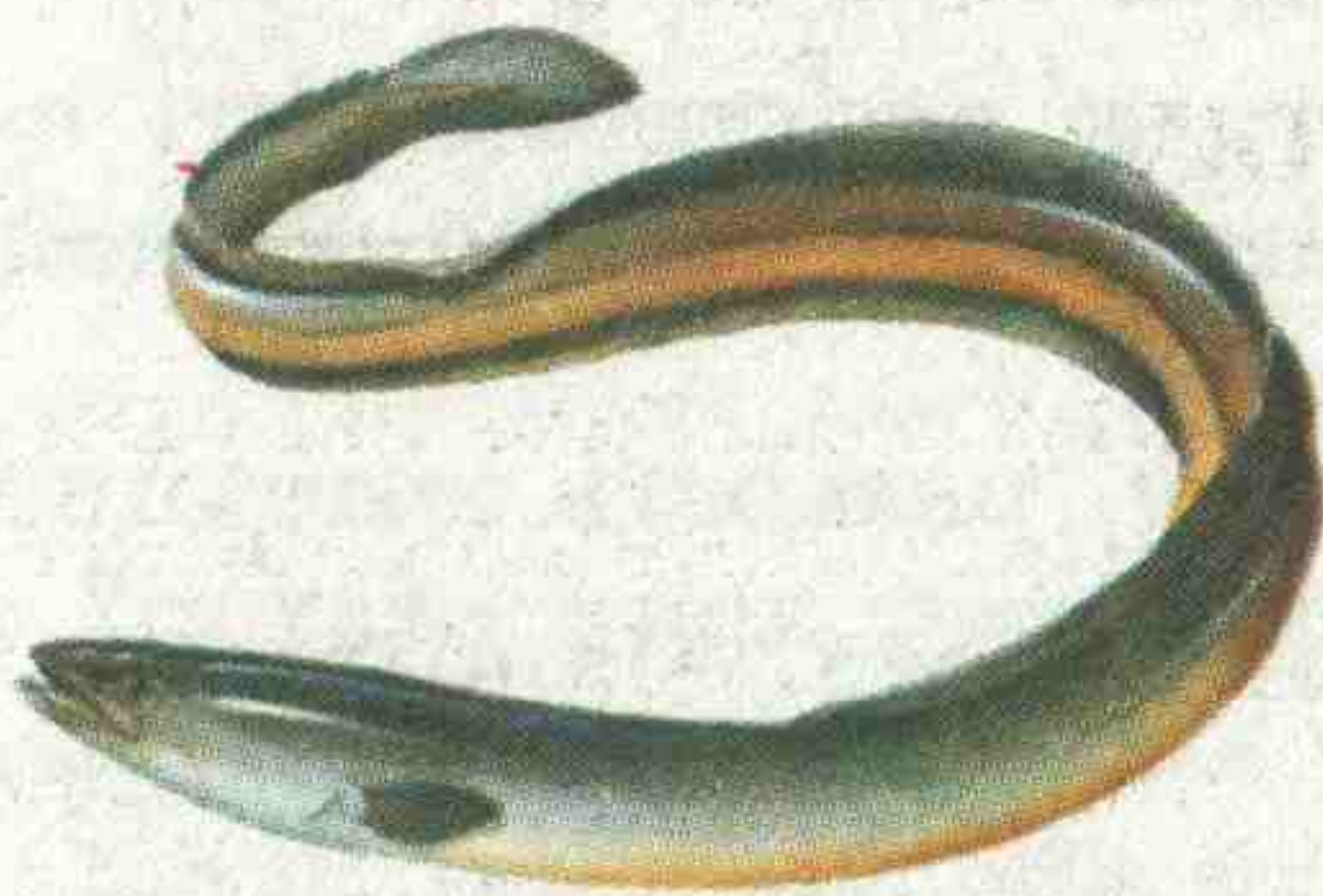


Рис. 1.47. Электрический угорь

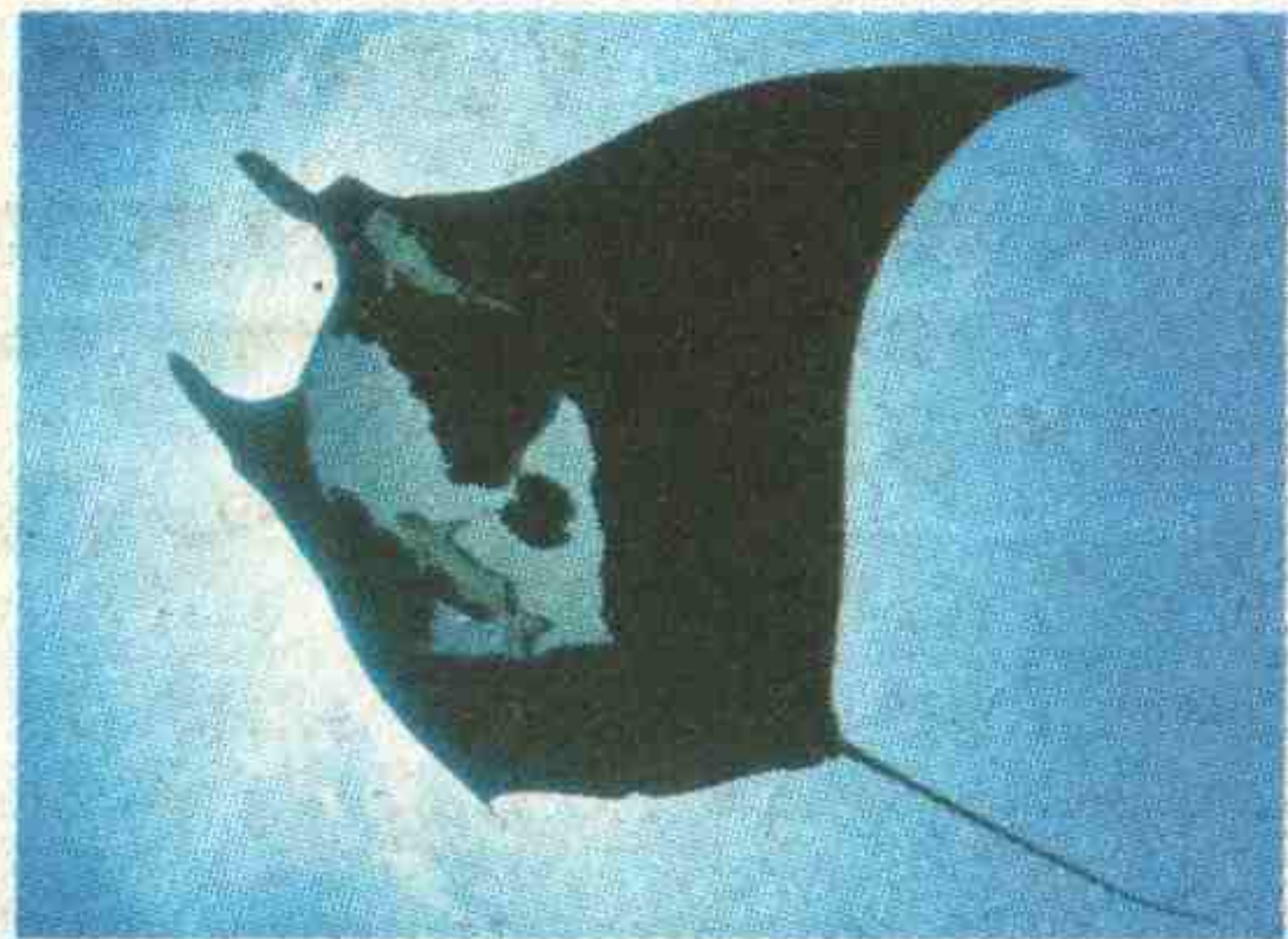


Рис. 1.48. Электрический скат

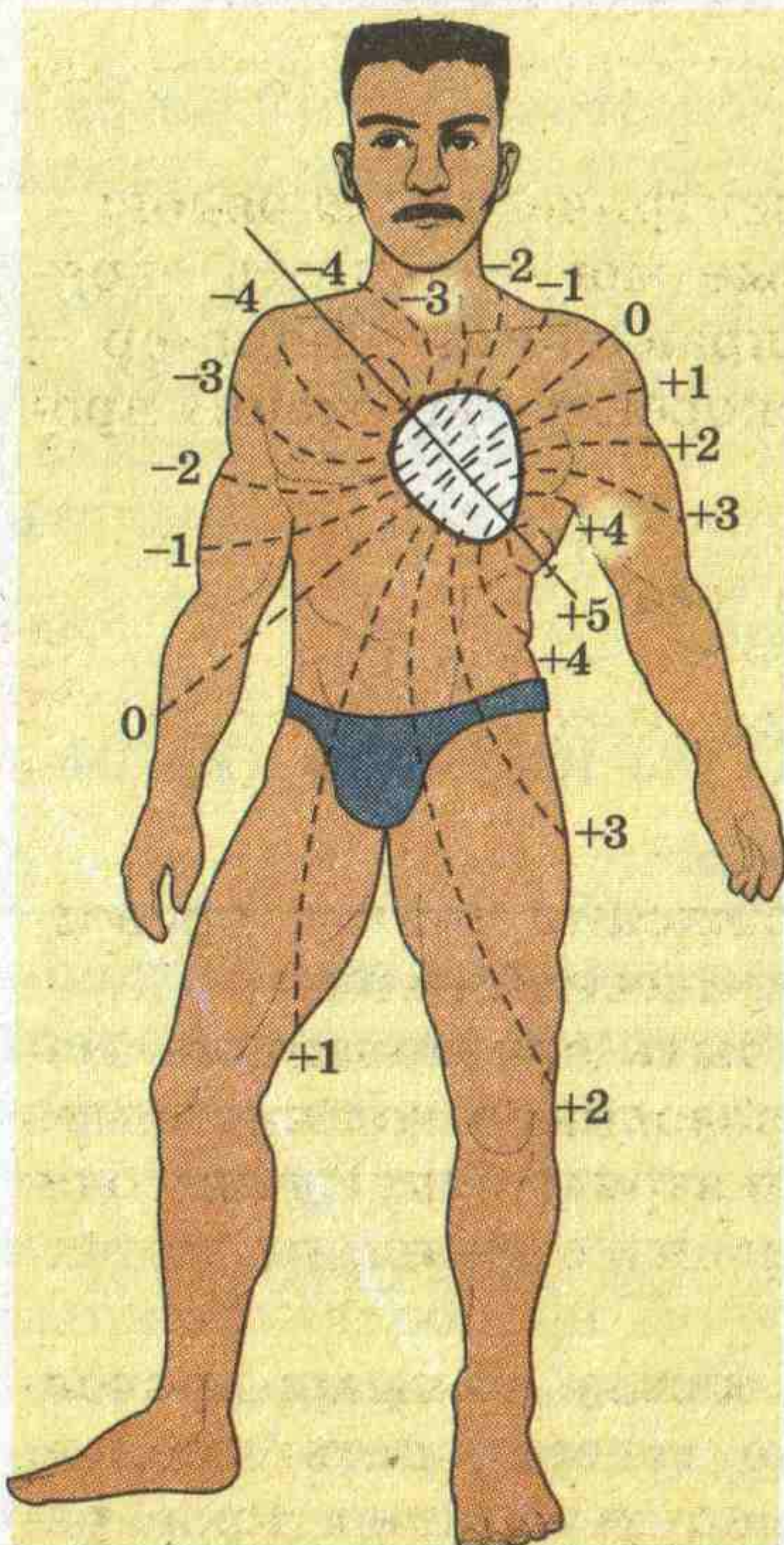


Рис. 1.49. Эквипотенциальные поверхности человека

Электрические явления играют существенную роль и в физиологии человека. Одним из мощных генераторов человека является сердце. На рисунке 1.49 показаны эквипотенциальные поверхности тела человека при активной работе сердца.

Хотя эти потенциалы сравнительно невелики — несколько милливольт, но их используют для диагностирования болезней сердца. Записывая эти потенциалы, специальные аппараты создают кардиограммы, по которым врач определяет состояние человека.

В физиотерапевтических кабинетах используют лечебный метод — фарадизацию, когда человека подвергают действию электрического поля и таким образом лечат некоторые болезни.

Исследования ученых показали, что под действием электрического поля улучшаются свойства семян растений. Растения, выращенные из таких семян, существенно улучшают свою урожайность. Даже трава

растет интенсивнее под линиями электропередач, где существует сильное электрическое поле.

Если человека определенным образом изолировать от действия электрического поля Земли, то его состояние существенно ухудшается. Некоторые люди чувствуют себя некомфортно в цельнометаллических вагонах, самолетах, автомобилях, где электрическое поле Земли экранируется металлическими корпусами транспортных средств.



## § 16. Условия возникновения электрического тока

Изучая физику в предыдущих классах, вы узнали, что такое электрический ток, каковы его основные свойства и закономерности, где и как он применяется. Напомним, что под электрическим током понимают направленное движение заряженных частиц или тел. Ток сопровождается определенными физическими действиями: магнитными, тепловыми, химическими и т. д. По этим действиям можно легко определить наличие электрического тока в той или иной среде.

Для создания электрического тока необходимы определенные условия:

- 1) наличие свободных носителей электрических зарядов;
- 2) наличие в среде причин, которые могут двигать заряженные частицы в определенном направлении, например — электрическое или магнитное поле, ускоренное движение проводника.

**Условия возникновения электрического тока:**

- наличие свободных носителей электрических зарядов;
- существование в среде причин направленного движения частиц.



Рассмотрим закономерности прохождения тока в проводнике, который является частью электрической цепи.

Для перемещения частиц должна быть определенная разность потенциалов, т. е. на концах проводника должны быть различные потенциалы. Тогда носители заряда будут двигаться от конца с большим потенциалом к концу с меньшим потенциалом.

Чтобы это происходило постоянно, между концами проводника должна существовать постоянная разность потенциалов. Выполнение этого условия обеспечивают источники тока, работающие за счет преобразования различных видов энергии в электрическую. Так, в гальванических элементах и аккумуляторах происходит преобразование энергии химических взаимодействий, в термогенераторах — тепловой энергии, в электромеханических генераторах — механической. Кроме источника тока, электрические цепи содержат и другие элементы, соединенные проводниками: различные потребители электрической энергии, измерительные и регулирующие приборы, выключатели.

**Электрические цепи содержат источники тока, потребители, измерительные и регулирующие приборы, выключатели.**





Электрический ток характеризуют физической величиной, называемой *силой тока*. Она характеризует скорость движения заряженных частиц в проводнике и численно равна отношению перенесенного частицами заряда  $\Delta Q$  к интервалу времени  $\Delta t$ , на протяжении которого произошел этот перенос:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}.$$



$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Ток называется постоянным, если за любые равные интервалы времени через поперечное сечение проводника произошло перенесение одинаковых зарядов.

В Международной системе единиц (СИ) единицей силы тока является ампер:

$$1 \text{ А} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ с}} = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{с}}.$$

48



$$1 \text{ А} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ с}} = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{с}}$$

Для измерения силы тока применяются также кратные и долевые единицы:

$$1 \text{ микроампер} = 1 \text{ мкА} = 10^{-6} \text{ А};$$

$$1 \text{ миллиампер} = 1 \text{ мА} = 10^{-3} \text{ А};$$

$$1 \text{ килоампер} = 1 \text{ кА} = 10^3 \text{ А}.$$



**Ом Георг Симон (1787–1854)** – немецкий физик, учитель математики и физики, член-корреспондент Берлинской АН. Исследовал электрический ток и явления, ему сопутствующие. Установил зависимость между силой тока и напряжением на участке цепи, названную в его честь законом Ома.

В 1826–1827 гг. немецкий физик Георг Ом открыл закон связи между силой тока, напряжением и сопротивлением участка цепи:

*сила тока в однородном участке цепи прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника*

$$I = \frac{U}{R},$$

где  $I$  – сила тока;  $U$  – напряжение на участке цепи;  $R$  – сопротивление проводника.



**Сила тока в однородном участке цепи прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению**

**проводника:  $I = \frac{U}{R}$**



Вспомним, что напряжение  $U$  – это энергетическая характеристика электрического поля, которая равна работе  $A$  поля по перемещению единичного электрического заряда  $Q$  по данному участку цепи:

$$U = \frac{A}{Q}.$$

В СИ она измеряется в вольтах (В).

На практике используются кратные и долевые единицы напряжения:

$$\begin{aligned} 1 \text{ милливольт} &= 1 \text{ мВ} = 10^{-3} \text{ В}; \\ 1 \text{ микровольт} &= 1 \text{ мкВ} = 10^{-6} \text{ В}; \\ 1 \text{ киловольт} &= 1 \text{ кВ} = 10^3 \text{ В}; \\ 1 \text{ мегавольт} &= 1 \text{ МВ} = 10^6 \text{ В}. \end{aligned}$$

Сопротивление как физическая величина является характеристикой электрических свойств проводника и зависит от геометрических и физических его параметров. Природа электрического сопротивления объясняется взаимодействием движущихся носителей заряда с другими структурными элементами проводника, в частности с ионами кристаллической решетки.

Формула закона Ома позволяет рассчитать сопротивление проводника:

$$R = \frac{U}{I}.$$

Если при напряжении 1 В в проводнике проходит ток 1 А, то сопротивление этого проводника составляет 1 Ом.

Если при напряжении 1 В в проводнике проходит ток 1 А, то сопротивление этого проводника составляет 1 Ом.

$$1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}}$$



Кратные и долевые единицы электрического сопротивления:

$$\begin{aligned} 1 \text{ миллиом} &= 1 \text{ мОм} = 10^{-3} \text{ Ом}; \\ 1 \text{ килоом} &= 1 \text{ кОм} = 10^3 \text{ Ом}; \\ 1 \text{ мегаом} &= 1 \text{ МОм} = 10^6 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Сопротивление проводника также можно рассчитать, зная его вещество и геометрические размеры:

$$R = \frac{\rho l}{S},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление вещества проводника;  $l$  – длина проводника;  $S$  – площадь поперечного сечения проводника.

$$R = \frac{\rho l}{S}$$





1. Что такое электрический ток?
2. Что такое сила тока?
3. Назовите единицы измерения силы тока.
4. Между какими физическими величинами устанавливает зависимость закон Ома?
5. Что называют напряжением?
6. Какова природа электрического сопротивления?

## § 17. Работа и мощность тока

Энергия электрического тока в цепи может превращаться в другие виды энергии: тепловую, химическую, механическую, световую и т. п. Любое это превращение происходит при выполнении работы.

Работа, выполняемая полем при перенесении частиц с общим зарядом  $\Delta Q$  по участку цепи, определяется по формуле:

$$A = \Delta Q U.$$

50

Поскольку  $\Delta Q = I \Delta t$ , то для определения работы можно применить формулу:

$$A = UI \Delta t.$$

Работа электрического тока, как и любая другая работа, измеряется в джоулях (Дж). Таким образом,

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с} = 1 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}.$$

Для характеристики способности выполнять работу применяют понятие «мощность». Мощность равна работе, выполняемой за единицу времени:

$$P = \frac{A}{\Delta t} = UI.$$

В СИ единицей мощности является ватт (Вт).

$$1 \text{ Вт} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ с}}.$$

Для электрического тока  $1 \text{ Вт} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А} = 1 \text{ В} \cdot \text{А}.$

Для измерения мощности электрического тока применяют также кратные и долевые единицы:

$$1 \text{ микроватт} = 1 \text{ мкВт} = 10^{-6} \text{ Вт};$$

$$1 \text{ милливатт} = 1 \text{ мВт} = 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$1 \text{ гектоватт} = 1 \text{ гВт} = 10^2 \text{ Вт};$$

$$1 \text{ киловатт} = 1 \text{ кВт} = 10^3 \text{ Вт};$$

$$1 \text{ мегаватт} = 1 \text{ МВт} = 10^6 \text{ Вт}.$$



Одним из наиболее применяемых на практике действий тока является его тепловое действие. На нем основаны различные тепловые электрические приборы – электрические утюги, водонагреватели, электрочайники, обогреватели и т. п. Количество теплоты, выделяемое проводником при прохождении электрического тока за определенное время, определяется законом Джоуля–Ленца:

$$Q = I^2 R \Delta t,$$

где  $I$  – сила тока;  $R$  – сопротивление проводника;  $\Delta t$  – интервал времени.

$$Q = I^2 R \Delta t$$



1. Как рассчитать работу электрического тока?
2. Что такое мощность и как она определяется для электрической цепи?
3. Какие применяются единицы работы и мощности?
4. Как формулируется закон Джоуля–Ленца?

## § 18. Электродвижущая сила источника тока

51

Ранее мы установили, что для возникновения электрического тока в цепи необходимо создать на концах проводника разность потенциалов и поддерживать ее длительное время.

Это условие может быть выполнено, если в электрической цепи будет источник тока, который за счет своих внутренних взаимодействий будет выполнять работу по разделению электрических зарядов. Эти взаимодействия получили название сторонних сил, поскольку имеют *неэлектростатическое* происхождение.

**Сторонние силы выполняют работу по разделению электрических зарядов в электрической цепи. Они имеют неэлектростатическое происхождение.**



Так, в гальванических элементах эта энергия возникает вследствие химических реакций между разнородными веществами. В солнечных батареях заряды разделяются вследствие взаимодействия фотонов с атомами вещества. В электрофорной машине разделение зарядов происходит при выполнении механической работы при вращении дисков.

Поэтому для характеристики способности источника тока создавать разность потенциалов используют понятие электродвижущей силы – ЭДС.



Электродвижущей силой источника  $\mathcal{E}$  называют физическую величину, которая характеризует способность сторонних сил создавать и поддерживать разность потенциалов в цепи. Она равна отношению работы сторонних сил  $A_{\text{стор}}$  к значению разделенных зарядов  $\Delta Q$ .

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор}}}{\Delta Q}.$$

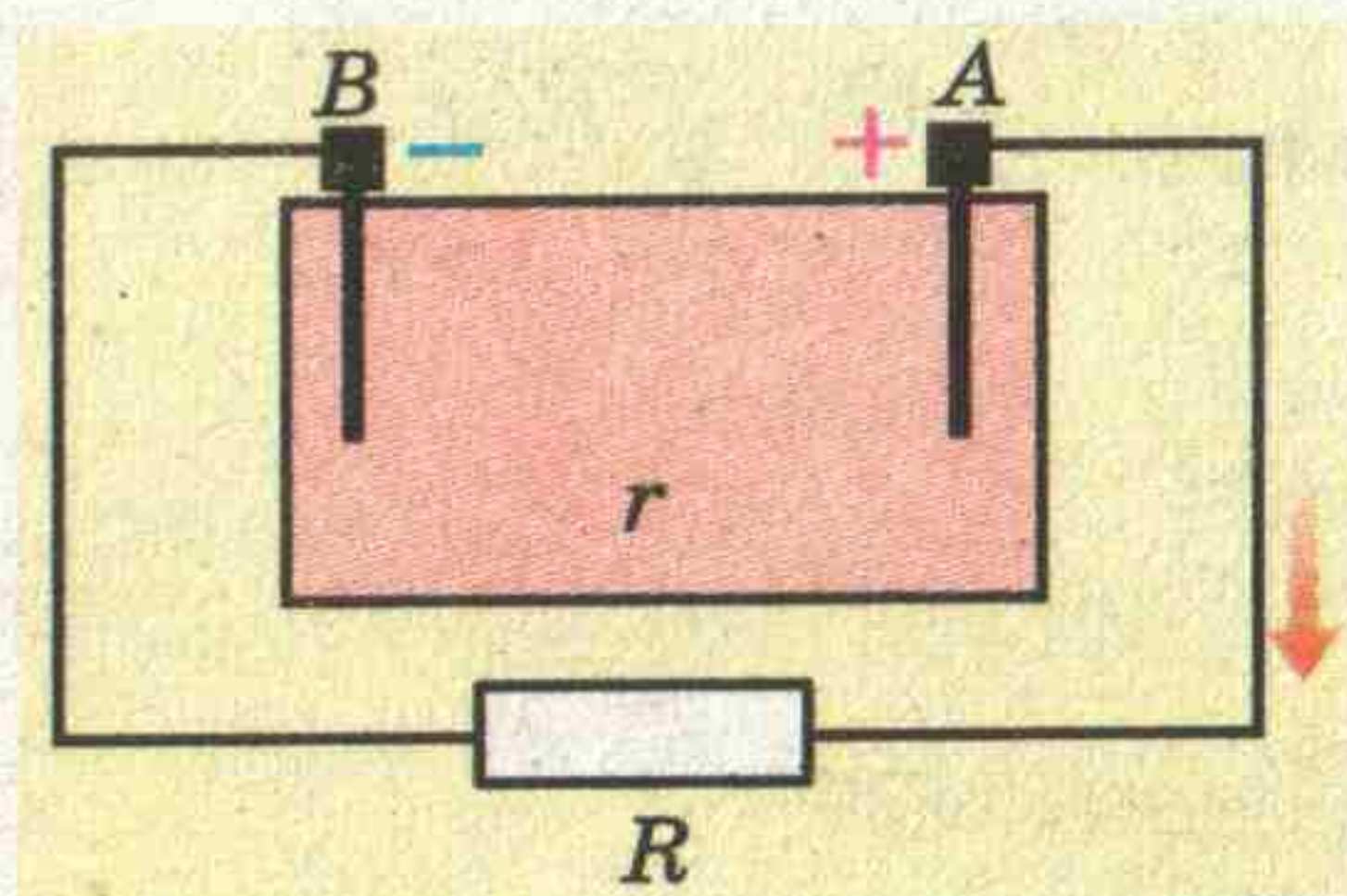


Рис. 1.50. Сомкнутая электрическая цепь

Электродвижущая сила является характеристикой источника тока и не зависит от того, какую внешнюю нагрузку присоединяют к его полюсам.

Как и напряжение, она измеряется в вольтах (В).

Рассмотрим более детально роль источника тока в электрической цепи (рис. 1.50).

Во внешней цепи положительные носители заряда будут двигаться от полюса А к полюсу В. Сторонние силы для поддержания постоянной разности потенциалов внутри источника будут разделять электрические заряды за счет работы сил неэлектростатической природы. Таким образом, в источнике тока будет проходить ток, сила которого будет такой же, как и во внешней цепи. Поэтому источник тока будет иметь определенное сопротивление, определяющее силу тока в цепи. Это сопротивление называют *внутренним сопротивлением* источника тока.

Учитывая наличие источника тока, в цепи можно выделить внутреннюю и внешнюю часть. Общее сопротивление цепи будет равно сумме сопротивлений внешней и внутренней частей.

1. Какова роль источника тока в цепи?
2. Какова природа сторонних сил?
3. Какова роль сторонних сил внутри источника?
4. Что такое электродвижущая сила?
5. Какое происхождение внутреннего сопротивления источника тока?

## § 19. Закон Ома для полной цепи

Открытый Г. Омом закон для участка цепи в общем случае справедлив и для полной цепи, если принимать во внимание как внешнюю, так и внутреннюю части цепи. Математическую запись закона Ома для этого случая можно



получить на основании закона сохранения энергии, универсального для всех процессов в природе.

Пусть электрическая цепь состоит из источника тока, имеющего ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутреннее сопротивление  $r$ , и проводника сопротивлением  $R$  (рис. 1.51).

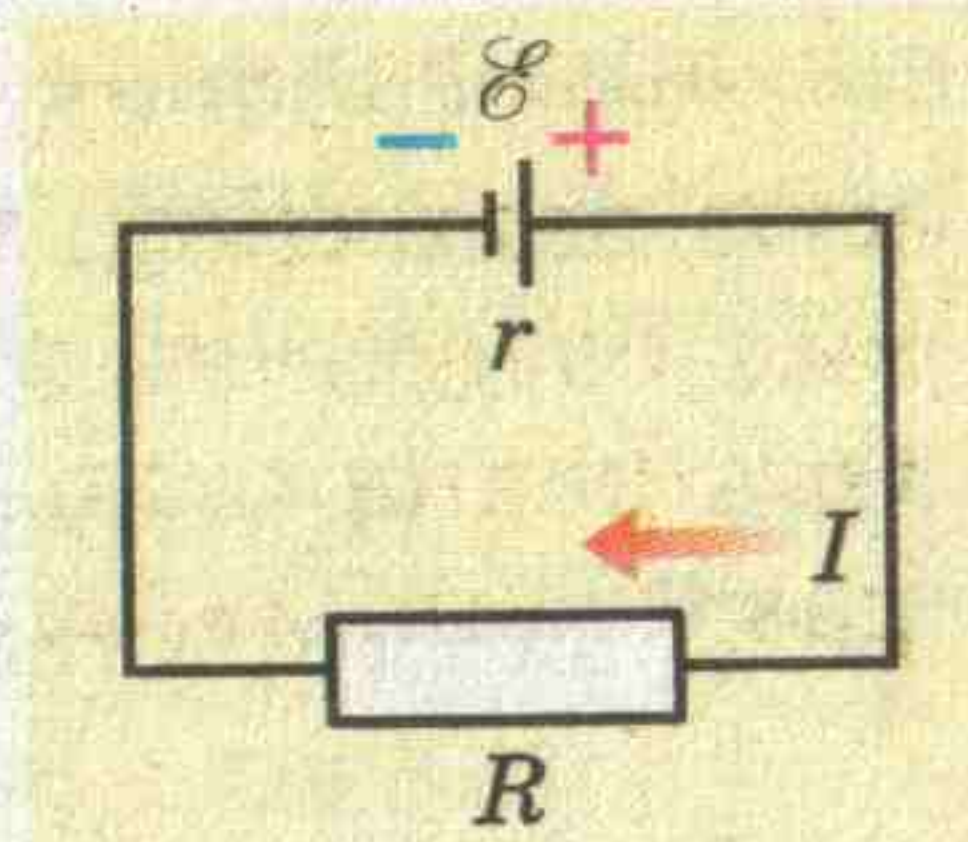


Рис. 1.51.  
Замкнутая электрическая цепь

Согласно закону сохранения энергии работа сторонних сил равна сумме работ электрического тока во внешней и внутренней частях цепи:

$$A_{\text{стор}} = A_{\text{вн}} + A_{\text{внеш}}.$$

По определению

$$A_{\text{стор}} = \mathcal{E}Q\Delta t; \quad A_{\text{вн}} = U_{\text{вн}}Q\Delta t; \quad A_{\text{внеш}} = U_{\text{внеш}}Q\Delta t.$$

Отсюда

$$\mathcal{E} = U_{\text{вн}} + U_{\text{внеш}}.$$

Если учесть, что по закону Ома для участка цепи  $U = IR$ , то получим формулу этого закона для полной цепи:

$$\mathcal{E} = IR + Ir, \text{ отсюда } I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$

Таким образом, сила тока в полной цепи пропорциональна электродвижущей силе источника и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи.

**Сила тока в полной цепи пропорциональна электродвижущей силе источника и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи:**

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$



Пользуясь законом Ома для полной цепи, можно рассчитать два экстремальных случая в электрической цепи – короткое замыкание и разомкнутую цепь. Если сопротивление внешней цепи стремится к нулю (короткое замыкание), то сила тока в цепи

$$I_{\text{кз}} = \frac{\mathcal{E}}{r}.$$

Это будет максимальное значение силы тока для данной цепи.

Если цепь разорвана ( $R \rightarrow \infty$ ), то ток в цепи прекращается при любых значениях ЭДС и внутреннего сопротивления. В последнем случае напряжение на полюсах источника тока будет равно электродвижущей силе. Поэтому иногда дают упрощен-



ное определение ЭДС: это величина, равная напряжению на клеммах источника при разомкнутой цепи.



Источники тока могут соединяться в батареи. Существуют несколько способов соединения источников тока.

Последовательным называют соединение, при котором соединяются друг с другом разноименные полюса источников: положительный предыдущего с отрицательным следующего и т. д. (рис. 1.52). Чаще всего соединяют источники с одинаковыми характеристиками, поэтому при последовательном соединении  $N$  источников ЭДС батареи будет в  $N$  раз больше, чем ЭДС одного источника:

$$\mathcal{E}_{\text{бат}} = N\mathcal{E}.$$

Внутреннее сопротивление такой батареи будет также в  $N$  раз больше:

$$r_{\text{бат}} = Nr.$$

Для последовательного соединения источников тока закон Ома для полной цепи будет записываться:

$$I = \frac{N\mathcal{E}}{R + Nr}.$$

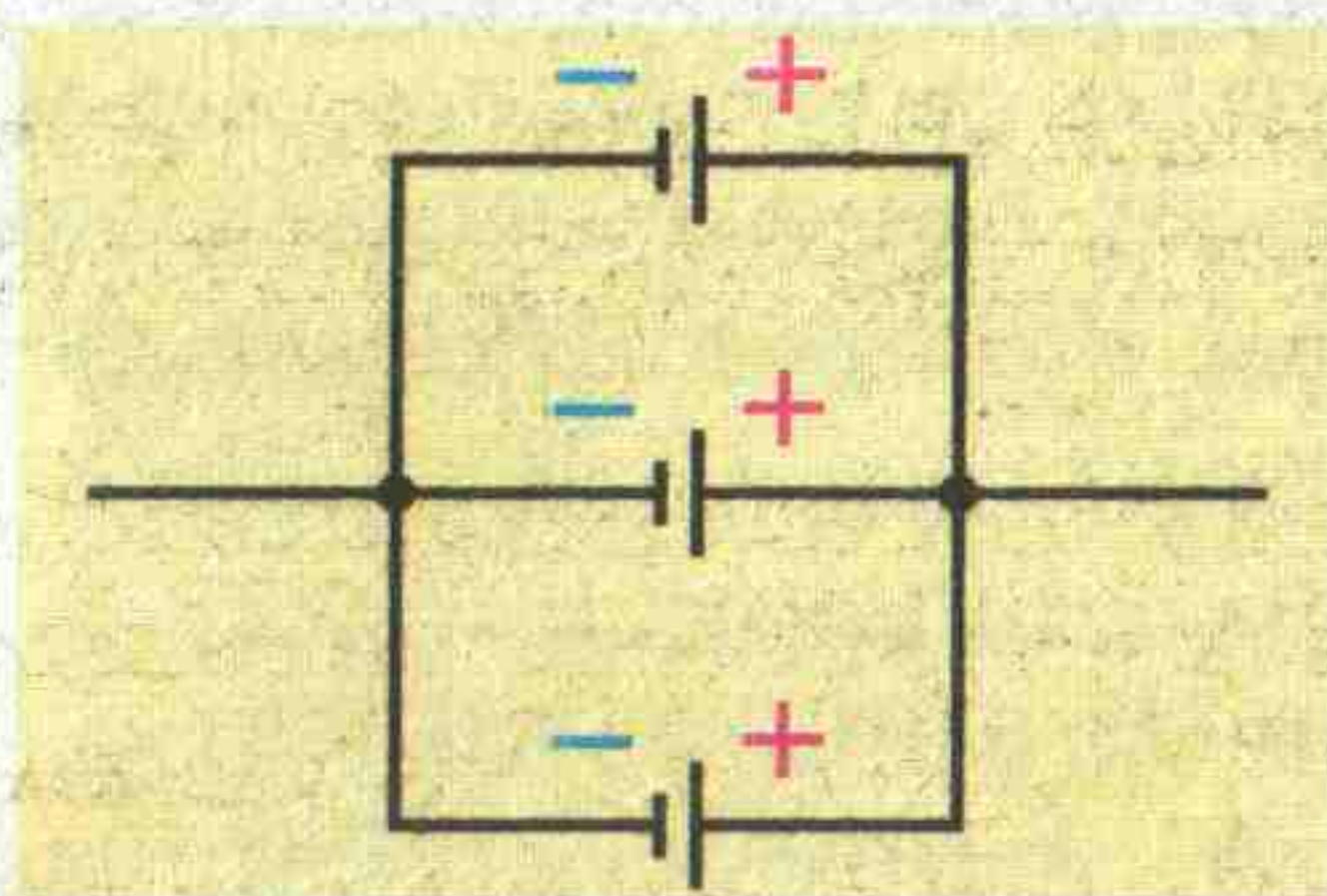


Рис. 1.53. Схема параллельного соединения источников тока

Последовательное соединение источников тока удобно в том случае, когда сопротивление потребителя значительно больше внутреннего сопротивления одного источника тока.

Параллельным является соединение, при котором все одноименные полюса соединяются в один узел (рис. 1.53).

Параллельное соединение применяют тогда, когда в цепи необходимо получить большое значение силы тока при небольшом напряжении.

Электродвижущая сила батареи параллельно соединенных одинаковых источников равна ЭДС одного источника:

$$\mathcal{E}_{\text{бат}} = \mathcal{E}.$$

Внутреннее сопротивление при параллельном соединении  $N$  одинаковых источников тока в  $N$  раз меньше внутреннего сопротивления одного источника:

$$r_{\text{бат}} = \frac{r}{N}.$$

Формула закона Ома для параллельного соединения источников имеет вид:

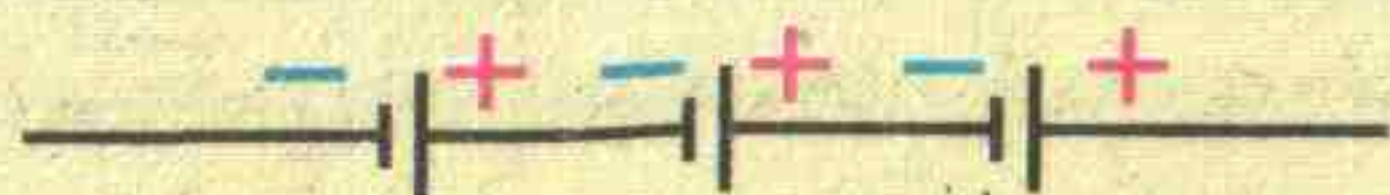


Рис. 1.52. Схема последовательного соединения источников тока



$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{r}{N}}$$

Параллельное соединения удобно тогда, когда сопротивление внешней части цепи значительно меньше внутреннего сопротивления одного источника.

При смешанном соединении батареи источников тока (параллельно или последовательно) в свою очередь соединяют последовательно или параллельно (рис. 1.54).

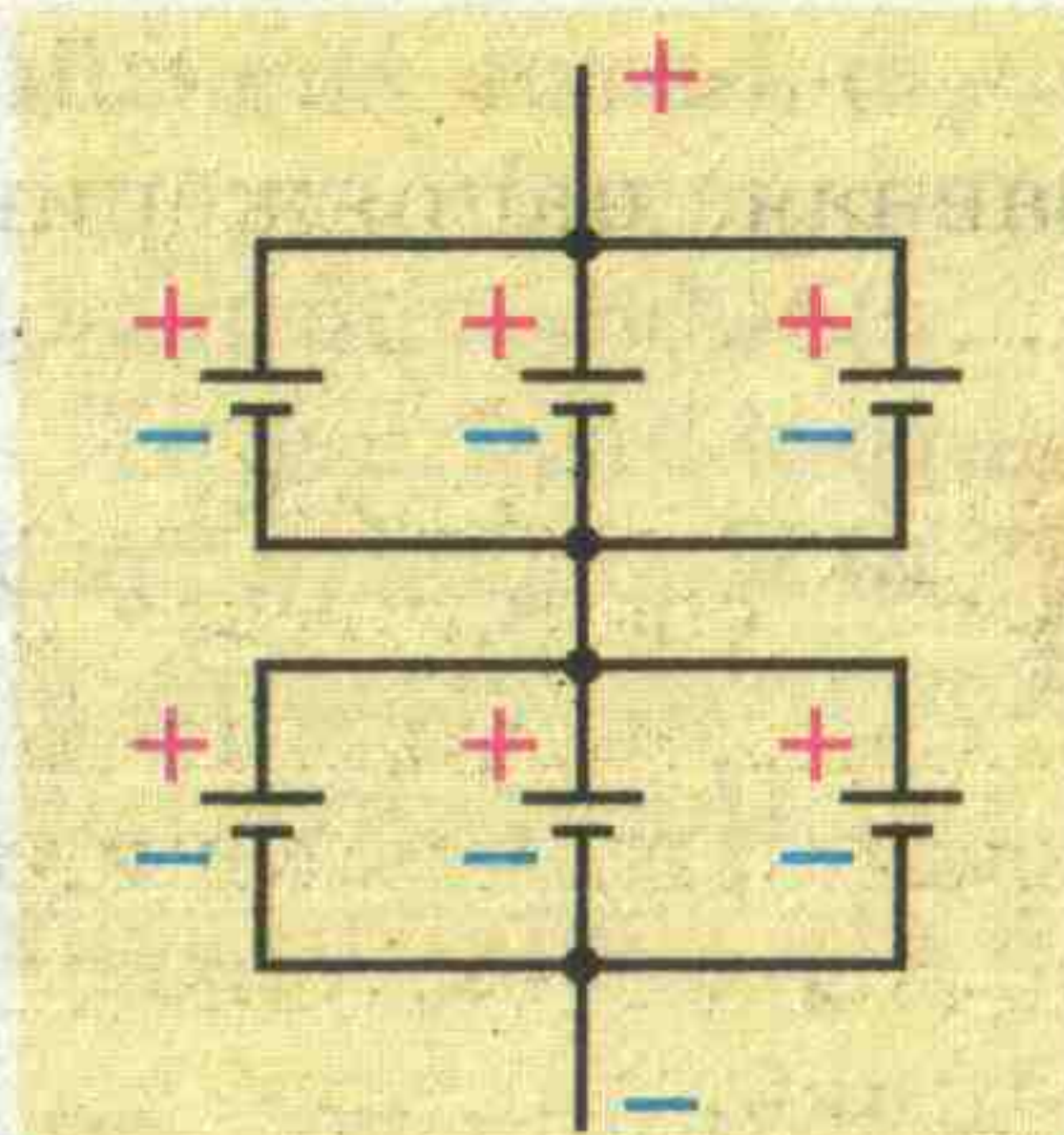


Рис. 1.54. Смешанное соединение источников тока

1. Связь между какими величинами отображает закон Ома для полной цепи?
2. Какова природа внутреннего сопротивления источника тока?
3. С какой целью источники тока соединяют последовательно?
4. С какой целью источники тока соединяют параллельно?
5. Как рассчитать ток короткого замыкания?
6. Чему равно напряжение на полюсах источника тока при разомкнутой цепи?



55

## Упражнение 10

1. В замкнутой цепи с источником тока с ЭДС 12 В проходит ток 2 А. Напряжение на зажимах источника 10 В. Найти внутреннее сопротивление источника и сопротивление нагрузки.

2. При замыкании источника тока проводником с сопротивлением 10 Ом сила тока в цепи равна 1 А, а при замыкании проводником с сопротивлением 4 Ом сила тока – 2 А. Найти ЭДС источника тока и его внутреннее сопротивление.

3. В электрической цепи, состоящей из источника тока с ЭДС 6 В и проводника с сопротивлением 9 Ом, сила тока равна 0,6 А. Найти внутреннее сопротивление источника и ток короткого замыкания для него.

4. В электрической цепи (рис. 1.55) включен источник тока с ЭДС = 2 В и внутренним сопротивлением 2 Ом, а также реостат с максимальным сопротивлением 8 Ом.

а) Какую максимальную силу тока может показать амперметр в этой цепи?

б) Какую минимальную силу тока может показать амперметр в этой цепи?

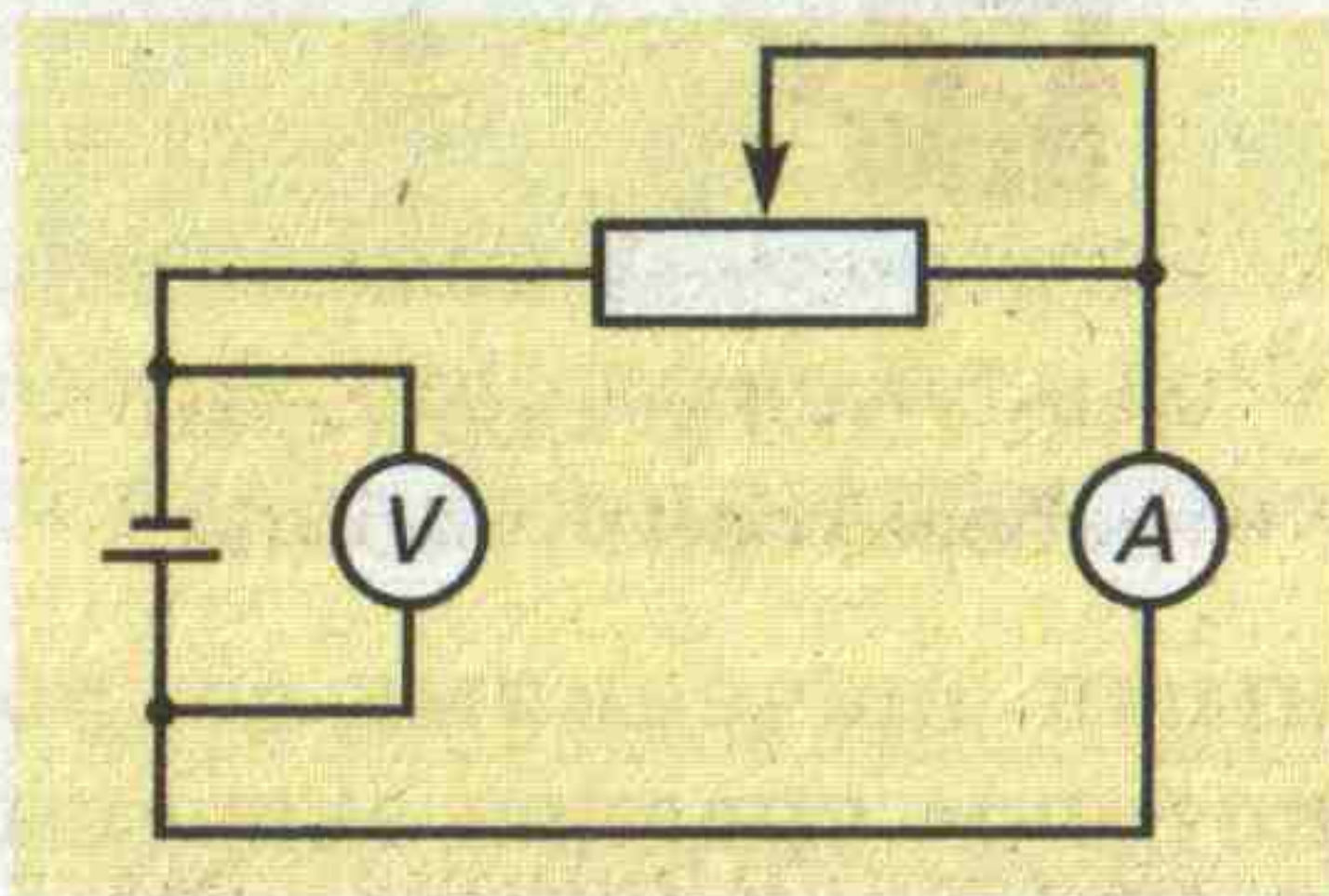


Рис. 1.55. К задаче 4



в) Какое максимальное напряжение покажет вольтметр в этой цепи?

г) Какое минимальное значение напряжения покажет вольтметр в этой цепи?

д) Постройте график зависимости силы тока в этой цепи от сопротивления ее внешнего участка.

е) Постройте график зависимости напряжения на реостате от его сопротивления.

### Лабораторная работа № 1

#### Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока

**Цель.** Закрепить знания о законе Ома для полной цепи; овладеть методом определения ЭДС и внутреннего сопротивления источника через измерение напряжения и силы тока в цепи.

**Оборудование.** Лабораторный вольтметр, лабораторный амперметр, магазин сопротивлений, выключатель, лабораторный источник тока, проводники.

56

#### Теоретические сведения

Согласно закону Ома для полной цепи ЭДС равна сумме всех падений напряжения на внутренней и внешней части цепи:

$$\mathcal{E} = U_{\text{вн}} + U_{\text{внеш}}.$$

Если учесть закон Ома для участка цепи, то

$$U_{\text{внеш}} = IR, \text{ а } U_{\text{вн}} = Ir,$$

где  $r$  — внутреннее сопротивление источника тока. Таким образом,

$$\mathcal{E} = IR + Ir.$$

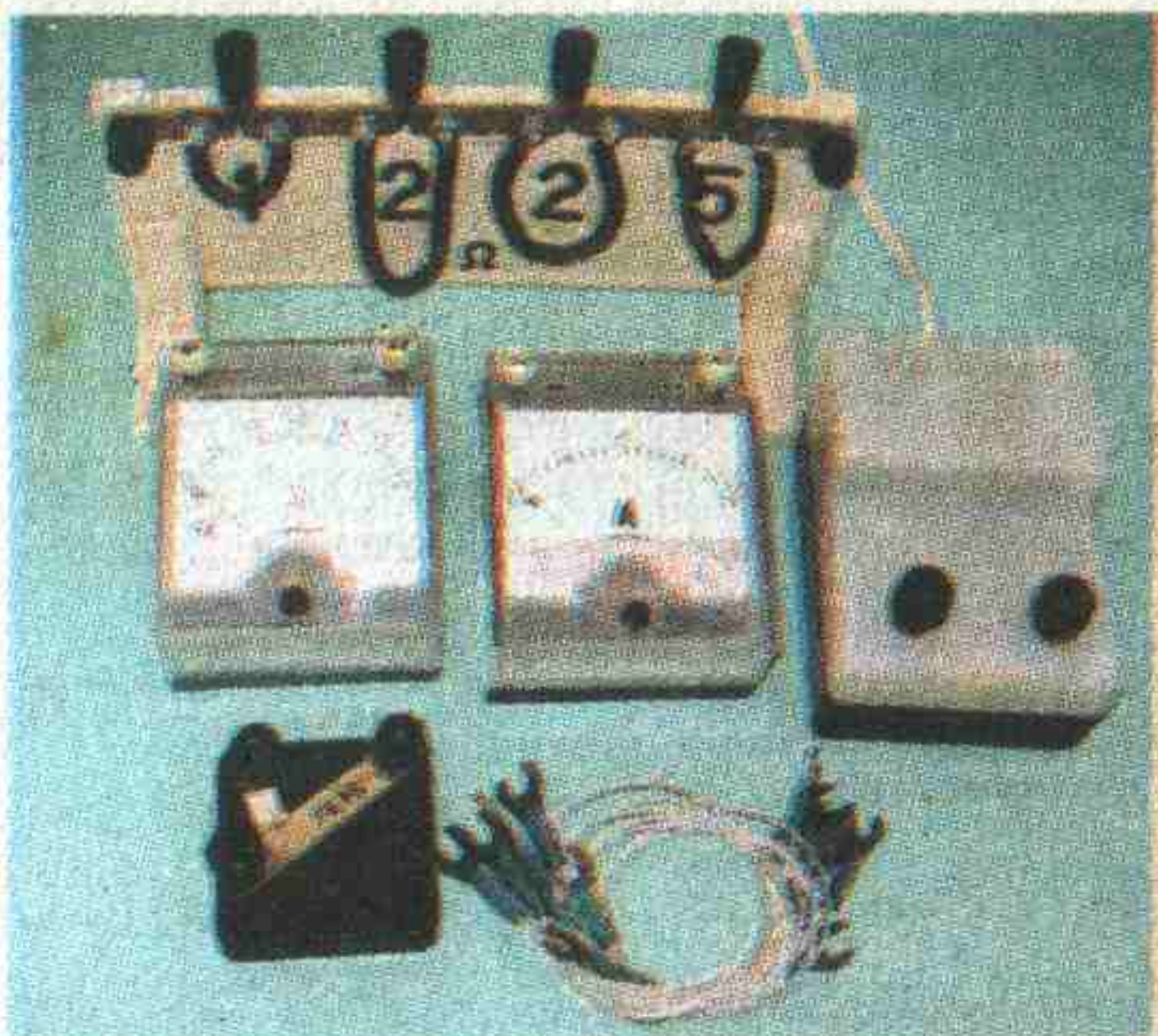


Рис. 1.56. Приборы для лабораторной работы

В этом уравнении две неизвестные величины, а чтобы их найти по правилам алгебры, необходимо иметь хотя бы два уравнения, в которые входят эти неизвестные величины.

Для составления таких уравнений проведем исследование электрической цепи в два этапа.

1) Составим электрическую цепь, в которую входят источник тока, амперметр, выключатель и реостат (магазин сопротивлений) с известными значениями сопротивлений (рис. 1. 56). Подберем некоторое среднее значение сопротивления  $R_1$  и замкнем цепь. Стрелка амперметра покажет некоторое значение силы тока  $I_1$ . Для этого случая



$$\mathcal{E} = I_1 R_1 + I_1 r. \quad (1)$$

2) Проведем опыт повторно, заменив резистор в магазине сопротивлений на иное значение  $R_2$ . Для этого случая

$$\mathcal{E} = I_2 R_2 + I_2 r. \quad (2)$$

Решив совместно уравнения (1) и (2), получим

$$r = \frac{I_1 R_1 - I_2 R_2}{I_2 - I_1}.$$

Подставив значение  $r$  в (1) или (2), получим значение ЭДС:

$$\mathcal{E} = I_1 R_1 + I_1 \frac{I_1 R_1 - I_2 R_2}{I_2 - I_1}, \quad (3)$$

или

$$\mathcal{E} = I_2 R_2 + I_2 \frac{I_1 R_1 - I_2 R_2}{I_2 - I_1}. \quad (4)$$

### Выполнение работы

1. Начертить схему цепи из последовательно соединенных источника тока, амперметра, магазина сопротивлений и выключателя.

2. По начерченной схеме составить цепь.

3. В магазине сопротивлений включить сопротивление 2 Ом.

4. Замкнуть цепь и снять показания амперметра  $I_1$ .

5. Сменить резистор в магазине на 5 Ом.

6. Замкнуть цепь и снять показания амперметра  $I_2$ .

7. Рассчитать ЭДС и внутреннее сопротивление.

8. Результаты измерений и расчетов записать в таблицу и провести анализ полученных результатов.

Таблица

№	Сила тока, А	Сопротивление внешней цепи, Ом	Внутреннее сопротивление источника, Ом	ЭДС, В	Напряжение на клеммах источника тока, В
1					
2					

9\*. По формулам (3) и (4) рассчитать ЭДС и сравнить полученные значения с показаниями вольтметра.

10\*. При разомкнутой цепи измерить напряжение на клеммах источника тока и сравнить его со значением измеренной ЭДС, сделать выводы.

**Дополнительное задание.** Провести еще несколько измерений для различных значений сопротивлений внешнего участка цепи. Построить график зависимости силы тока от его сопротивления.



## § 20. Правила безопасного пользования электрическими приборами

---

Жизнь современного человека сильно связана с использованием электрических приборов и установок. Тело человека является хорошим проводником электрического тока, который может вызвать в человеческом теле опасные и необратимые изменения. Человек, подвергшийся действию электрического тока, получает не только значительные ожоги, но и нарушения в работе нервной системы. Даже при сравнительно небольшом напряжении человек может получить серьезные поражения организма, если он находится, например, во влажном помещении, на влажной земле, касается проводов обеими руками и т. п.

Чтобы предотвратить поражение электрическим током, необходимо придерживаться определенных правил.

58

1. Не пользоваться неисправными электроприборами и оборудованием.

2. Не пользоваться электрическими приборами (утюги, фены, плойки, обогреватели) в ваннных комнатах и влажных помещениях.

3. Не играть под линиями электропередач.

4. Экспериментируя с электрическими установками, необходимо использовать источники тока с ЭДС не выше 36 В.

5. Выполняя лабораторные работы, включать электрические установки только после проверки и разрешения на то учителя.

6. Не касаться частей электроустановок с поврежденной изоляцией.

7. Если товарищ поражен электрическим током, то в первую очередь необходимо, придерживаясь правил безопасности, отсоединить его от источника тока, вызвать врача и по возможности оказать пострадавшему первую медицинскую помощь.

## § 21. Электрический ток в различных средах

---

Согласно определению электрический ток — это направленное движение заряженных частиц. Таким образом, создать электрический ток можно только в той среде, где есть свободные заряженные частицы — носители электрического заряда.



Создать поток таких частиц, которые будут двигаться в одном направлении, можно по-разному. Это может быть действие электрического поля, изменение магнитного поля, проявление инерции. В средах, где заряженные частицы связаны с молекулами или атомами и не могут свободно двигаться, электрический ток практически невозможен. Среда, в которой есть свободные заряженные частицы, в свое время называли проводниками – веществами, проводящими электрический ток.

### Электрический ток в металлах

Решающим в исследованиях природы электрического тока в металлах был опыт, осуществленный в 1916 г. американскими физиками Р. Толменом и Т. Стюартом. В опыте использовалась катушка с большим количеством витков медного провода, которая могла вращаться вокруг своей продольной оси. Выводы обмотки катушки через подвижные контакты соединялись с чувствительным гальванометром (рис. 1.57).

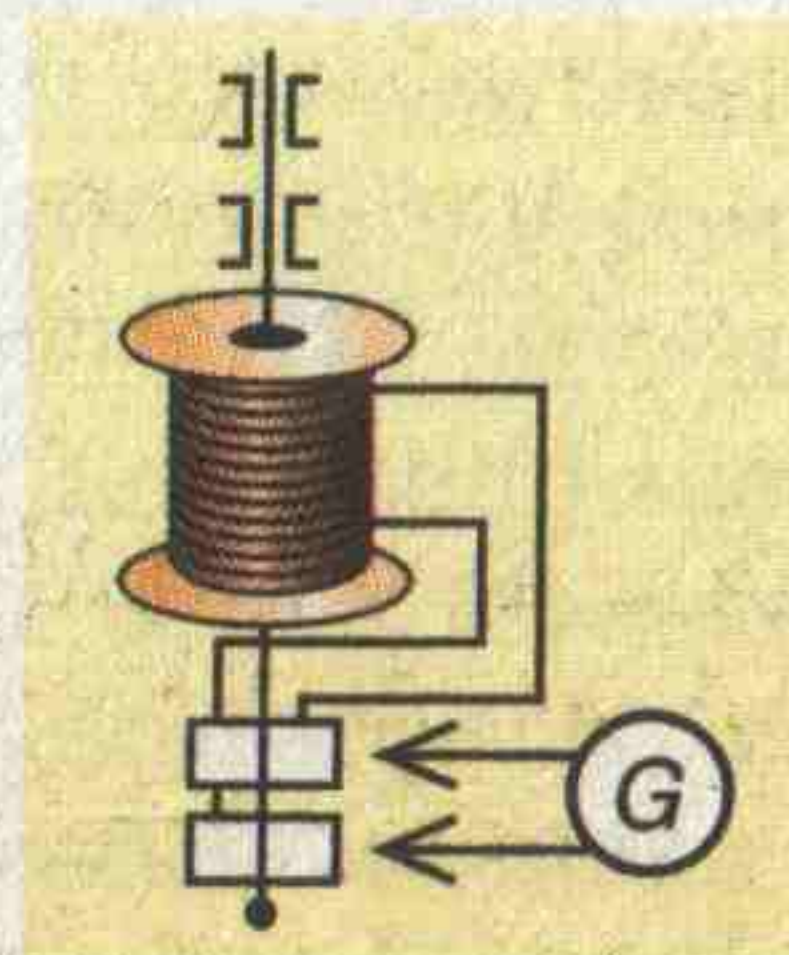


Рис. 1.57. Схема опыта Толмена и Стюарта

При быстром вращении катушки стрелка гальванометра была неподвижной. Но при резкой остановке катушки стрелка отклонялась от нулевого деления, фиксируя кратковременный ток в цепи. Тщательные расчеты показали, что частицами, образующими ток, были электроны. Получив большую скорость при вращении катушки, электроны некоторое время после остановки катушки продолжали двигаться по инерции, образуя ток. Поскольку полученный в опыте ток ничем не отличался от электрического тока в обычной цепи, то был сделан вывод об электронной природе электрического тока в металлах.

В кристаллической структуре металла электроны находятся в свободном состоянии, совершая только хаотическое тепловое движение. Если появляется электрическое поле, то электроны начинают смещаться в направлении силовых линий поля, создавая электрический ток (рис. 1.58).

При движении между узлами кристаллической решетки металла электроны взаимодействуют с ионами и отдают им часть энергии, полученной под действием электрического поля. Полученная ионами энергия увеличивает амплитуду их колебаний, что проявляется как тепловое действие электрического тока. Отдавая часть энергии

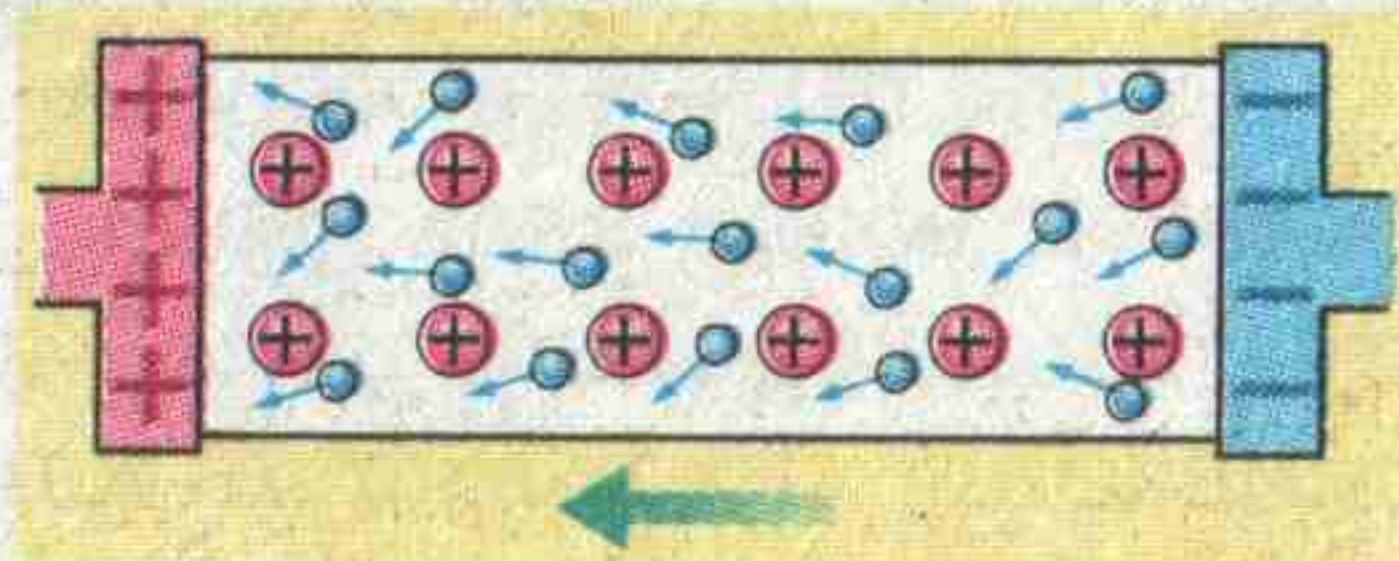


Рис. 1.58. Движение электронов в металле



ионам, электроны уменьшают скорость своего упорядоченного движения, что служит поводом утверждать, что существует сопротивление проводника. Если проводник нагревать от внешнего источника тепла, то увеличивается амплитуда тепловых колебаний ионов и степень их взаимодействия с электронами. Поэтому сопротивление металлического проводника при повышении температуры увеличивается. Типичным свойством металлических проводников является то, что в большом интервале температур изменение их сопротивления происходит пропорционально изменению температуры.

Исследованиями голландского физика Камерлинг-Онесса установлено, что сопротивление металлического проводника почти исчезает при температуре, близкой к абсолютному нулю. Исследуя зависимость электрических свойств ртути от температуры, он заметил, что при температуре 4,12 К ее сопротивление практически равно нулю. Состояние проводника, в котором он не имеет сопротивления, назвали *сверхпроводимостью*. Возбужденный в таком проводнике электрический ток может существовать довольно длительное время.

60



**В состоянии сверхпроводимости проводники практически полностью теряют электрическое сопротивление.**

Сверхпроводимость интересует ученых и инженеров, которые видят в ней средство для создания новых экономичных технологий. В первую очередь это касается передачи без потерь электроэнергии на большие расстояния, создания сверхмощных электромагнитов для научных исследований, разработки принципиально новых сверхмощных компьютерных систем и т. п.

### *Электрический ток в вакууме*

В вакууме, в котором практически отсутствуют свободные носители электрического заряда, создать электрический ток можно при условии искусственного введения их в ограниченное пространство, в котором существует электрическое поле. Свободные заряженные частицы в вакууме можно получить при нагревании металлических электродов (термоэлектронная эмиссия) или при облучении их электромагнитным излучением (фотоэлектронная эмиссия).

Свободные электроны, появляющиеся при эмиссии, накапливаются возле электрода, из которого они эмитировали, и образуют электронное облачко. Если температура электрода поддерживается постоянной или поток электромагнитного излучения не изменяется, то электроны находятся в динамическом равновесии, при котором количество электронов, вылетающих из электрода, равно количеству электродов, возвращающихся в него.



Если создать электрическое поле, присоединив, например, к электроду, из которого вылетают электроны, отрицательный полюс источника тока, а к другому электроду – положительный полюс, то электроны начнут двигаться упорядоченно.

**Ток в вакууме создают свободные электроны эмиссии.**



Этим потоком можно управлять с помощью электрического или магнитного полей, что ученые и использовали для создания вакуумных электронных приборов.

Например, при помощи электрического поля поток электронов в вакууме можно сформировать в узкий пучок, управляя которым можно создавать различные изображения на экране электронно-лучевой трубки или дисплея, которые применяются в электронных осциллографах или в некоторых моделях телевизоров (рис. 1.59).

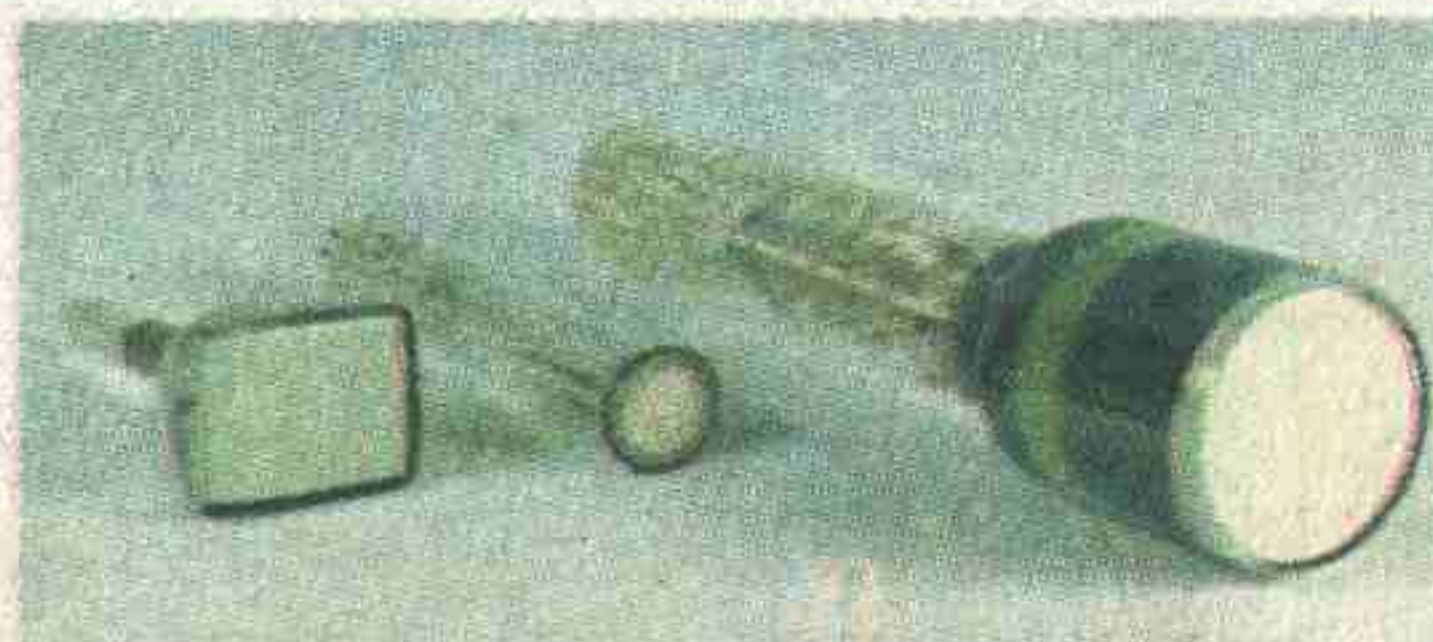


Рис. 1.59. Электронно-лучевая трубка

61

### *Электрический ток в жидкостях*

Если в стакан с дистиллированной водой опустить два электрода, входящих в электрическую цепь, то тока в цепи не будет. Аналогичный результат получим, если электроды опустим в керосин, спирт или другую чистую жидкость. Это свидетельствует о том, что в таких жидкостях отсутствуют свободные носители электрического заряда и они тока не проводят.

Если повторить опыт с водой, влив в нее небольшое количество серной кислоты, то полученный раствор будет иметь свойства проводника (рис. 1.60).

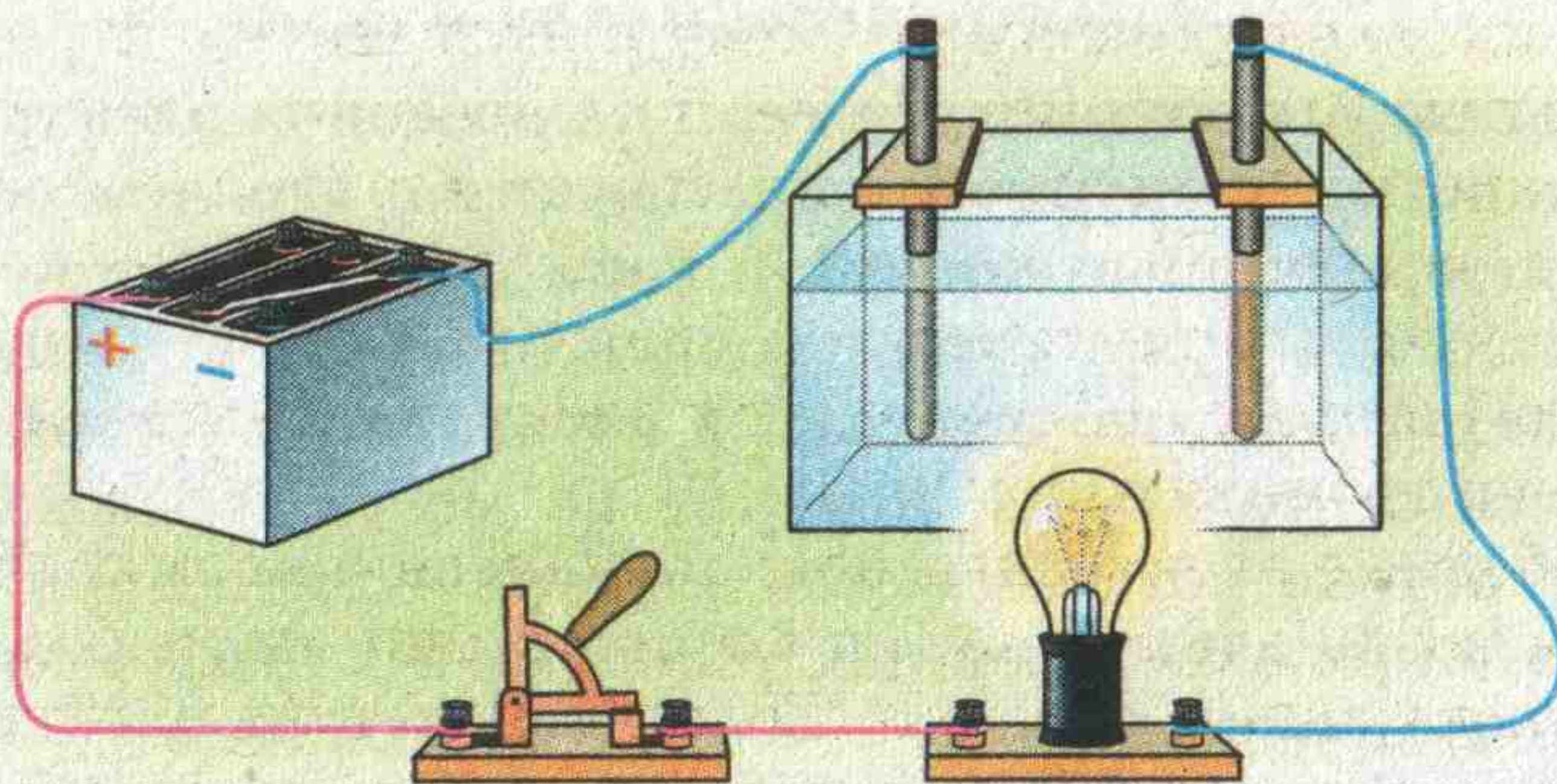


Рис. 1.60. Исследование электрического тока в растворе электролита в воде





**В растворах и расплавах электролитов ток образуют положительные и отрицательные ионы.**

Какова же природа свободных носителей заряда в растворе кислоты? На уроках химии вы узнали, что при растворении в воде кислот, щелочей или солей (электролитов) происходит электролитическая диссоциация. Сложные молекулы электро-

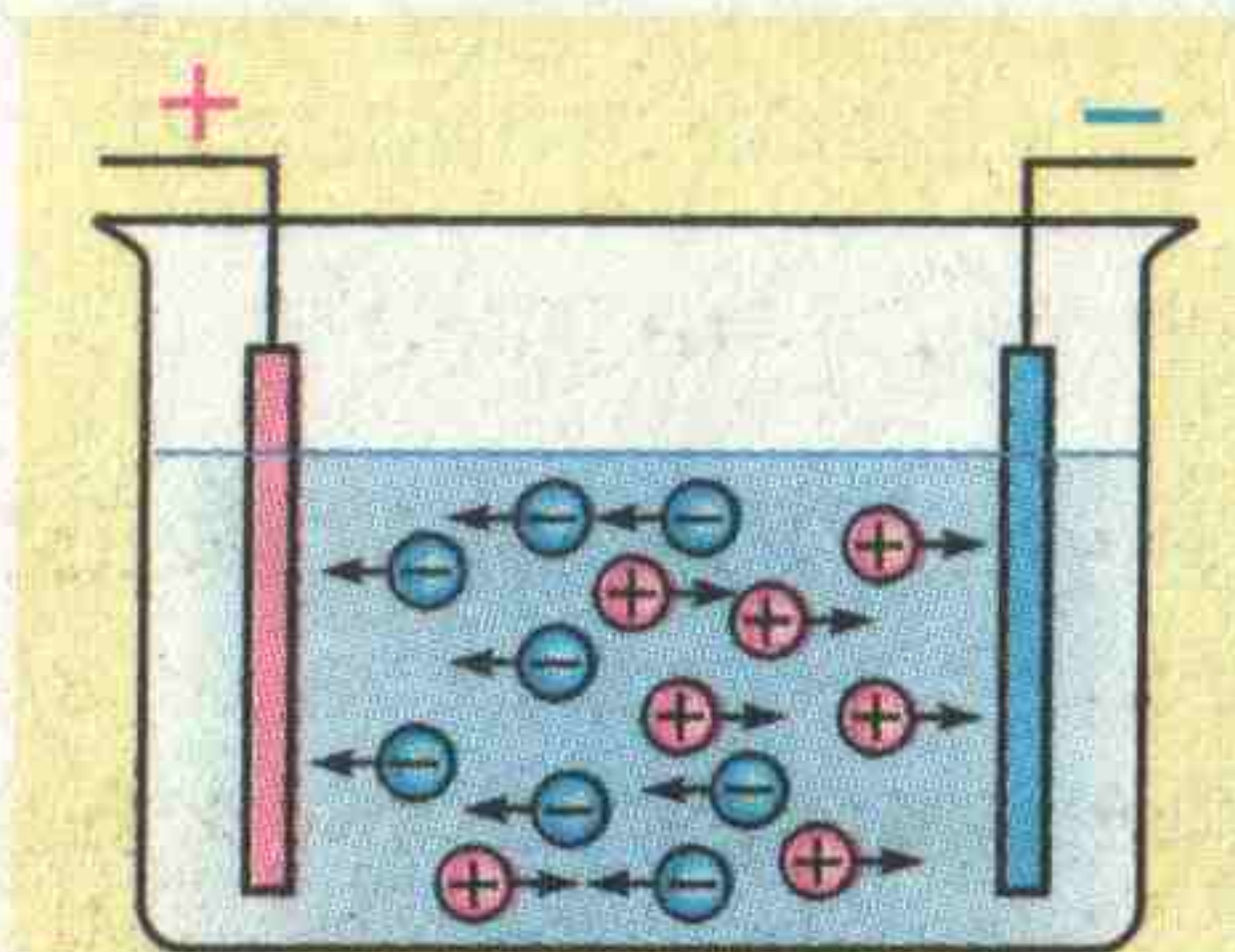


Рис. 1.61. Схема движения ионов в растворе электролита под действием электрического поля

лита распадаются на положительные и отрицательные ионы, которые при наличии электрического поля будут двигаться вдоль линий напряженности этого поля (рис. 1.61).

Положительные ионы (катионы) будут двигаться к отрицательному электроду, а отрицательные (анионы) — к положительному. Т. е. в растворе электролита будет возникать электрический ток. На электродах ионы нейтрализуются и оседают в виде нейтральных атомов или молекул.

62



**Ток в растворах и расплавах электролитов сопровождается выделением вещества на электродах.**

Таким образом, при прохождении тока в растворах электролитов происходит выделение вещества на электродах. Это явление используется для рафинирования металлов, добывания алюминия, покрытия поверхности деталей машин защитными материалами, изготовления копий деталей сложной формы и т. п.

### *Электрический ток в газах*

В обычном состоянии все газы являются диэлектриками (непроводниками электричества). Известно, что при размыкании электродов выключателя ток в цепи прекращается, хотя между контактами будет существовать разность потенциалов. Это объясняется тем, что все газы в нормальном состоянии имеют нейтральные молекулы, которые не могут образовать направленного потока под действием электрического поля. Но несмотря на это при определенных условиях и в газах может возникнуть электрический ток.

Например, если взять две металлические пластины, между которыми находится воздух, и присоединить их через гальванометр к источнику тока (рис. 1.62), то при обычных условиях тока в цепи не будет, поскольку воздух не проводит электричество.



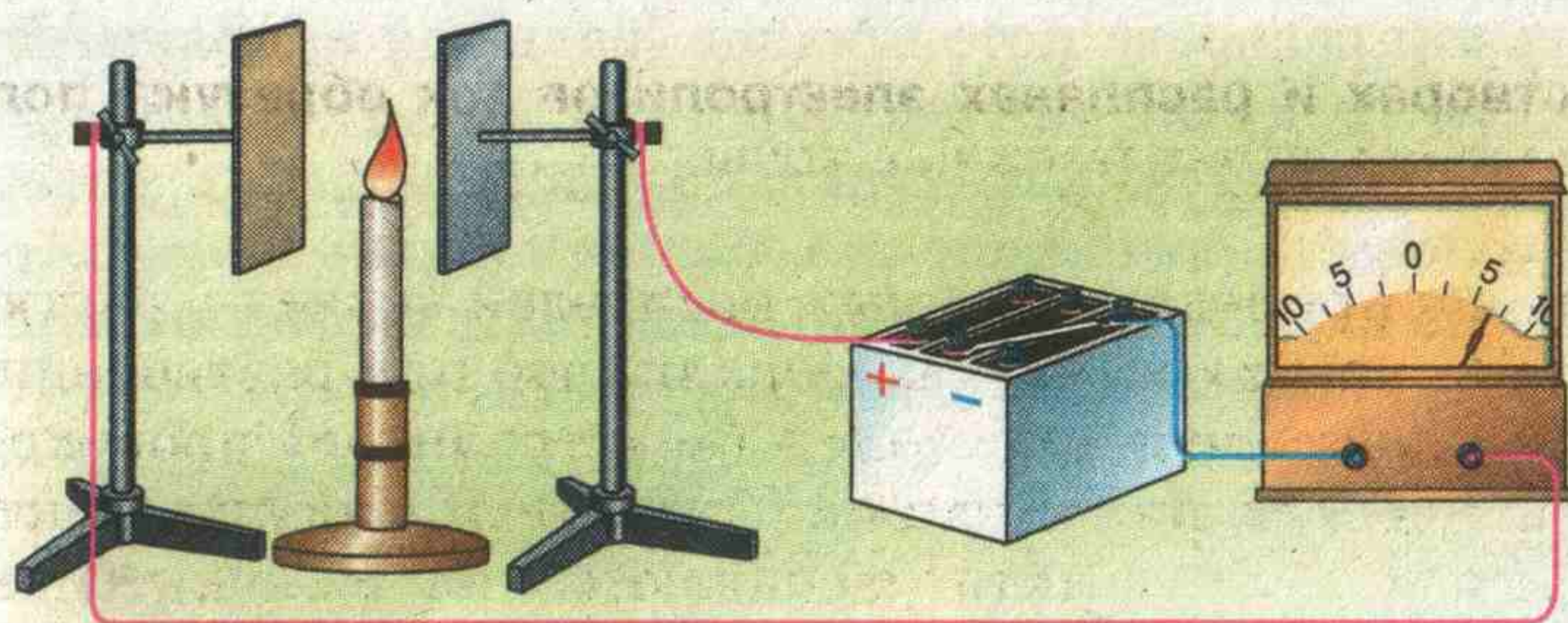


Рис. 1.62. Установка для исследования электропроводности воздуха

Если же в промежуток между пластинами внести пламя спиртовки, то стрелка гальванометра покажет наличие тока в цепи (рис. 1.62). Об этом явлении в физике принято говорить как о несамостоятельном разряде в газе. Несамостоятельный разряд будем наблюдать и тогда, когда спиртовку заменим специальной лампой – источником ультрафиолетового излучения. Образование электрического тока в газах объясняется тем, что под действием пламени или электромагнитного излучения происходит ионизация, вследствие чего появляются свободные электроны. Соединяясь с нейтральными молекулами, они могут образовывать отрицательные ионы. Таким образом, в пространстве между пластинами в нашем опыте кроме электронов находятся также нейтральные молекулы, положительные и отрицательные ионы.

**Электрический ток в газах – это поток отрицательных и положительных ионов и свободных электронов.**



Под действием электрического поля заряженные частицы начинают упорядоченно двигаться, образуя электрический ток. Он прекратится, если убрать ионизатор.

Если напряжение между электродами постепенно увеличивать, то в определенный момент энергия носителей зарядов становится достаточной, чтобы, сталкиваясь с нейтральными молекулами, образовывать новые ионы и свободные электроны. Процесс приобретает лавинообразный характер, когда количество свободных носителей заряда резко увеличивается. В этот момент в цепи резко увеличивается сила тока, а также температура газа, и он начинает излучать свет.

Электрический разряд в газе возможен и без наличия ионизатора. Ведь в воздухе всегда находятся заряженные частицы, образующиеся под действием космического и радиоактивного излучения, ультрафиолетового излучения Солнца и т. п. При



значительной разности потенциалов (большая напряженность электрического поля) они приобретают большую скорость и энергию, достаточную для ионизации нейтральных молекул. В таких условиях возникает *самостоятельный разряд*.

В природе самостоятельными разрядами являются молния (рис. 1.63), коронный и тлеющий разряды.



Рис. 1.63. Молния

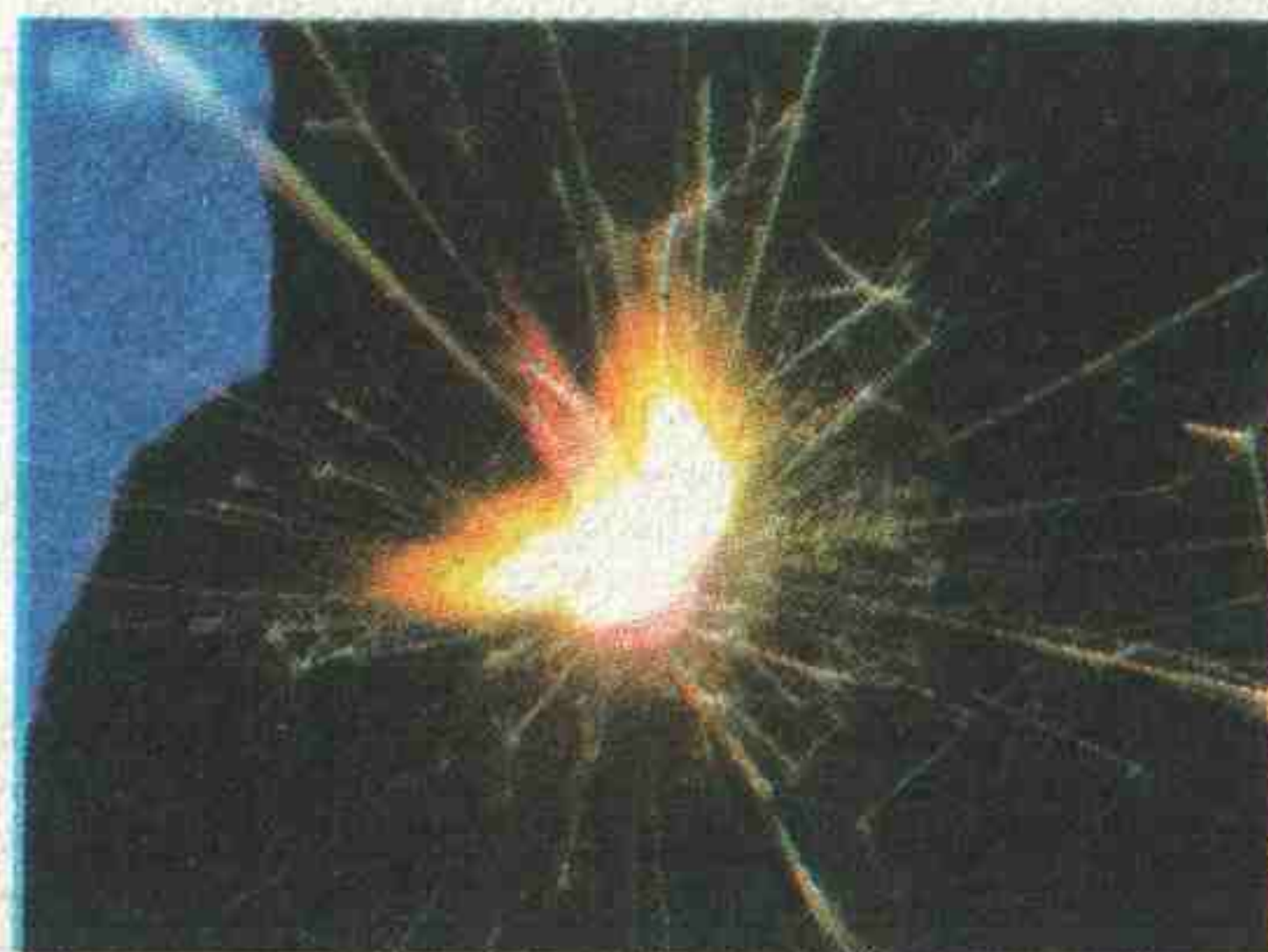


Рис. 1.64. Сварка металла при помощи электрической дуги

64

Среди различных видов электрического разряда особое место занимает электрическая дуга, которую применяют для сварки металлических изделий (рис. 1.64).

Если два проводника, соединенных с источником тока, свести вместе, то в месте их касания начнет выделяться значительное количество теплоты при резком увеличении температуры. Это приведет к появлению в газе значительного количества свободных электронов, которые будут поддерживать ток в цепи. При силе тока в несколько сотен и даже тысяч ампер температура в дуге может достигать 3500...7000 К. В таком состоянии газ ярко светится, а электроды – плавятся.

Электрическая дуга широко применяется во многих областях техники и производства для сварки (соединения) металлических деталей, для плавки чистых металлов. Всему миру известны достижения ученых Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. Благодаря их исследованиям процесс электросварки применяется в различных производствах, включительно с космической отраслью.



**Евгений Оскарович Патон (1870–1953)** – украинский инженер, основатель Института электросварки НАН Украины, провел исследования в области расчета и прочности сварных конструкций, механизации сварочных процессов, научных основ электрической сварки.



1. С какой целью был проведен опыт Толмена-Стюарта?
2. Какова природа тока в металлах?
3. Почему сопротивление металлических проводников линейно зависит от температуры?
4. Какова природа электрического тока в вакууме?
5. Какова природа электрического тока в растворах электролитов?
6. Какие виды разрядов в газах и какова их природа?
7. С какой целью применяют электрическую дугу?

## § 22. Полупроводники. Собственная и примесная проводимость полупроводников

При изучении электрических свойств вещества учеными было замечено, что не все вещества одинаково проводят электричество: одни — хорошо, за что получили название *проводников*, другие — почти не проводят, поэтому их называли *диэлектриками*, или *изоляторами*.

Позднее оказалось, что существуют вещества, которые нельзя отнести ни к проводникам, ни к диэлектрикам. Эту группу веществ называли *полупроводниками*. Этот класс веществ имеет чрезвычайно интересные и полезные для науки и техники свойства. Это послужило причиной начала широкого их исследования, а позднее и применения.

Главным признаком диэлектриков является зависимость их проводимости от температуры. Так, если взять металлический проводник и нагревать его, то сопротивление такого проводника будет увеличиваться (рис. 1.65-а).

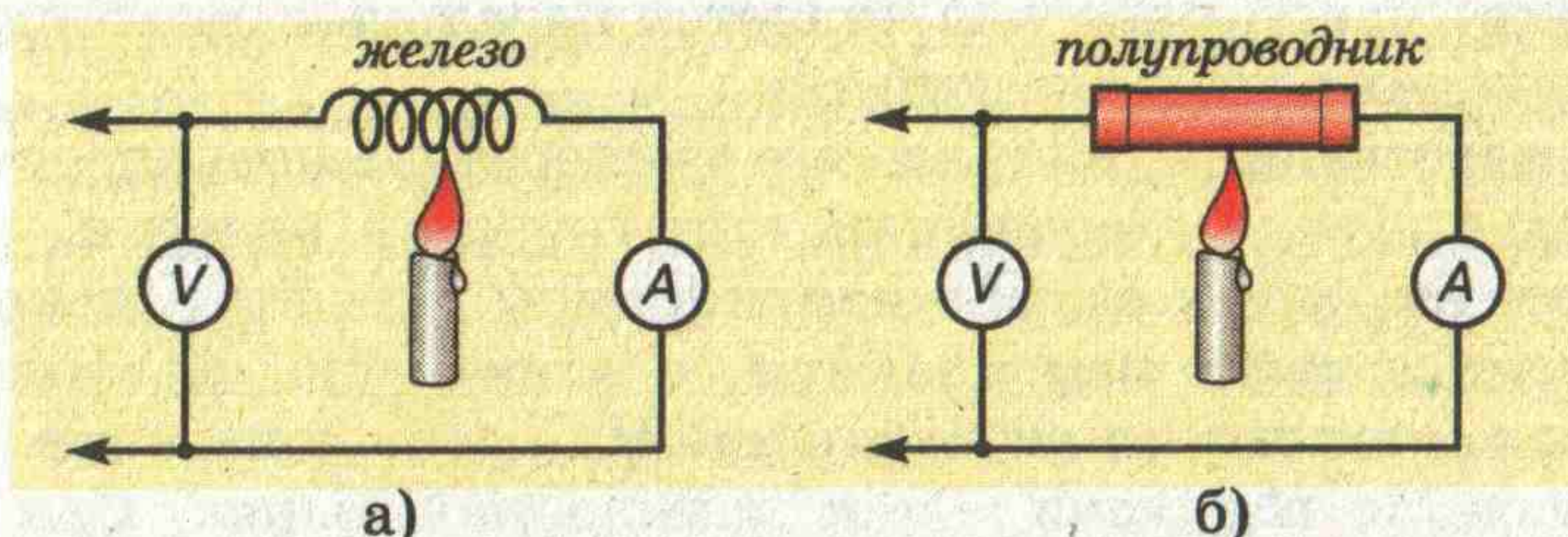


Рис. 1.65. Сравнение зависимости сопротивления разных веществ от температуры

Если же взять полупроводник и включить его в электрическую цепь, то приборы покажут уменьшение его сопротивления при нагревании (рис. 1.65-б).

При охлаждении же металлического проводника его сопротивление уменьшается, а в полупроводнике — увеличивается.



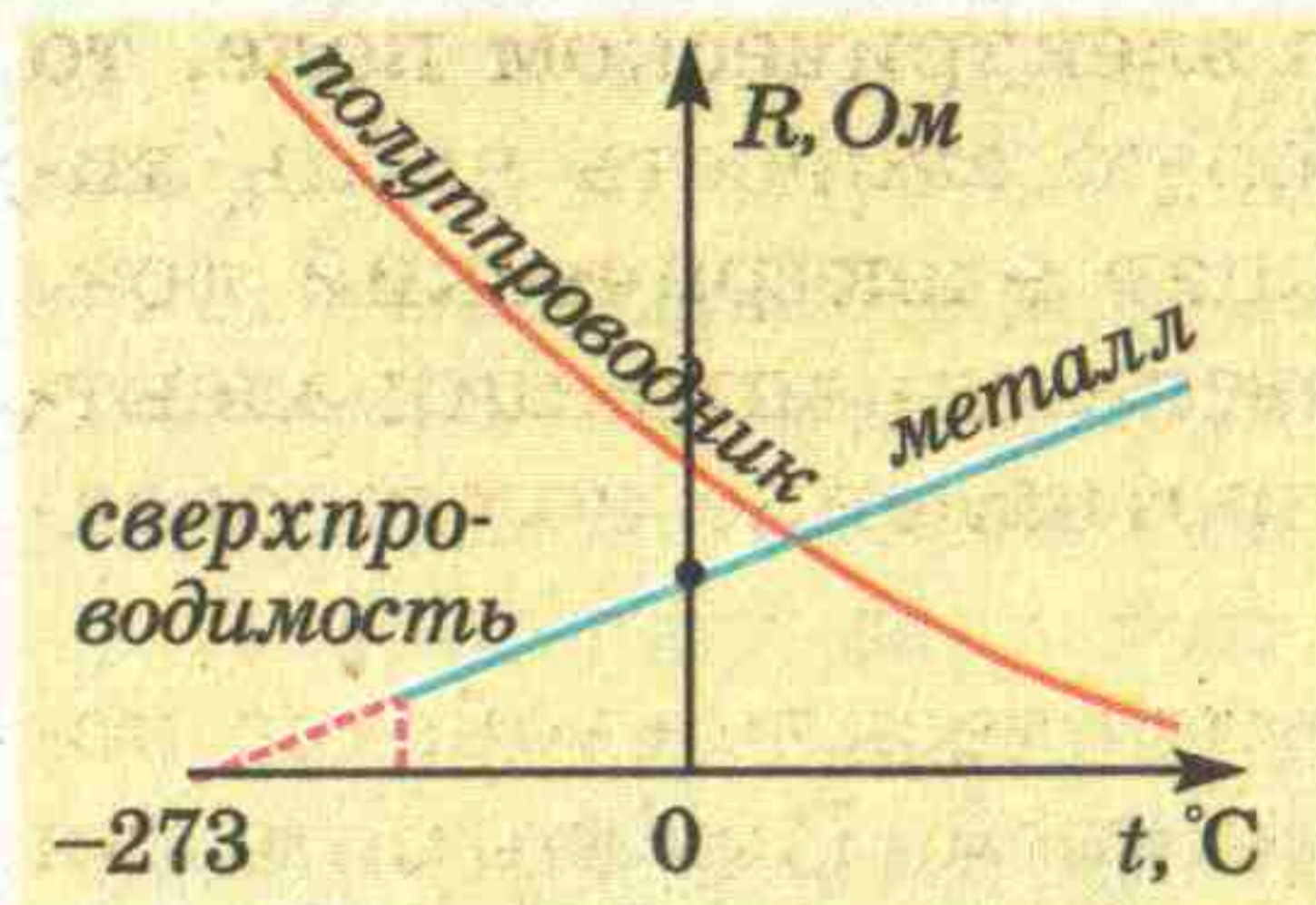


Рис. 1.66. Графики зависимости сопротивлений металлов и полупроводников от температуры

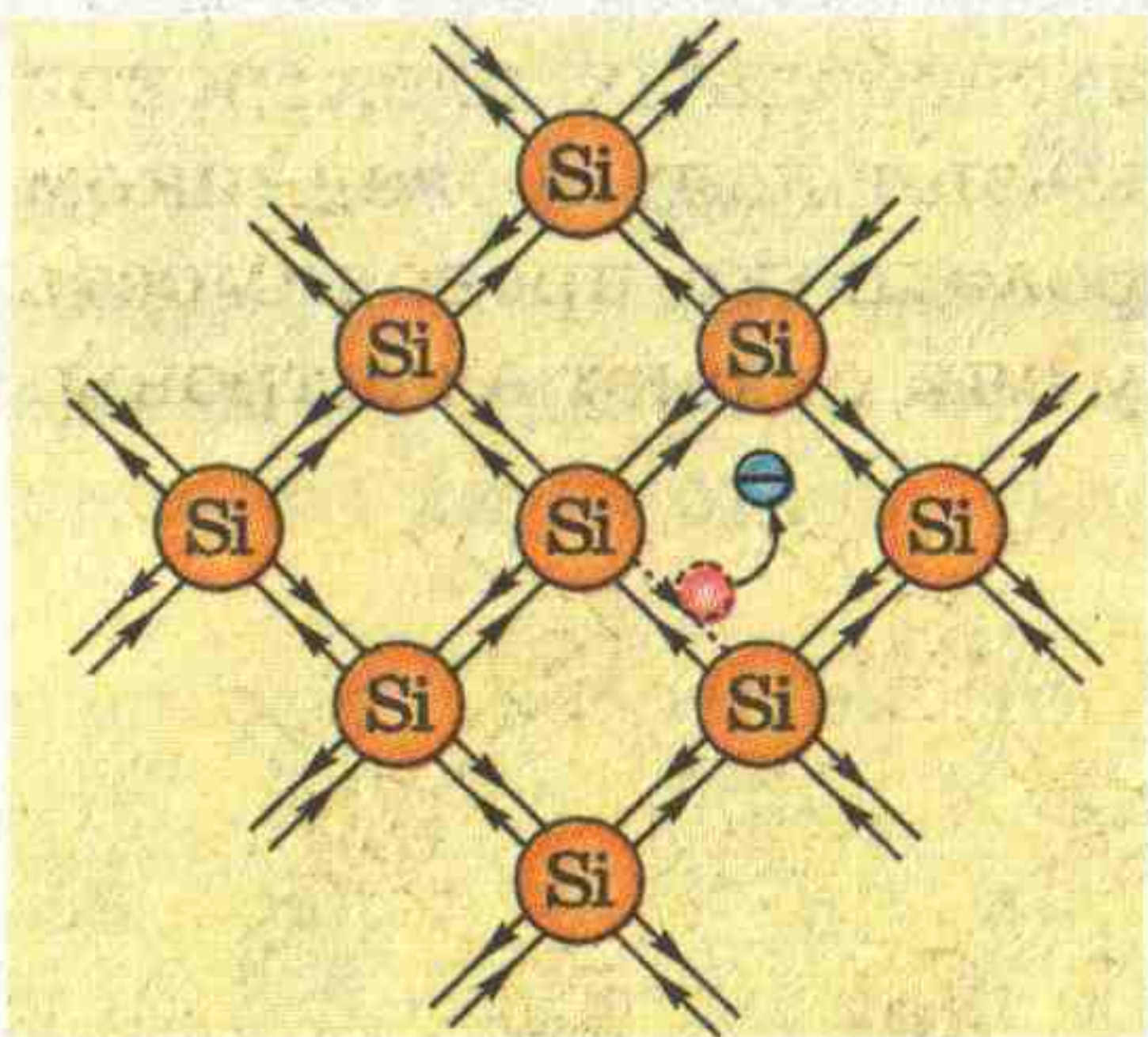


Рис. 1.67. Структура кристаллической решетки кремния

Графически рассмотренные зависимости показаны обобщенными графиками на рисунке 1.66.

Как пример рассмотрим кристаллическую структуру типичного полупроводника — кремния (Si) (рис. 1.67).

На внешней оболочке каждого атома Силиция находится 4 валентных электрона. Для заполнения внешней оболочки необходимо еще 4 электрона. Поэтому при образовании кристалла каждый атом получает от каждого «соседа» по одному валентному электрону, которые становятся общими для каждой пары атомов. В свою очередь данный атом совершает обмен «своими» электронами с соседними атомами. Таким образом, внешняя электронная оболочка становится заполненной, а между атомами устанавливаются ковалентные связи. На рисунке изображена плоская схема таких связей.

При небольших температурах, близких к абсолютному нулю, в опи-

санном выше идеальном кристалле, который состоит из одинаковых атомов, нет дефектов кристаллической решетки, свободные носители заряда отсутствуют. Все электроны связаны с атомами. Такой кристалл является идеальным диэлектриком и не проводит электрический ток.

При нагревании кристалла его температура повышается, что свидетельствует о повышении кинетической энергии колебательного движения атомов в кристалле. При этом некоторые ковалентные связи нарушаются, а электроны, входившие в эти связи, становятся свободными. На месте ковалентной связи образуется вакансия — так называемая дырка. Сам атом, потерявший электрон, становится положительным ионом. Такое состояние длится некоторое время, по истечении которого вследствие теплового движения свободных электронов дырка заполняется свободным электроном. Но в это время разрываются другие связи, что приводит к динамическому равновесию между дырками и электронами, при котором концентрация электронов и дырок будет постоянной.



Если полупроводник расположить в электрическом поле, то электроны и дырки приобретут некоторую скорость вдоль линий поля и в полупроводнике возникнет электрический ток. Поскольку при нагревании увеличивается концентрация электронов и дырок, то при нагревании сопротивление полупроводника уменьшается.

Исследования показали, что на электрические свойства полупроводников существенно влияют примеси. Рассмотрим для примера кристалл кремния, в котором находится некоторое количество фосфора. Пятивалентный атом Фосфора занимает место атома Силиция, а его электроны входят в ковалентные связи с соседними атомами Силиция (рис. 1.68). При этом один электрон становится свободным. В таком случае в полупроводнике концентрация свободных электронов увеличивается. Так как в нем концентрация свободных электронов выше концентрации дырок, то его называют полупроводником *n*-типа. Примеси, создающие в полупроводнике проводимость *n*-типа, называют *донорами*, поскольку они отдают электроны.

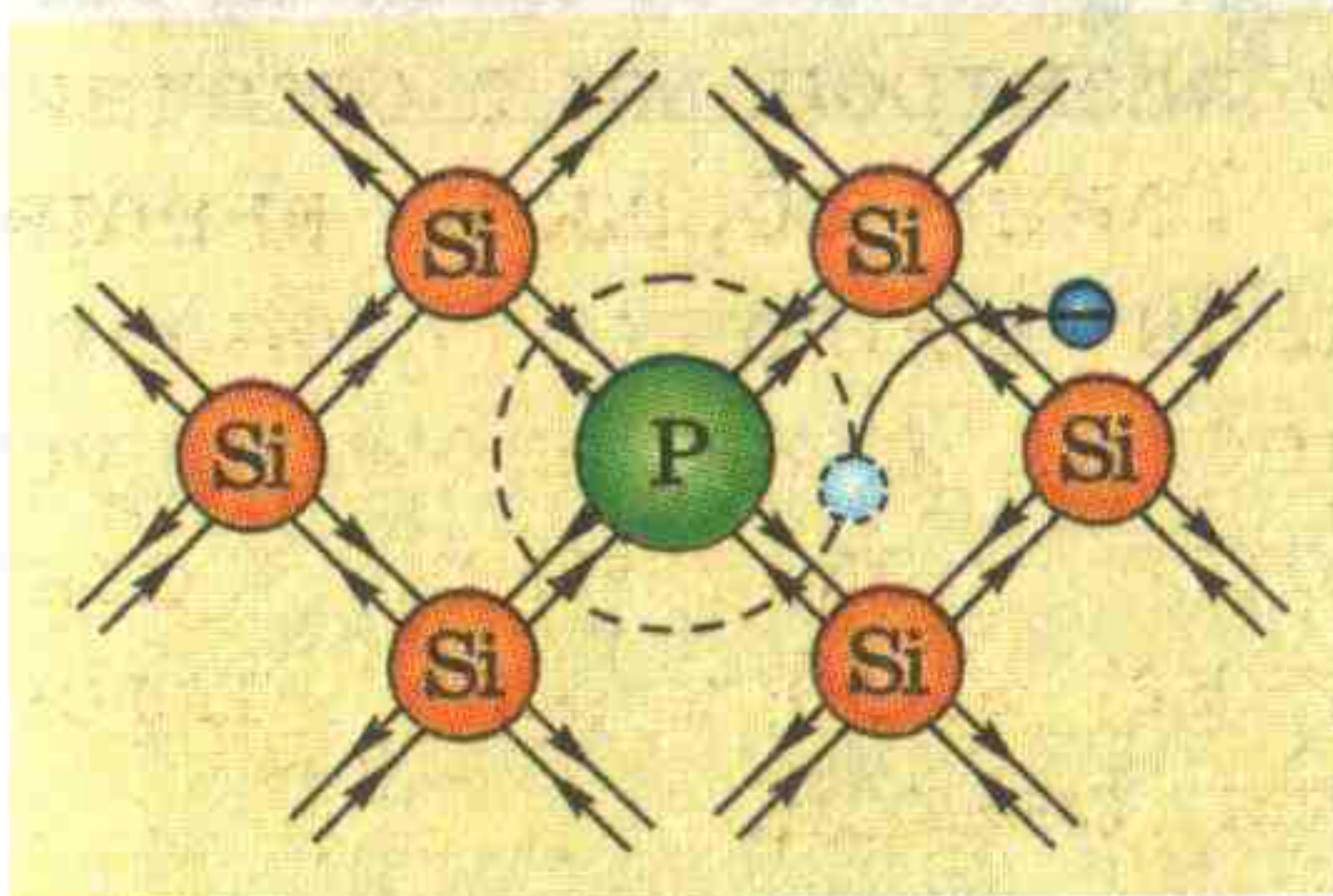


Рис 1.68. Атом Фосфора в кристалле кремния

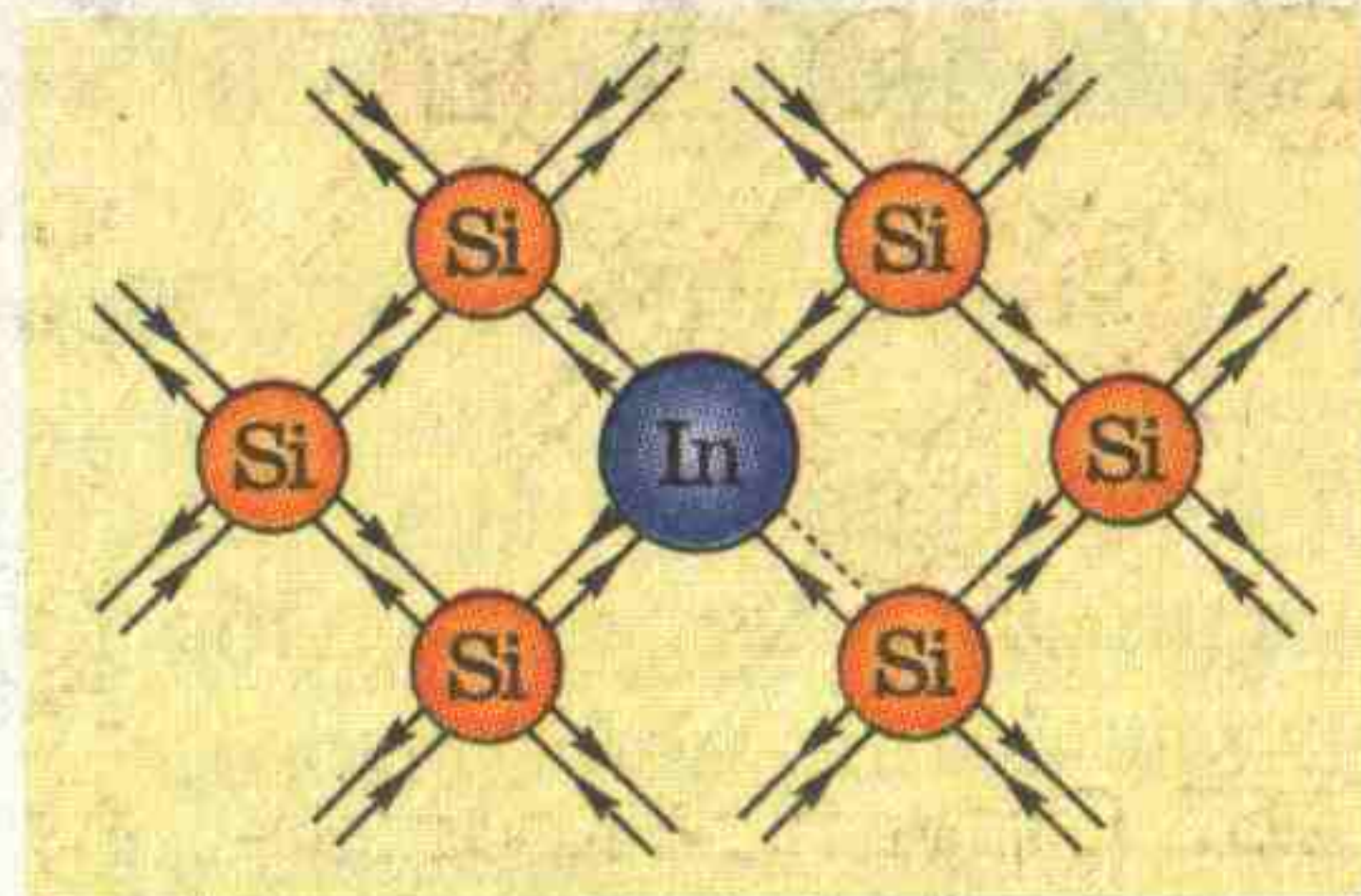


Рис. 1.69. Атом Индия в кристалле кремния

Если кристалл кремния содержит некоторое количество трехвалентного элемента, например Индия, то образуется полупроводник *p*-типа (рис. 1.69). Трехвалентный Индий имеет три валентных электрона, которые входят в полные ковалентные связи только с тремя соседними атомами Силиция. Одна связь остается незаполненной, что эквивалентно образованию положительного иона. В этом случае концентрация электронов будет меньше, чем положительных дырок. Примеси, которые образуют полупроводник *p*-типа, называют *акцепторами*.

1. Каковы свойства полупроводников?
2. Как зависит сопротивление полупроводника от температуры?
3. Чем отличается полупроводник от металла?
4. Какова природа проводимости полупроводника с собственной проводимостью?
5. Какая проводимость у полупроводника с донорными примесями?
6. Какая проводимость у полупроводника с акцепторными примесями?



## § 23. Полупроводниковый диод. Применение полупроводниковых приборов

Исследование свойств полупроводников различных типов создало условия для создания полупроводниковых приборов — устройств, специфические свойства которых являются следствием применения в них полупроводниковых материалов. Наиболее распространенным полупроводниковым прибором является полупроводниковый диод. Принцип его действия основан на свойствах  $p$ - $n$ -перехода, который образуется при сплавлении полупроводников  $p$ - и  $n$ -типа (рис 1.70).

68

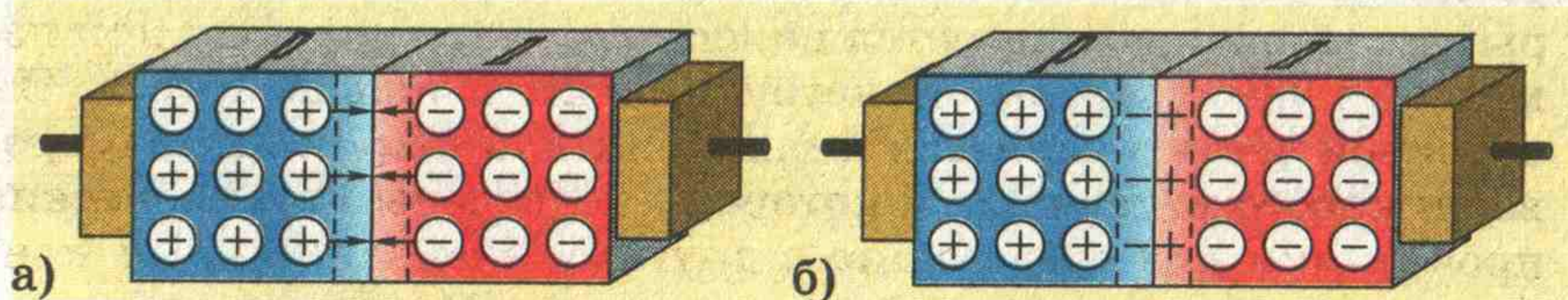


Рис. 1.70. Образование  $p$ - $n$ -перехода

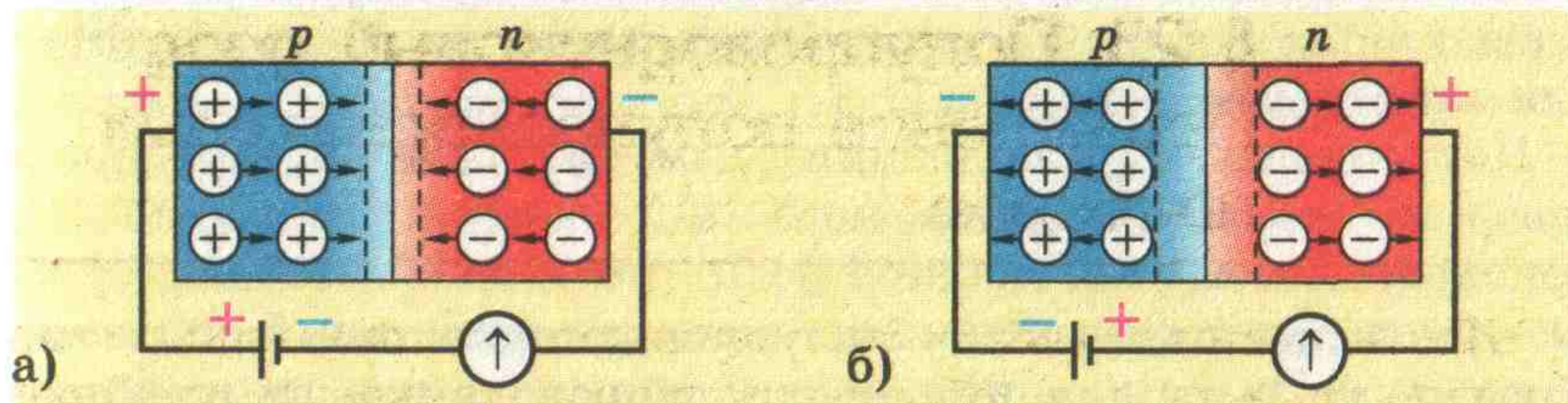
В  $p$ -зоне основными носителями заряда являются дырки, а в  $n$ -зоне — электроны. Обе части до образования контакта между ними были нейтральными. При сваривании обеих полупроводников часть электронов вследствие диффузии из  $n$ -зоны перейдет в  $p$ -зону, где есть дырки, и часть из них нейтрализуются вблизи контакта. Дырки в свою очередь диффундируют в  $n$ -зону, где будут рекомбинировать со свободными электронами. Таким образом, концентрация свободных электронов и дырок в месте контакта существенно уменьшится, что приведет к увеличению его сопротивления.

Если полупроводник с  $p$ - $n$ -переходом включить в электрическую цепь так, как показано на рисунке 1.71-а, то под действием электрического поля носители заряда будут двигаться из обеих частей до  $p$ - $n$ -перехода и концентрация их в месте контакта будет увеличиваться, что существенно уменьшит сопротивление перехода.

Если изменить полярность подключения источника тока (рис. 1.71-б), то при замыкании цепи ширина перехода увеличится, поскольку свободные носители заряда под действием электрического поля будут двигаться от перехода. Таким образом,  $p$ - $n$ -переход будет проводить ток только в одном направлении (односторонняя проводимость).

В целом,  $p$ - $n$ -переход нашел применение во многих полупроводниковых приборах.



Рис. 1.71.  $p$ - $n$ -переход в электрическом поле

Все приборы, изготовленные из полупроводниковых материалов, можно поделить на две большие группы. К одной из таких групп принадлежат приборы, в которых используются изменения свойств однородных полупроводников под действием различных физических факторов. Такими являются термисторы, в которых используется изменение сопротивления при изменении температуры. Конструкция их довольно проста. Их основной частью является цилиндр или шарик из полупроводникового материала, к которому подведены металлические проводники для соединения с другими электрическими приборами.

На термисторы похожи фоторезисторы, в которых изменение сопротивления происходит при освещении их видимым светом. Их чувствительность к свету довольно высока, что позволяет применять их в различных фотореле, фотоэкспонометрах, сигнальных устройствах, в автоматике.

Ко второй группе полупроводниковых приборов принадлежат приборы, в которых используются специфические свойства  $p$ - $n$ -переходов. Кроме полупроводниковых диодов, устройство которых рассмотрено выше, подобную конструкцию имеют фотодиод и фотоэлемент, в которых один из электродов изготавливается полупрозрачным. Сквозь него свет проникает внутрь прибора и создает фото-ЭДС. Фотоэлементы нашли применение в космических аппаратах для питания систем жизнеобеспечения космонавтов и работы научных приборов. Они имеют небольшую массу и большую удельную мощность. В условиях энергетического кризиса фотоэлементы становятся экологически чистыми источниками энергии и все чаще применяются для удовлетворения бытовых потребностей человека.

В определенных условиях на  $p$ - $n$ -переходе может излучаться свет. Эта особенность реализована в светодиодах, которые имеют большой КПД и с успехом конкурируют с лампами накаливания.

Свойства  $p$ - $n$ -перехода используются и в транзисторе. Он имеет два связанных друг с другом  $p$ - $n$ -перехода, технология изготовления которых похожа на технологию изготовления диода. Система  $p$ - $n$ - $p$ - или  $n$ - $p$ - $n$ -переходов транзистора работает



в различных электронных приборах, выполняя роль усилителя или электронного ключа.

Потребность в уменьшении размеров электронных приборов привела к созданию комбинированных твердотельных приборов, в которых главной функциональной частью является искусственно выращенный полупроводниковый кристалл. В процессе выращивания в нем формируются транзисторы, диоды, резисторы, конденсаторы и другие элементы электронных схем. Благодаря разработке таких интегральных схем созданы современные компьютеры и современные многофункциональные электронные приборы.

Внедрение в производство современных нанотехнологий открыло новые возможности для создания полупроводниковых конструкций с особо интересными и полезными для практики свойствами, с которыми вы ознакомитесь позднее.

70

1. Какое основное свойство  $p-n$ -перехода?
2. Как образуется  $p-n$ -переход?
3. Как изменяются свойства  $p-n$ -перехода под действием электрического поля?
4. На какие две группы делятся полупроводниковые приборы?
5. В каких приборах используются свойства однородных полупроводников?
6. В каких приборах используются  $p-n$ -переходы?
7. Почему в транзисторе три электрода?
8. Назовите преимущества интегральных схем.

## Лабораторная работа № 2

### Исследование электрической цепи с полупроводниковым диодом

**Цель.** Изучить основные электрические свойства полупроводникового диода.

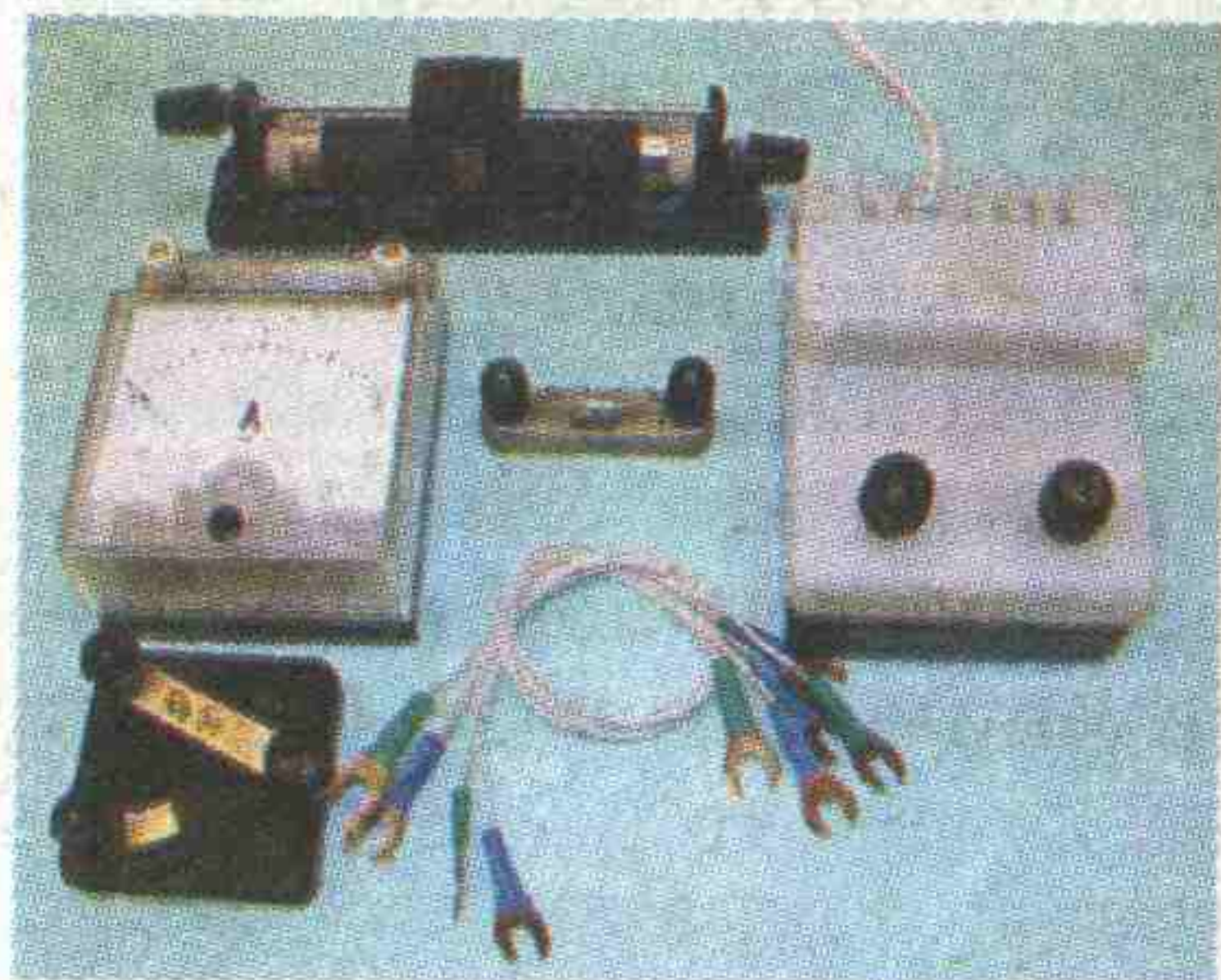


Рис. 1.72. Приборы для лабораторной работы

**Оборудование.** Полупроводниковый диод на панели, амперметр, источник тока, проводники, реостат, выключатель, спиртовка.

#### Указания к работе

1. Ознакомиться с внешним видом диода, записать его маркировку.
2. Составить электрическую цепь из источника тока, амперметра, реостата и выключателя. Вывести ползунок реостата на самое большое для него сопротивление.



3. Замкнуть цепь и наблюдать за показаниями амперметра. Установить ползунок реостата так, чтобы стрелка амперметра показывала ток 0,1 А.

4. Разомкнуть цепь и в нее включить диод последовательно с амперметром. Отметить показания стрелки амперметра. Если в цепи проходит ток, отметить, какие полюса источника тока соединены с выводами диода.

5. Постепенно перемещая ползунок реостата, следить за показаниями амперметра. Начертить приблизительный график изменения силы тока в цепи при изменении сопротивления реостата.

6. Установить ползунок реостата в среднее положение, изменить полярность включения диода и замкнуть цепь.

7. Осторожно нагревая диод, следить за показаниями амперметра.

8. По результатам опытов сделать выводы в качестве ответа на вопрос: одинаково ли диод проводит ток при различных полярностях его включения? Как зависит сопротивление диода от температуры?

## Главное в разделе 1

1. В природе кроме гравитационного взаимодействия существует электромагнитное взаимодействие, интенсивность которого в 1039 раз больше гравитационного.

2. Тела, между которыми наблюдается электромагнитное взаимодействие, имеют электрический заряд. Электрический заряд – это свойство физического тела, проявляющееся во взаимодействии с электромагнитным полем. Различают два вида электрических зарядов – положительный и отрицательный. Тела, которые имеют электрические заряды, взаимодействуют между собой таким образом, что одноименно заряженные тела отталкиваются, а разноименные – притягиваются.

3. Тело, имеющее электрический заряд, создает электрическое поле. В системе, где заряженное тело неподвижно, это поле называют электростатическим. Оно является отдельным проявлением единого электромагнитного поля.

4. Напряженность электрического поля – это его силовая характеристика, равная отношению силы, действующей на точечное положительно заряженное тело, к значению заряда этого тела:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}.$$

В электростатическом поле действует принцип суперпозиции: напряженность электрического поля заряженных тел в



любой точке равна векторной сумме напряженностей полей всех тел:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n.$$

5. Взаимодействие точковых неподвижных заряженных тел происходит согласно закону Кулона: сила взаимодействия двух неподвижных точечных заряженных тел пропорциональна произведению их зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$F = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}.$$

6. Электрическое поле может выполнять работу по перемещению заряженных тел. Значение этой работы не зависит от пути и формы траектории и определяется положением начальной и конечной точек, между которыми происходило движение:

$$A = QE(l_1 - l_2).$$

72

7. Каждая точка электрического поля характеризуется потенциалом — физической величиной, определяющей потенциальную энергию заряженного тела в этой точке. Она равна отношению потенциальной энергии заряженного тела к его заряду:

$$\varphi = \frac{W_{\text{п}}}{Q}.$$

Потенциал электрического поля измеряется в вольтах (В).

8. Потенциал заряженного тела пропорционален его заряду. Физическая величина, характеризующая зависимость потенциала заряженного тела от его заряда, называется электроемкостью:

$$C = \frac{Q}{\varphi}.$$

Емкость измеряется в фарадах (Ф).

9. Для накопления значительных зарядов при небольших потенциалах используют конденсаторы — системы изолированных друг от друга проводников. Конденсаторы соединяют параллельно и последовательно. Емкость параллельно соединенных конденсаторов равна сумме емкостей всех конденсаторов в соединении:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n.$$

Емкость цепи из последовательно соединенных конденсаторов меньше наименьшего значения емкости одного конденсатора в соединении:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$



**10.** Электрическое поле конденсатора имеет энергию, которая определяется через взаимосвязанные параметры – электроемкость и электрический заряд или разность потенциалов:

$$W = \frac{C(\Delta\varphi)^2}{2}, \quad W = \frac{Q^2}{2C}.$$

**11.** Электрический ток – это упорядоченное движение заряженных частиц или тел. Он возникает при наличии свободных носителей зарядов и электрического поля (или других факторов, которые приводят частицы в движение).

**12.** Сила тока характеризует скорость перенесения заряда частицами, которые образуют ток, через поперечное сечение проводника:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}.$$

Сила электрического тока измеряется в амперах (А).

**13.** Закон Ома для однородного участка цепи: сила тока в цепи пропорциональна напряжению на данном участке цепи и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка:

$$I = \frac{U}{R}.$$

**14.** Закон Ома для полной цепи учитывает параметры внутреннего и внешнего участка цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$

**15.** Сопротивление проводников зависит от их геометрических размеров (длины  $l$  и площади поперечного сечения  $S$ ) и материала, из которого они изготовлены:

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

**16.** Чистые полупроводники имеют собственную проводимость, когда носителями заряда являются электроны и дырки, концентрация которых одинакова. В полупроводниках с примесями возникает примесная проводимость двух типов:  $n$ -типа, когда основными носителями заряда являются свободные электроны, и  $p$ -типа, когда носителями заряда являются положительные дырки.

**17.** Электронно-дырочный переход ( $p$ - $n$ -переход) имеет одностороннюю проводимость. Создание в кристаллах полупроводников нескольких  $p$ - $n$ -переходов открывает возможности для изготовления транзисторов и интегральных схем.



# Раздел 2



Усвоив материал этого раздела, ты будешь **знать**:

- ♦ природу электромагнитного взаимодействия;
- ♦ действие магнитного поля на проводник с током;
- ♦ принцип действия электродвигателя;
- ♦ закон электромагнитной индукции;
- ♦ устройство трансформатора.

Ты сможешь **объяснить**:

- ♦ действие магнитного поля на движущиеся электрические заряды;
- ♦ магнитные свойства вещества;
- ♦ образование индукционного тока;
- ♦ действие трансформатора.

Ты будешь **уметь**:

- ♦ графически изображать структуру магнитного поля;
- ♦ определять направление индукционного тока, сил Ампера и Лоренца;
- ♦ экспериментально исследовать явление электромагнитной индукции и магнитные свойства вещества;
- ♦ решать задачи на взаимодействие магнитного поля с проводником под током, применяя формулы сил Ампера и Лоренца, закон электромагнитной индукции, ЭДС самоиндукции, энергии магнитного поля, определять характеристики переменного тока, коэффициент трансформации.





# ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

75

## § 24. Магнитное поле

Обобщение учеными результатов теоретических и экспериментальных исследований различных взаимодействий в природе привело к выводу, что материя может существовать не только в форме вещества, но и в форме поля. Изучая физику в предыдущих классах, вы узнали о существовании электрического и магнитного полей, благодаря которым взаимодействуют наэлектризованные тела. Работы Дж. Максвелла, М. Фарадея и других ученых показали, что эти поля взаимосвязаны и фактически являются проявлениями более универсального электромагнитного поля. И только выбор системы отсчета определяет, что мы наблюдаем – электрическое или магнитное поле. Изучить все свойства электромагнитного поля довольно сложно. Поэтому в физике изучают постепенно отдельные проявления этого поля. Одним из этапов изучения электромагнитного поля является изучение магнитного поля, которое проявляется в случае, когда заряженные частицы или тела в определенной системе отсчета движутся равномерно. В этом разделе рассматриваются не только условия, при которых магнитное поле наблюдается, но и физические величины, которые описывают его свойства, законы, по которым взаимодействуют магнитные поля и вещественные объекты. Знание этих законов позволяет производить важные для практики расчеты результатов взаимодействия магнитного поля с различными физическими телами.



Явления, которые мы называем магнитными, известны человечеству очень давно. Необычные свойства магнетита (разновидности железной руды) использовались в Древнем Китае, а потом и в других странах для изготовления компасов. Магнитам приписывали магические свойства, их действием объясняли непонятные явления природы, пробовали лечить болезни.

Систематизированные исследования магнитов провел английский физик У. Гильберт в XVI в. Он не только исследовал взаимодействие постоянных магнитов, но и установил, что Земля является большим магнитом.

Учение о магнитах развивалось длительное время обособленно, как отдельная отрасль науки, пока ряд открытий и теоретических исследований в XIX в. не доказали его органическую связь с электричеством.

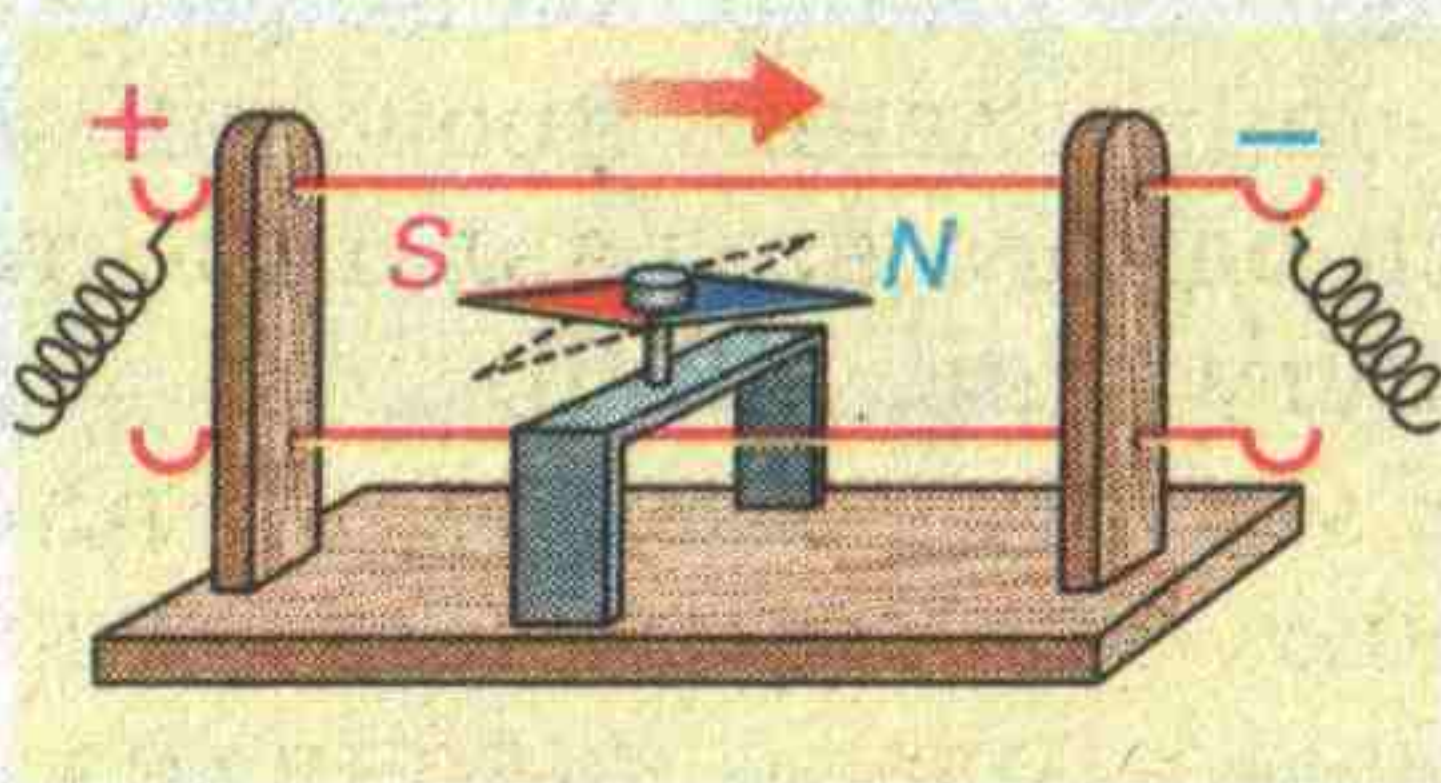


Рис. 2.1. Опыт Эрстеда

Одним из фундаментальных доказательств единства электрических и магнитных явлений является опыт Г.Х. Эрстеда, датского физика, который в 1820 г. заметил, что магнитная стрелка изменяет ориентацию вблизи проводника с током (рис. 2.1).

Было вполне очевидно, что причиной изменения ориентации стрелки является электрический ток — направленное движение заряженных частиц в проводнике. С подробным описанием этого опыта вы встречались в 9-м классе.

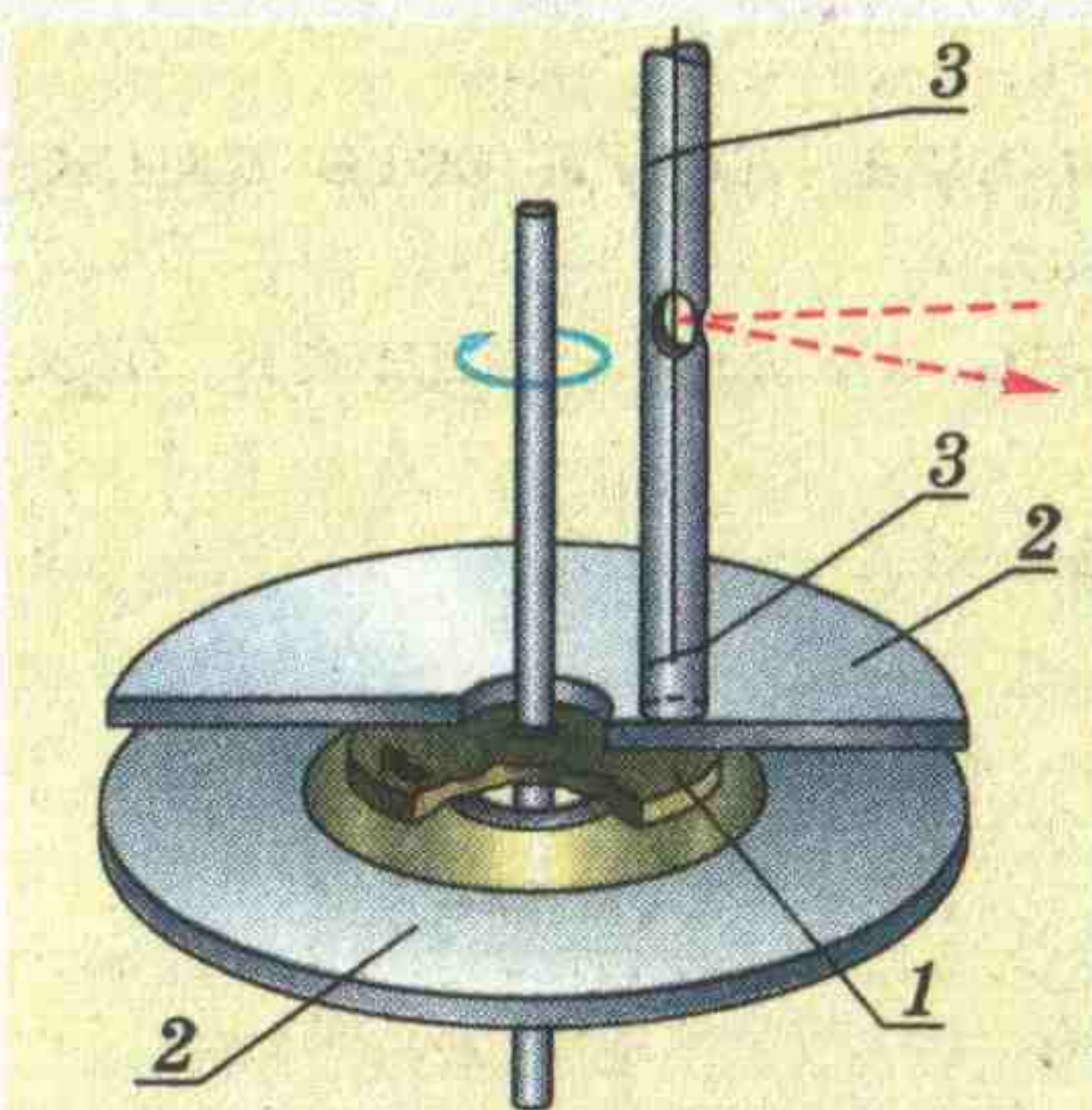


Рис. 2.2. Главная часть установки Роуланда по выявлению магнитного поля движущегося электрически заряженного диска

Магнитное действие движущихся заряженных тел исследовал также американский физик Г. Роуланд в 1878 г. Основная часть его установки представляла собой эбонитовый диск 1, покрытый тонким слоем золота (рис. 2.2). Диск был насажен на вал и мог свободно вместе с ним вращаться между двумя стеклянными пластинами 2. Над эбонитовым диском были укреплены на тонкой нити две намагниченные

стальные иголки 3, чувствительные к магнитному полю. Когда диску сообщили некоторый заряд и начали вращать, иголки повернулись на некоторый угол, что свидетельствовало о наличии магнитного поля. При увеличении скорости вращения иголки поворачивались на больший угол.



Опытами Г. Роуланда было подтверждено открытие Эрстеда о связи магнитного поля с движущимися электрически заряженными частицами или телами.



Генри Роуланд (1848–1901) – американский физик; научные работы в области электродинамики, оптики, спектроскопии и теплоты. Он доказал, что заряженные тела, если они движутся, вызывают магнитное взаимодействие.



Магнитные явления хотя и связаны с электрическими, но не идентичны им. Это подтверждают опыты.

Если взять два длинных параллельных проводника и присоединить к источнику тока, то заметим, что они взаимодействуют между собой (рис. 2.3) в зависимости от направления тока в них. При токах противоположных направлений проводники отталкиваются (рис. 2.3-а). Если токи одного направления, то проводники притягиваются друг к другу (рис. 2.3-б).

Действие проводника с током на магнитную стрелку или другой проводник с током происходит при отсутствии непосредственного контакта между ними, благодаря наличию вокруг проводника магнитного поля.

Магнитное поле имеет свои особенности, которые выделяют его среди других полей:

- 1) магнитное поле наблюдается всегда, когда есть движущиеся заряженные частицы или тела;
- 2) магнитное поле действует только на движущиеся заряженные тела или частицы.

Другие свойства будут описаны далее.

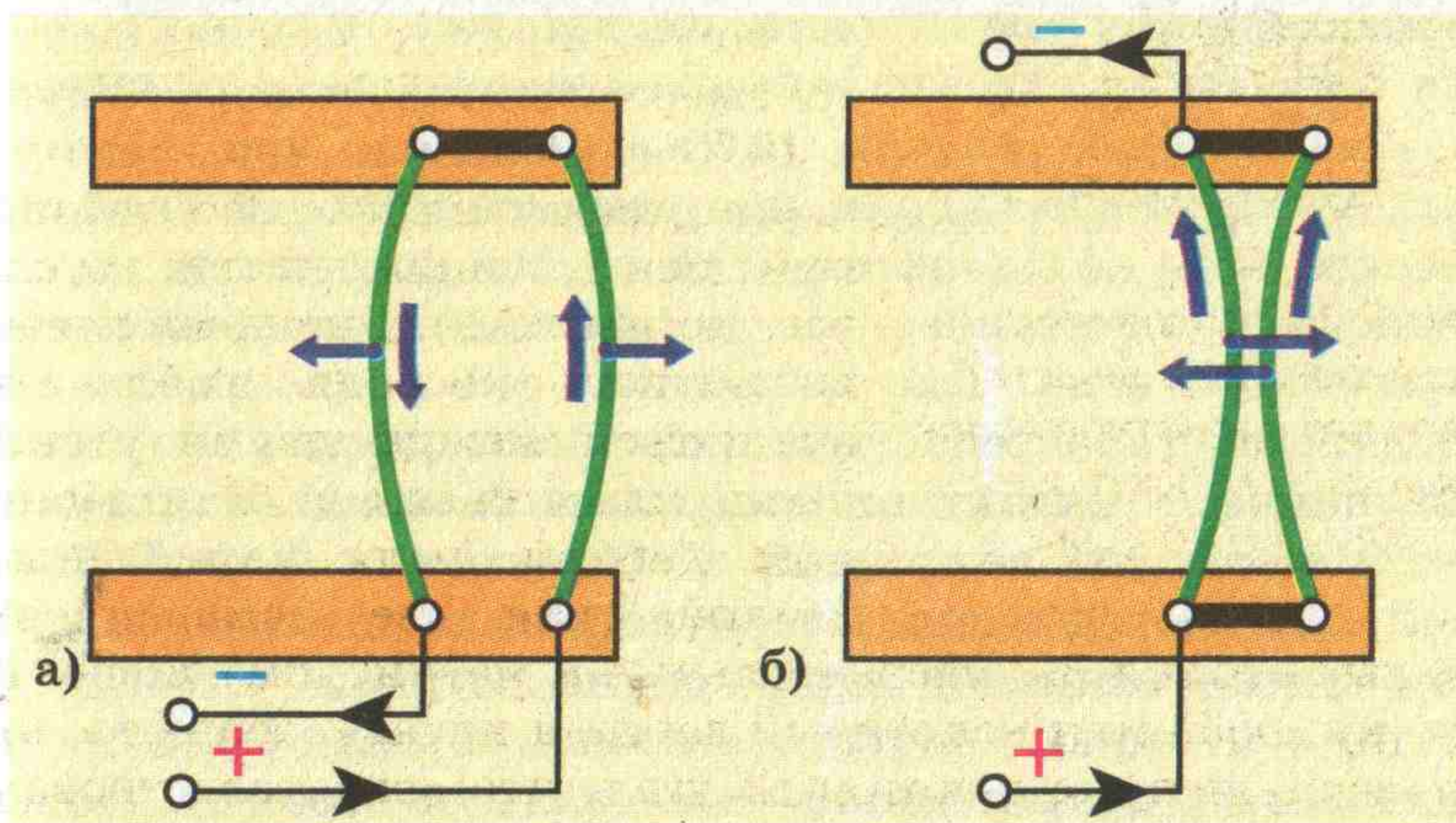


Рис. 2.3. Магнитное взаимодействие проводников с током





1. Какие явления подтверждают существование магнитного поля?
2. Какие опыты подтверждают связь магнитного поля с движущимися заряженными телами или частицами?
3. Какие опыты подтверждают отличие магнитного поля от электрического?
4. Назовите основные свойства магнитного поля.

## § 25. Магнитная индукция

Наблюдения за магнитными взаимодействиями в лаборатории или в природе показывают, что действия магнитного поля на физические тела или проводники с током при равных условиях могут быть различными.



**Интенсивность магнитного взаимодействия может быть различной.**

78

Если для выявления магнитного поля Земли магнитную стрелку компаса приходится устанавливать на специальных опорах, которые существенно уменьшают силы трения, то действие электромагнита, в обмотках которого проходит электрический ток, будет заметным даже тогда, когда стрелка будет просто лежать на столе.

Различным будет и взаимодействие параллельных проводников с током. Сила взаимодействия этих проводников будет изменяться, если будет изменяться сила тока в них или расстояние между ними, — она будет увеличиваться при увеличении силы тока или при уменьшении расстояния.

Для всех таких случаев говорят о «сильном» или «слабом» поле. Аналогичные случаи рассматривались при изучении свойств электрического поля, при рассмотрении действия электрического поля на заряженные тела. Для количественной характеристики электрического поля введена напряженность электрического поля. Для магнитного же поля используется также силовая характеристика и соответствующая ей физическая величина — **магнитная индукция**. Магнитная индукция является векторной величиной и обозначается буквой  $B$ . Поскольку для исследования магнитного поля длительное время пользовались магнитной стрелкой на острие, то магнитная индукция как характеристика магнитного поля была связана с действием магнитного поля на магнитную стрелку. Так, направление полюсов стрелки послужило базой для установления направления вектора магнитной индукции изучаемого



поля. Условились, что за направление магнитной индукции принимается направление северного полюса стрелки.

**Магнитная индукция – векторная величина, имеющая направление.**



Исследуем с помощью магнитной стрелки магнитное поле проводочного витка с током.

Замкнув цепь, в которую включен виток, начнем обносить магнитную стрелку на острие вокруг витка. Заметим, что ориентация стрелки при этом будет меняться. В разных точках она будет иметь различную ориентацию. Наиболее ощутимым будет действие поля на стрелку в центре витка (рис. 2.4).

Таким образом, мы установили, что магнитная индукция витка или прямоугольной рамки будет иметь максимальное значение в центре. Продольная ось магнитной стрелки будет перпендикулярна плоскости витка. Аналогичное явление будет наблюдаться и тогда, когда возьмем прямоугольную рамку или моток провода произвольной формы.

В отличие от напряженности электрического поля магнитная индукция как векторная величина не совпадает по направлению с направлением силы, которая действует на проводник с током. Выясним, как направление вектора магнитной индукции зависит от направления тока в витке.

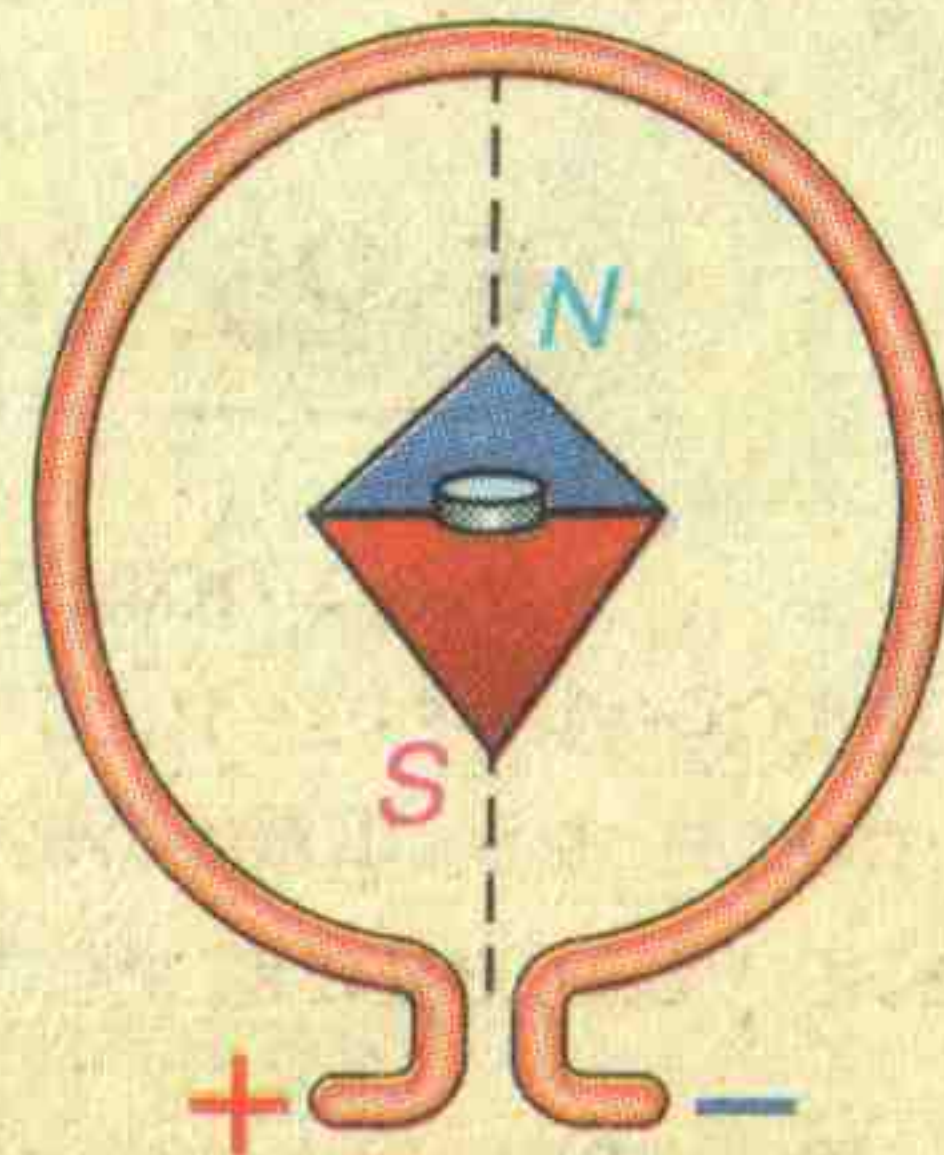


Рис. 2.4. Продольная ось магнитной стрелки, находящаяся в центре витка с током, перпендикулярна его плоскости

**Магнитная индукция – это силовая характеристика поля. Она определяет силу, которая действует на проводник с током или на движущуюся частицу.**



Отметив направление магнитной стрелки при определенном направлении тока в витке, изменим направление последнего на противоположное. Магнитная стрелка развернется на  $180^\circ$ , показывая, что направление магнитной индукции также изменилось. Таким образом, направление магнитной индукции витка с током зависит от направления тока в нем.

Чтобы каждый раз, когда нужно знать направление магнитной индукции, не проводить опыты со стрелкой, пользуются *правилом правого винта (буравчика)*. Это правило позволяет



запомнить связь направления тока в витке с направлением магнитной индукции его поля. Для этого необходимо представить, как будет двигаться правый винт, приставленный перпендикулярно к плоскости витка, при вращении его по направлению тока в витке.

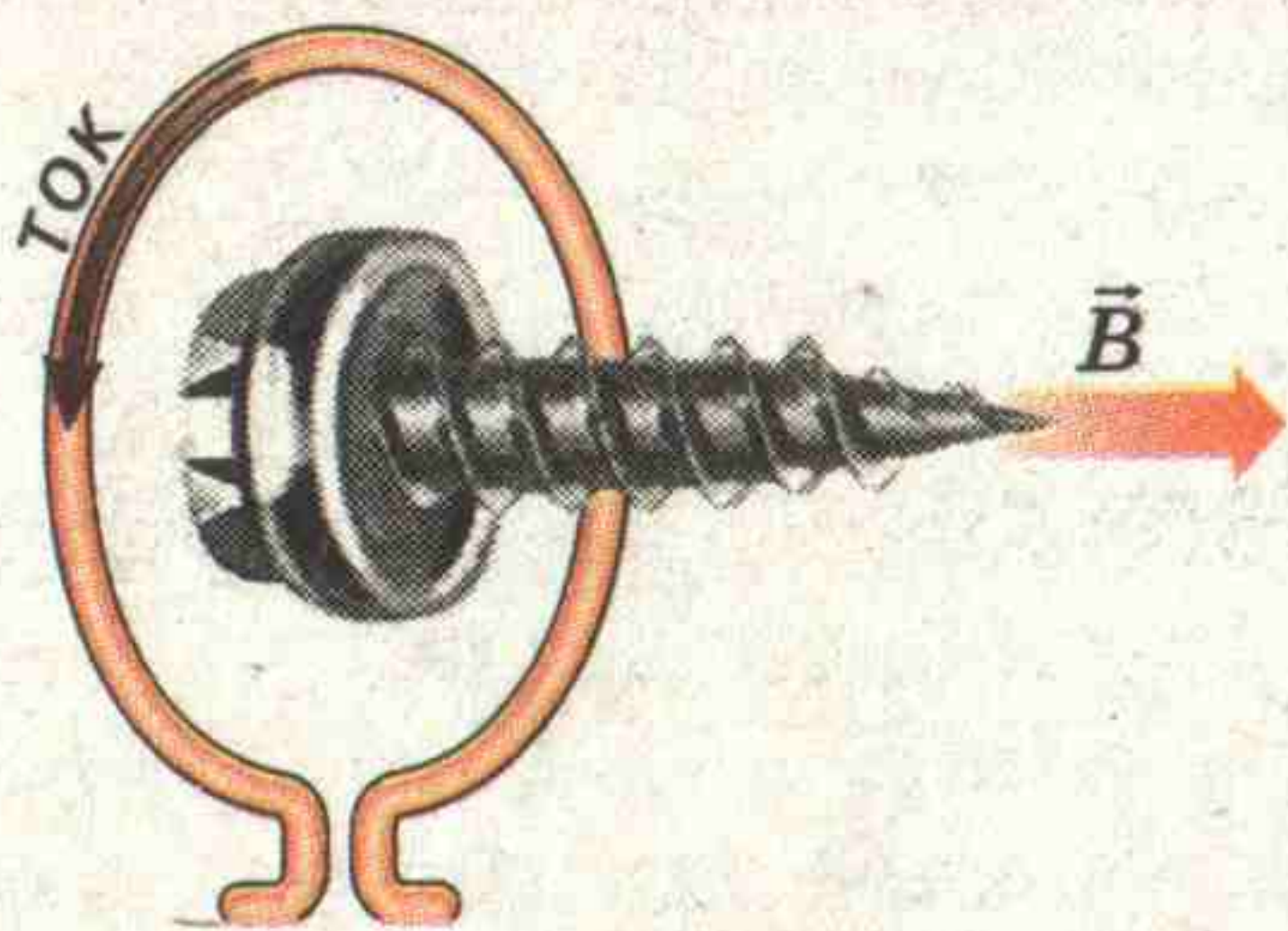


Рис. 2.5. Определение направления магнитной индукции витка с током

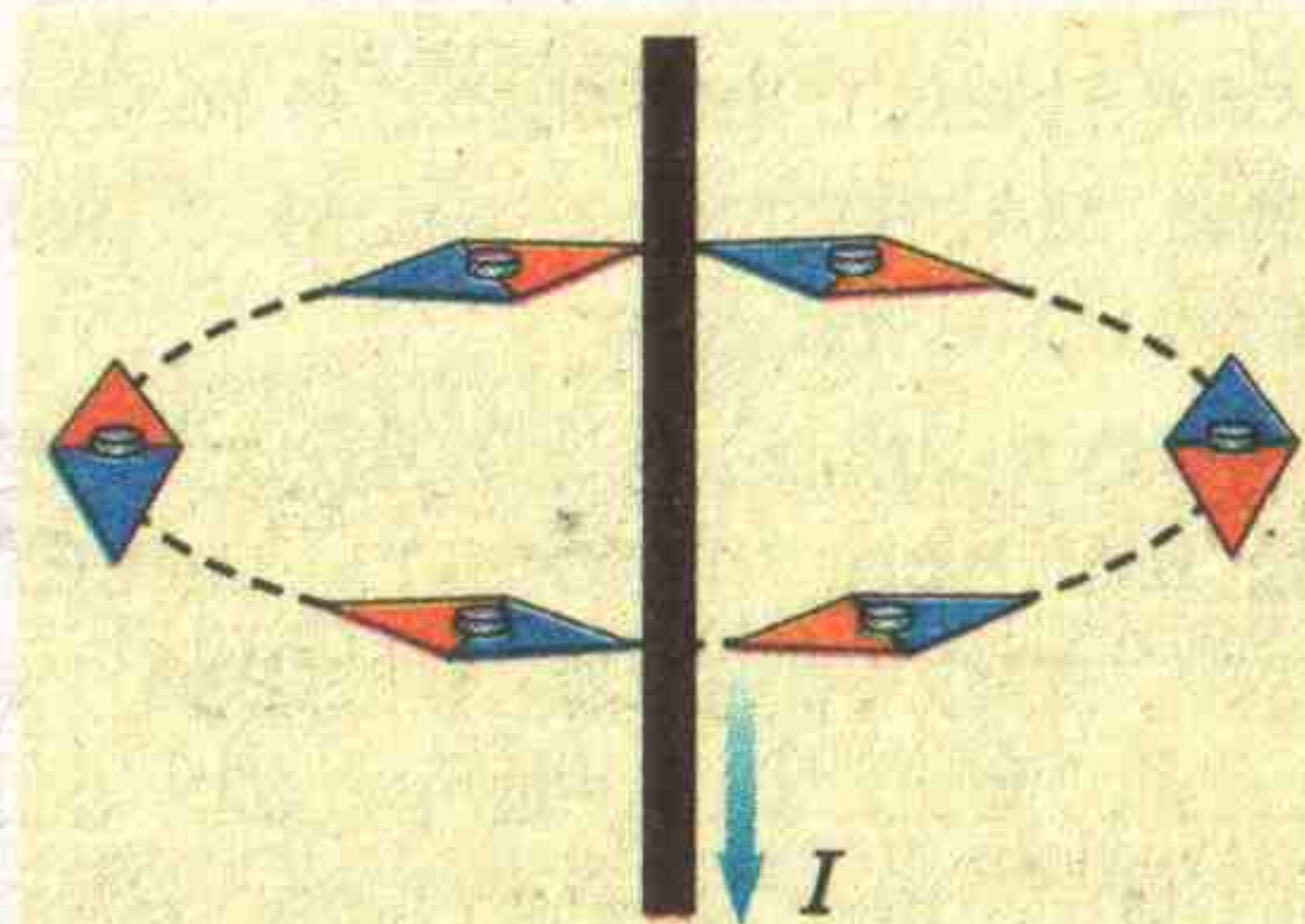


Рис. 2.6. Исследование магнитного поля прямого проводника с током при помощи магнитной стрелки

80



Если направление вращения правого винта, расположенного в центре витка с током, совпадает с направлением тока, то его поступательное движение показывает направление магнитной индукции (рис. 2.5).

Магнитное поле существует и вокруг прямого проводника с током. Для подтверждения этого магнитную стрелку будем обносить вокруг проводника, не изменяя расстояния (рис. 2.6).

В разных точках ее ориентация будет различной, но ось стрелки всегда будет направлена по касательной к траектории движения.

Соответственно и магнитная индукция проводника с током будет иметь такое же направление.

При изменении направления тока в проводнике на противоположное стрелка развернется на  $180^\circ$  и покажет направление магнитной индукции, которое также будет противоположным к прежнему.

Таким образом, направление магнитной индукции прямого проводника зависит от направления тока в нем. Для облегчения его определения, как и в предыдущем случае, на основании анализа результатов эксперимента, сформулировано **правило правого винта** (рис. 2.7): если направление

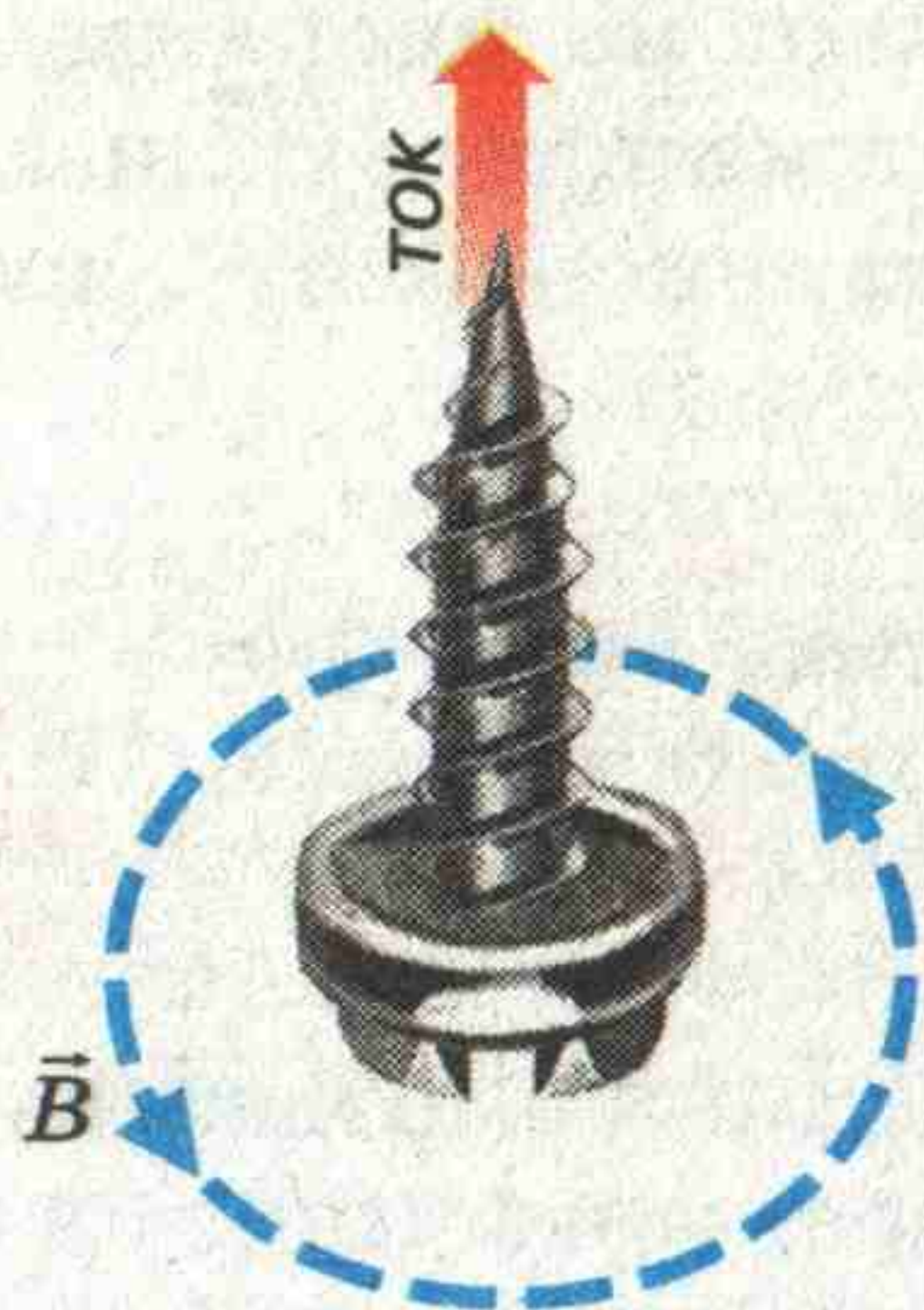


Рис. 2.7. Определение направления магнитной индукции поля прямого проводника с током при помощи правого винта (буравчика)



поступательного движения правого винта совпадает с направлением тока в проводнике, то направление его вращения показывает направление магнитной индукции.

Для измерения магнитной индукции применяется специальная единица тесла (Тл). Эта единица названа в честь сербского ученого и изобретателя Николы Теслы.



**Никола Тесла (1856–1943)** – родился в Сербии, изобретатель и физик. Известен благодаря своим изобретениям в области электротехники и электроники; работал инженером на предприятиях Венгрии, Франции, США.



В практике используются долевые величины:

$$1 \text{ миллитесла} = 1 \text{ мТл} = 10^{-3} \text{ Тл},$$

$$1 \text{ микротесла} = 1 \text{ мкТл} = 10^{-6} \text{ Тл}.$$

Значения магнитной индукции измеряют специальными приборами, которые называются магнитометрами или индикаторами магнитной индукции (рис. 2.8).

Часто вместо прямых измерений пользуются формулами, которые позволяют рассчитать магнитную индукцию на основании параметров проводника. Таким примером может быть расчет модуля магнитной индукции прямого проводника с током. Экспериментально подтверждено, что магнитная индукция поля прямого проводника с током прямо пропорциональна силе тока в проводнике и обратно пропорциональна расстоянию от его оси:

$$B = \frac{kI}{r}.$$

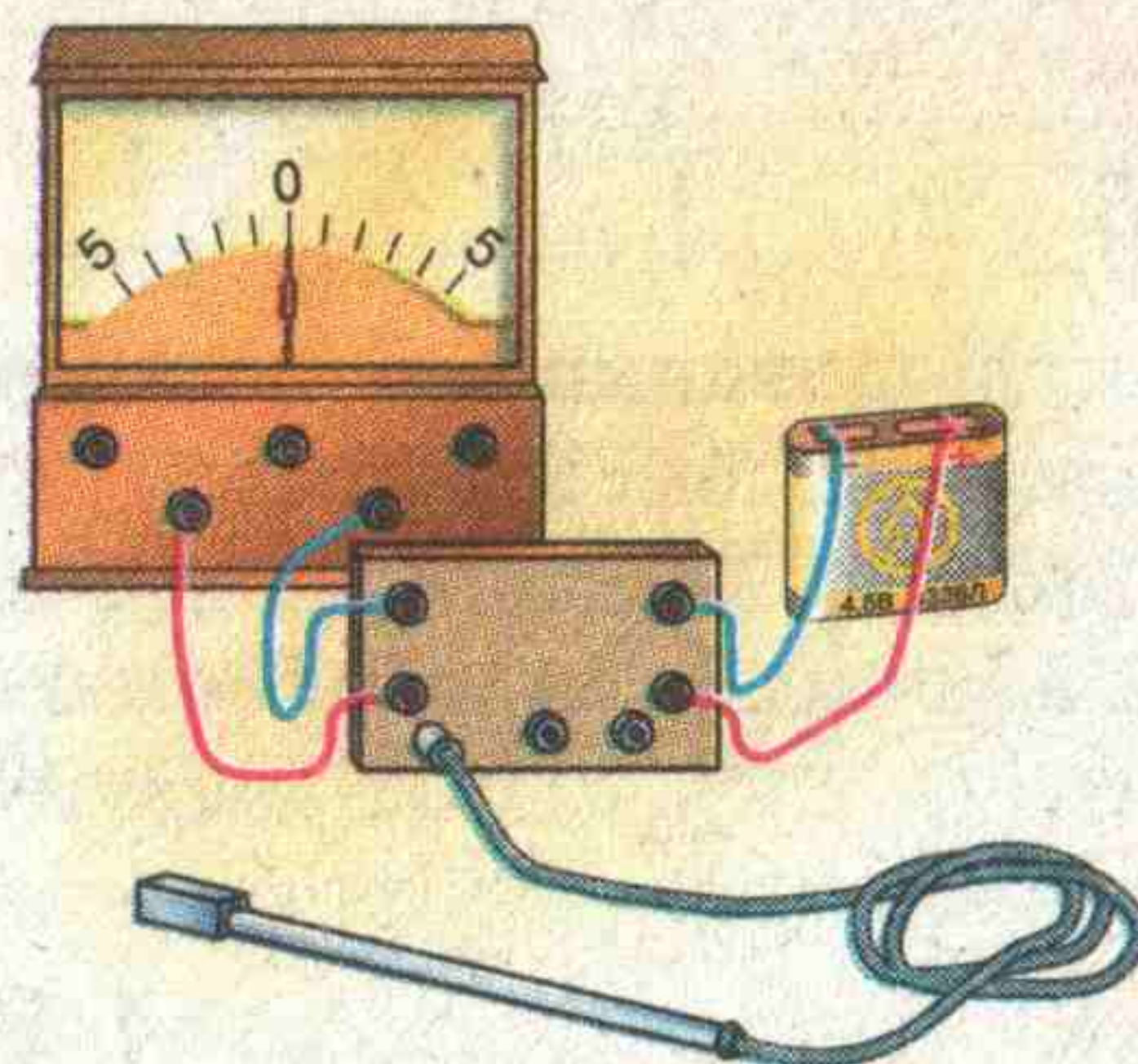


Рис. 2.8. Лабораторный магнитометр для школьных опытов

**Магнитная индукция прямого проводника с током пропорциональна силе тока в нем и обратно пропорциональна расстоянию от проводника до точки наблюдения.**



Коэффициент пропорциональности в этой формуле зависит от выбора системы единиц измерений. В Международной системе единиц (СИ) он имеет значение  $k = \frac{\mu_0}{2\pi}$ ,

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная, ее числовое значение  $1,256 \times 10^{-6} \text{ Н/А}^2$ .





$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}$$

Тогда окончательно для расчетов модуля магнитной индукции поля прямого проводника с током имеем формулу:



$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r},$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $I$  – сила тока в проводнике;  $r$  – расстояние от проводника до данной точки поля.

**Задача.** Каково значение модуля магнитной индукции в точке поля, удаленной на 3 см от бесконечно длинного проводника, по которому проходит ток 6 А?

Дано:

Решение

82

$r = 3 \text{ см},$   
 $I = 6 \text{ А}.$

Магнитная индукция прямого проводника с током рассчитывается по формуле:

$B - ?$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}.$$

Подставив значения физических величин, получим

$$\begin{aligned} B &= \frac{12,56 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \cdot 6 \text{ А}}{2 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = \\ &= 4 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Тл.} \end{aligned}$$

**Ответ:** магнитная индукция поля прямого проводника с током равна  $4 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}.$

1. Почему магнитную индукцию считают силовой характеристикой магнитного поля?
2. Что общего и отличительного между магнитной индукцией и напряженностью электрического поля?
3. Как определяется направление магнитной индукции?
4. Как определить направление магнитной индукции поля прямого проводника с током?
5. Назовите единицы измерения магнитной индукции.
6. Какими приборами производят прямое измерение магнитной индукции?
7. От чего зависит магнитная индукция поля прямого проводника с током?





## Упражнение 11

1. Определить максимальную магнитную индукцию поля на расстоянии 10 см от оси прямого проводника, по которому проходит ток 600 А.

2. Определить силу тока в прямом проводнике, если на расстоянии 10 см от оси проводника магнитная индукция равна  $4 \cdot 10^{-6}$  Тл.

3. На каком расстоянии от проводника, сила тока в котором 250 мА, магнитная индукция равна  $2 \cdot 10^{-6}$  Тл?

## § 26. Действие магнитного поля на проводник с током. Сила Ампера

Поскольку вокруг проводников с током возникает магнитное поле, естественно предположить, что в магнитном поле на них действует сила.

83

**На проводник с током в магнитном поле действует сила.**



Проведем исследование с целью определения, от чего зависит модуль и направление этой силы. Для этого используем установку, в которой прямой проводник подвешен в магнитном поле постоянного магнита так, что его можно включать в электрическую цепь, силу тока в которой можно изменять при помощи реостата. Амперметр будет измерять силу тока в цепи.

Замкнув электрическую цепь, заметим, что проводник отклонится от положения равновесия, а динамометр покажет некоторое значение силы. Увеличим силу тока в проводнике в 2 раза и увидим, что сила, действующая на проводник, также увеличится в 2 раза. Любые другие изменения силы тока будут вызывать соответствующие изменения силы. Сопоставление результатов всех измерений позволяет сделать вывод, что сила  $F$ , которая действует на проводник с током, пропорциональна силе тока в нем:

$$F \sim I.$$

Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, называется *силой Ампера*.

**Сила Ампера пропорциональна силе тока в проводнике.**





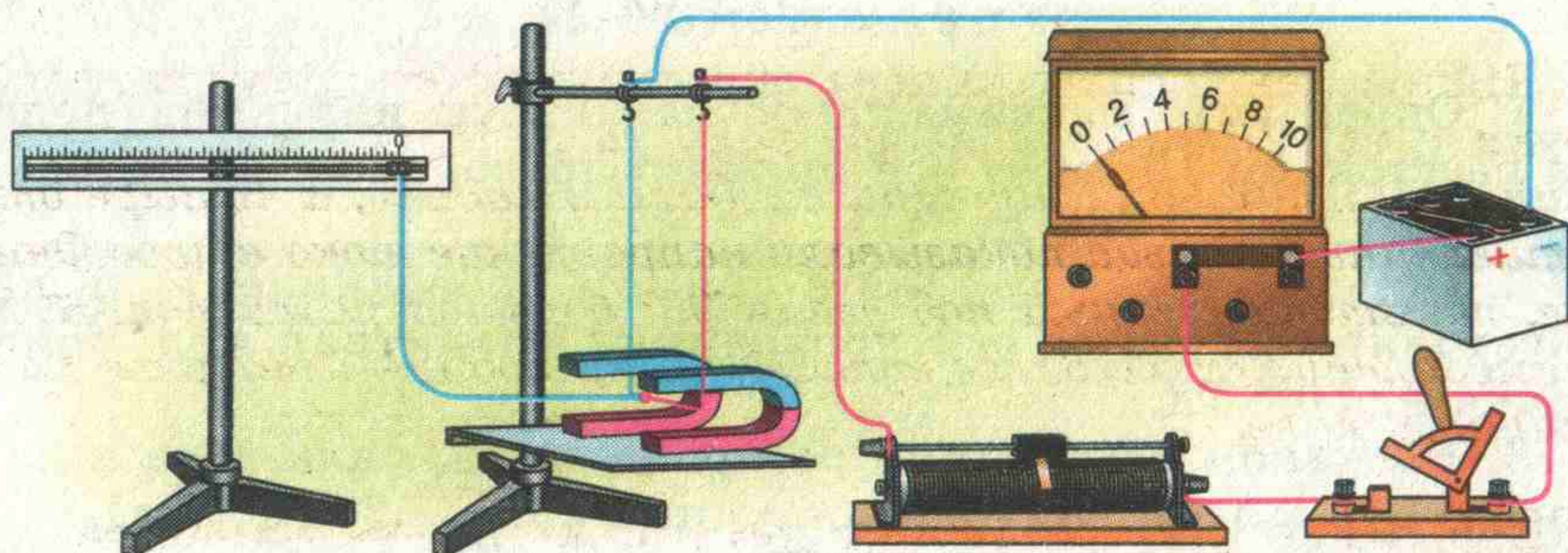


Рис. 2.9. Установка для изучения действия магнитного поля на проводник с током

Расположим еще один магнит рядом с первым. Длина проводника, находящегося в магнитном поле, увеличится приблизительно в 2 раза. Значение силы, действующей на проводник, в этом случае также увеличится в 2 раза. Таким образом, сила  $F_A$ , действующая на проводник с током в магнитном поле, пропорциональна длине проводника  $\Delta l$ , который расположен в магнитном поле:

$$F \sim \Delta l.$$

84



**Сила Ампера пропорциональна длине активной части проводника.**

Сила увеличится также тогда, когда применим другой, более мощный магнит с большей магнитной индукцией поля. Это позволит сделать вывод, что сила Ампера  $F_A$  зависит от магнитной индукции поля:

$$F \sim B.$$

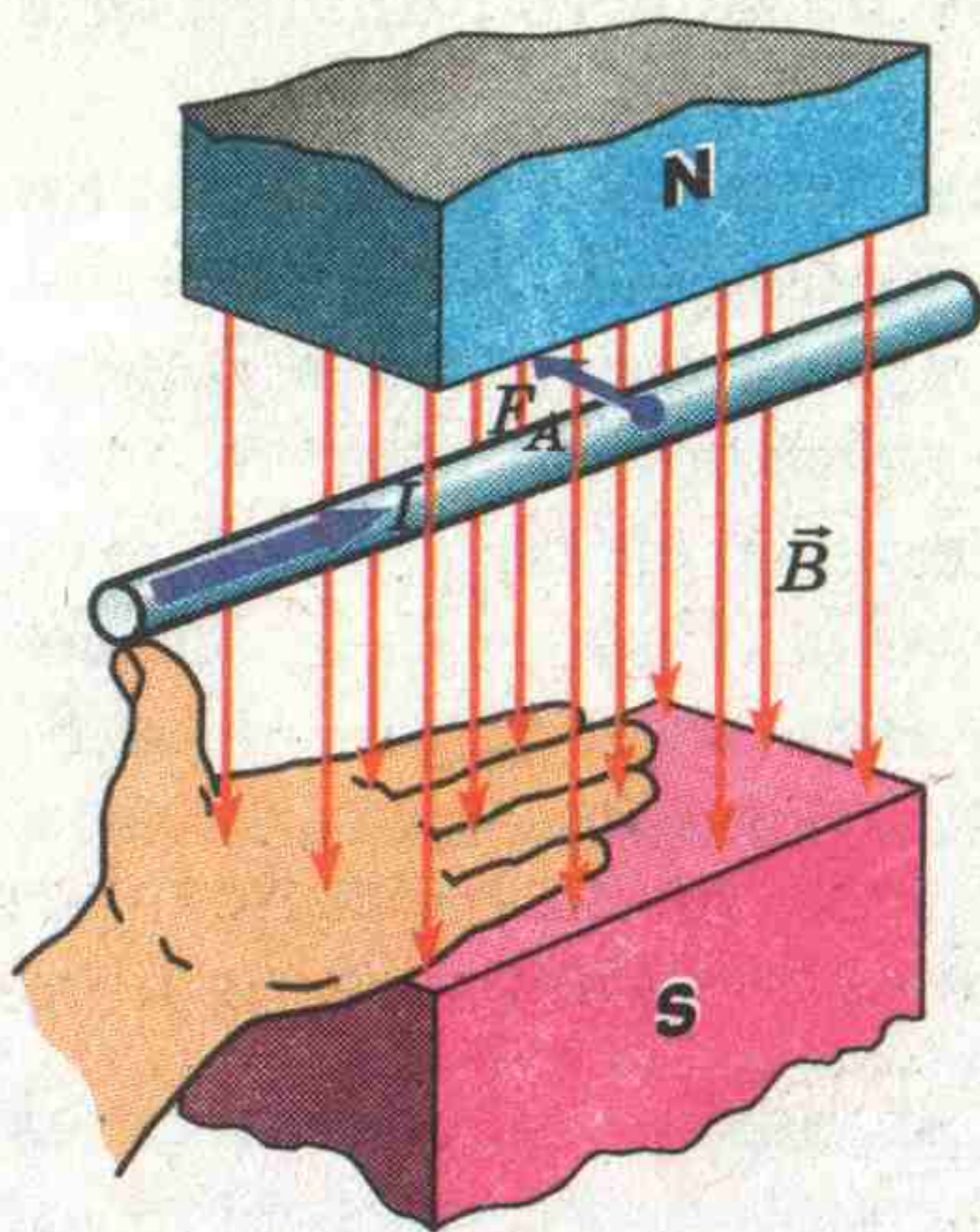


Рис. 2.10. При помощи левой руки можно определить направление силы Ампера

Опыт позволяет убедиться и в том, что наибольшее значение силы Ампера будет тогда, когда угол между проводником и вектором магнитной индукции будет равен  $90^\circ$ . Если этот угол будет равен нулю, т. е. вектор магнитной индукции будет параллельным проводнику, то сила Ампера также будет равна нулю. Отсюда легко сделать вывод, что сила Ампера зависит от угла между вектором магнитной индукции и проводником.

Окончательно для расчетов имеем формулу



$$F_A = B I \Delta l \sin \alpha.$$

Направление силы Ампера определяется по правилу левой руки (рис. 2.10): если левую руку разместить так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а четыре отставленных пальца показывали направление тока в проводнике, то отставленный под углом  $90^\circ$  большой палец покажет направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле.

Если левую руку разместить так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а четыре отставленных пальца показывали направление тока в проводнике, то отставленный под углом  $90^\circ$  большой палец покажет направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле.



## § 27. Взаимодействие проводников с током

85

Взаимодействие проводников с током объясняется действием силы Ампера (рис. 2.11).

Каждый из проводников имеет свое магнитное поле, которое действует на соседний проводник с током и способствует появлению силы Ампера. Так, проводник  $AA'$ , по которому проходит ток  $I_1$ , имеет магнитное поле, модуль индукции  $B_1$  которого, как указывалось ранее, равен

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r},$$

где  $r$  — расстояние от проводника до точки наблюдения.

Если проводник  $CC'$  длиной  $\Delta l$  находится на расстоянии  $r$  от проводника  $AA'$  и в нем проходит ток  $I_2$ , то на него действует сила Ампера  $F_A$ , поскольку он находится в магнитном поле проводника  $AA'$ . Значение этой силы равно

$$F_{21} = B_1 I_2 \Delta l \sin \alpha.$$

Поскольку проводники параллельны и угол между проводником  $CC'$  и вектором магнитной индукции  $B_1$  равен  $90^\circ$ , то  $\sin \alpha = 1$ .

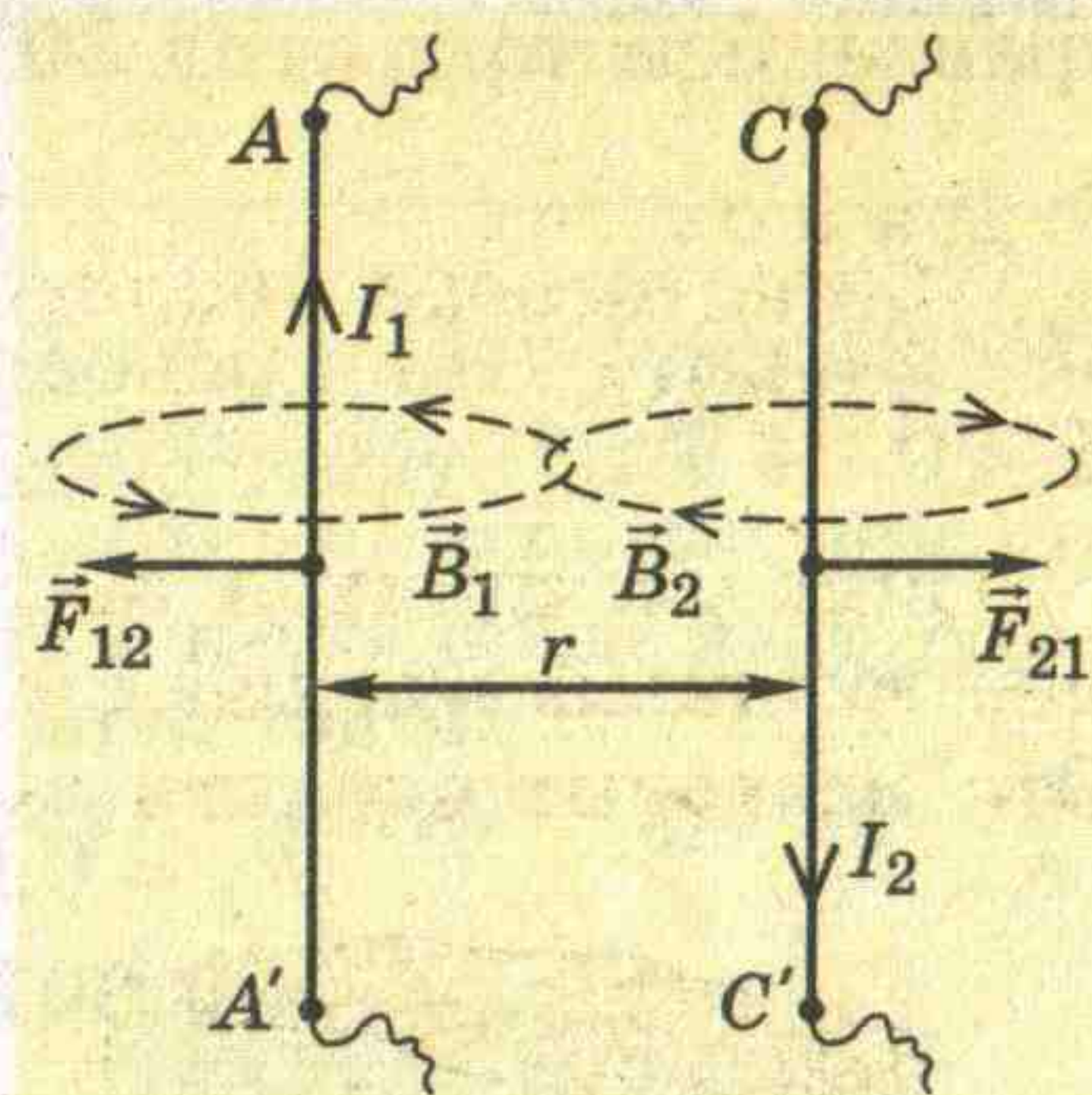


Рис. 2.11. На каждый параллельный проводник действует сила Ампера, вызванная действием магнитного поля второго проводника



Подставим в последнюю формулу значение магнитной индукции поля проводника  $AA'$ :

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \Delta l}{2\pi r}.$$



**Силу взаимодействия двух параллельных проводников с током можно определить, зная только расстояние между ними и силу тока в них.**

Как и при любом взаимодействии, такая сила, согласно третьему закону Ньютона, действует на каждый из проводников. Только направления их противоположны.

Таким образом, два параллельных проводника взаимодействуют между собой благодаря магнитным полям, которые образуются вокруг проводников, по которым проходит электрический ток.

86

**Задача.** Определить модуль силы Ампера, которая действует на проводник с током длиной 25 см в магнитном поле с индукцией 0,04 Тл, если между вектором магнитной индукции и направлением тока угол  $30^\circ$ , сила тока в проводнике 0,25 А.

**Дано:**

$\Delta l = 25$  см,  
 $B = 0,04$  Тл,  
 $\alpha = 30^\circ$ ,  
 $I = 0,25$  А.

**Решение**

На проводник с током в магнитном поле действует сила

$$F_A = BI\Delta l \sin \alpha.$$

Подставим значения всех величин:

$F_A = ?$

$$F_A = 0,04 \text{ Тл} \cdot 0,25 \text{ А} \cdot 0,25 \text{ м} \cdot 0,5 = 0,00125 \text{ Н} = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ Н}.$$

**Ответ:** модуль силы равен  $1,25 \cdot 10^{-3}$  Н.

1. Какое явление описывает сила Ампера?
2. Как действует установка, на которой можно исследовать силу Ампера?
3. От каких величин зависит значение силы Ампера?
4. Чему равен угол между направлением тока и силой Ампера в установке для исследования взаимодействия параллельных проводников с током?
5. Как определяется направление силы Ампера?

## Упражнение 12

1. На прямой проводник длиной 0,5 м, расположенный перпендикулярно к линиям магнитной индукции поля, зна-



чение которой  $2 \cdot 10^{-2}$  Тл, действует сила 0,15 Н. Найти силу тока в проводнике.

2\*. Между полюсами магнита подвешен горизонтально на двух легких нитях прямой проводник длиной 0,2 м и массой 10 г. Магнитная индукция магнитного поля перпендикулярна к проводнику и направлена вертикально вверх. На какой угол от вертикали отклонятся нити, поддерживающие проводник, если по нему проходит ток 2 А, а значение магнитной индукции 0,49 Тл?

3\*. В горизонтальном проводнике длиной 20 см и массой 4 г проходит ток 10 А. Определить модуль и направление магнитной индукции, при которой сила Ампера уравнивает силу тяжести.

4\*. По двухпроводной линии передач, расположенной в воздухе, проходит ток 5 А. Какая сила действует на единицу длины каждого проводника, если расстояние между проводниками 40 см?

## § 28. Использование действия силы Ампера

87



Силу Ампера применяют для преобразования энергии электрического тока в механическую энергию проводника. Такое превращение происходит во многих электротехнических устройствах. Рассмотрим некоторые из них.

### *Электроизмерительные приборы магнитоэлектрической системы*

Электроизмерительный прибор магнитоэлектрической системы состоит из постоянного магнита и проволочной рамки, расположенной между его полюсами (рис. 2.12). Полюса магнита имеют специальные насадки, создающие однородное магнитное поле, в котором вращение рамки не приводит к изменению угла между магнитной индукцией и проводниками рамки. Этот угол всегда равен  $90^\circ$ .

С рамкой соединены две спиральные пружины, которые подводят к рамке электрический ток. Во время прохождения электрического тока

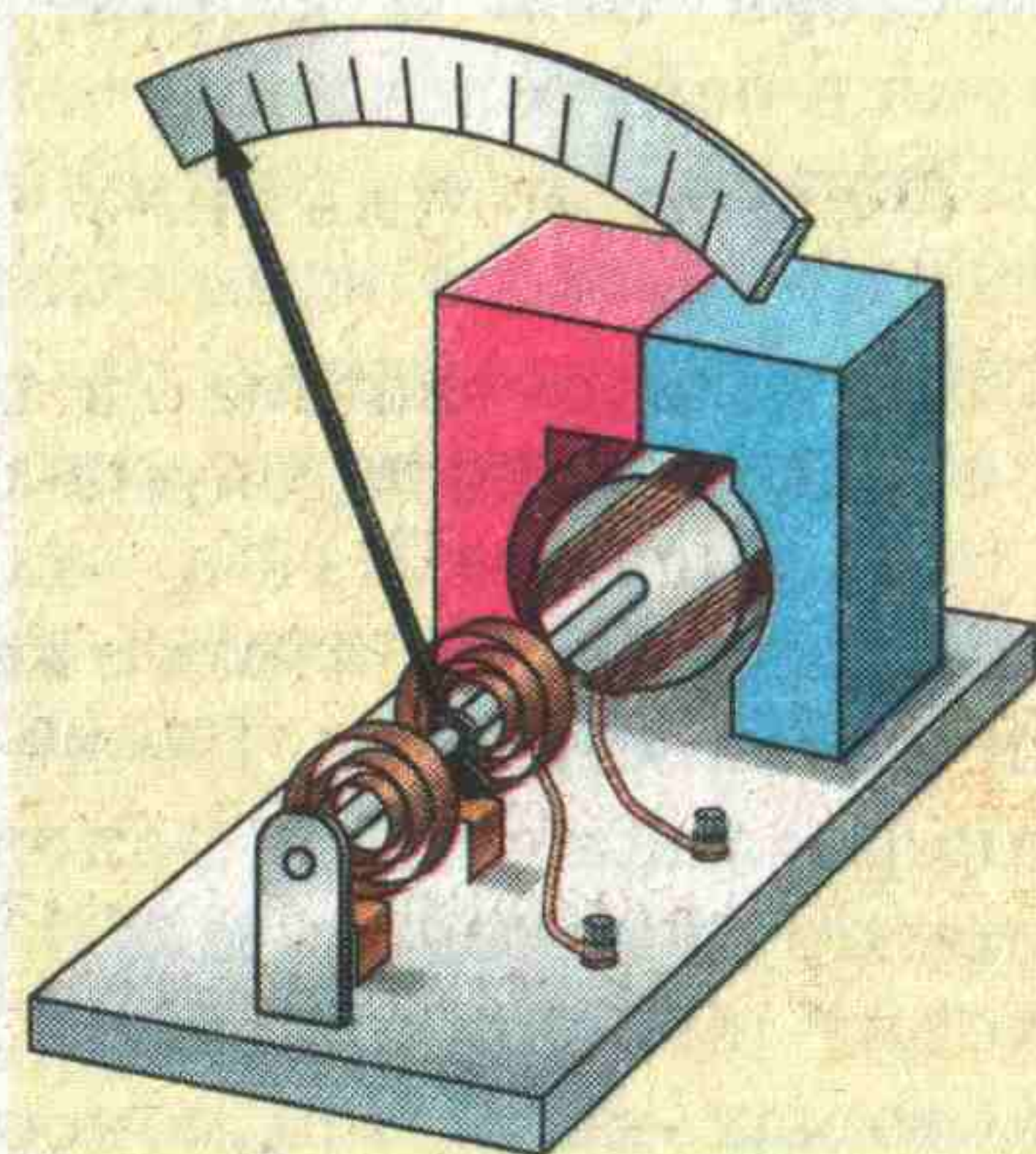


Рис. 2.12. Устройство электроизмерительного прибора магнитоэлектрической системы



по виткам рамки возникает сила Ампера, пропорциональная силе тока в рамке. Чем больше сила действует на витки рамки, тем больше закручиваются спиральные пружины, в которых возникает сила упругости. Когда сила Ампера и сила упругости станут равными, вращение рамки прекратится.

Стрелка, прикрепленная к рамке, показывает угол поворота рамки. Этот угол пропорционален силе тока в рамке.

### *Электрический двигатель постоянного тока*

Электрический двигатель применяют для преобразования энергии электрического тока в механическую энергию вращения вала двигателя. Принцип его действия подобен принципу действия электроизмерительного прибора магнитоэлектрической системы, описанного выше. Только в его конструкции отсутствует пружина, поэтому рамка может поворачиваться

на любой угол. Электрический ток к рамке, размещенной на валу и имеющей стальной сердечник, подается через специальные скользящие контакты-щеточки (рис. 2.13).

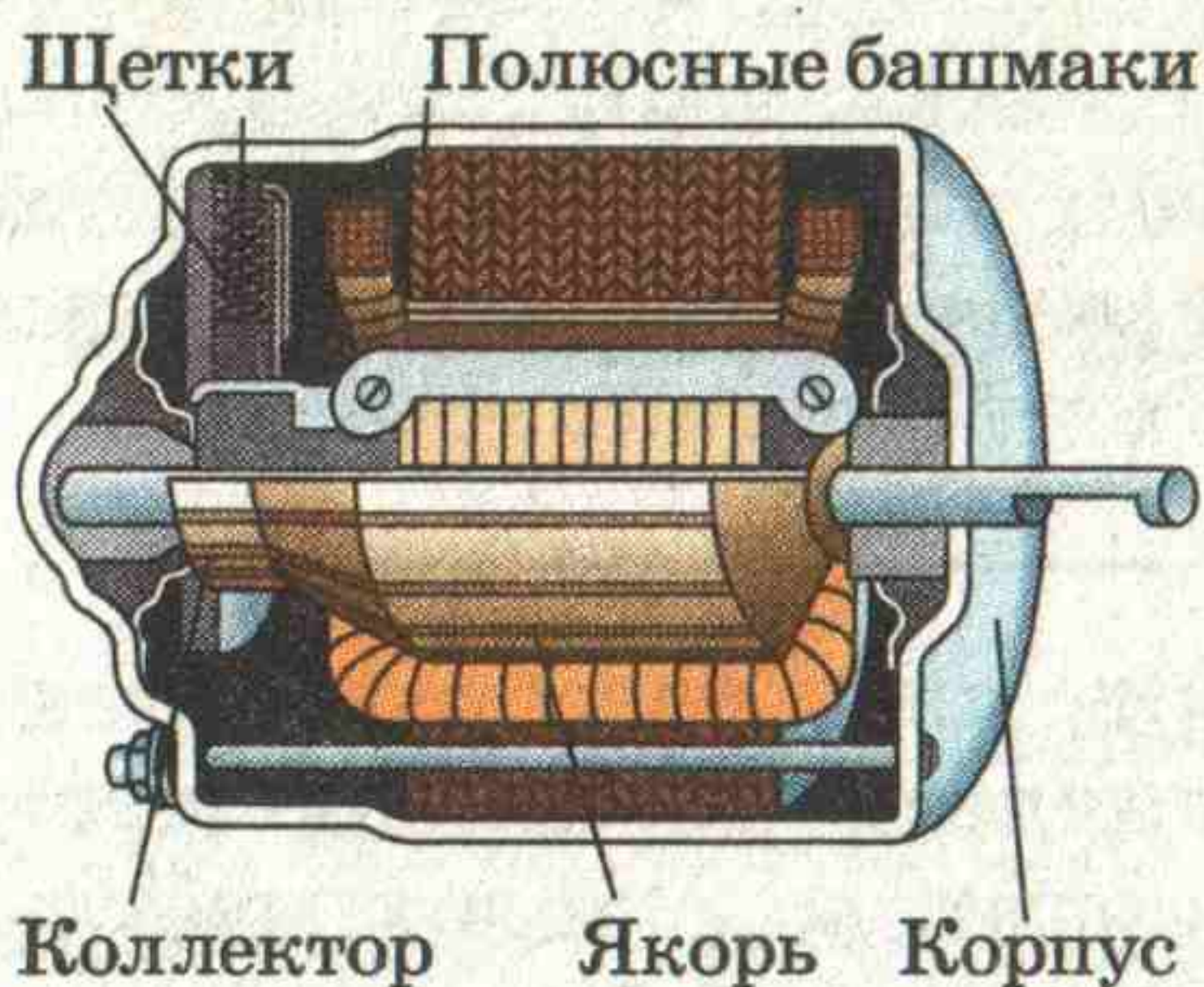


Рис. 2.13. Устройство двигателя постоянного тока

При замыкании цепи питания двигателя ток проходит по рамке и она взаимодействует с магнитным полем постоянного магнита или электромагнита и поворачивается до тех пор, пока ее плоскость не станет параллельной вектору магнитной индукции. Чтобы она могла

провернуться и дальше, нужно сменить направление силы тока в ней, вследствие чего поменяет направление сила Ампера, действующая на рамку с током в магнитном поле. В двигателе этот процесс осуществляется с помощью двух неподвижных графитометаллических щеток и двух полуколец на валу, к которым подведены концы рамки.

На рисунке 2.14-а показан момент, когда ток в якоре такого направления, что его полюса отталкиваются от одноименных полюсов статора. После поворачивания на некоторый угол якорь окажется в положении, когда разноименные полюса притягиваются (рис. 2.14-б). Вследствие инерции якорь проходит это положение равновесия, а благодаря кольцам, которых касаются токоподводящие щетки (рис. 2.14-в), направление тока в якоре изменяется на противоположное и вращение якоря продолжается (см. рис. 2.14-а).

В промышленных образцах электродвигателей постоянного тока ротор имеет несколько рамок-обмоток. Поэтому и количе-



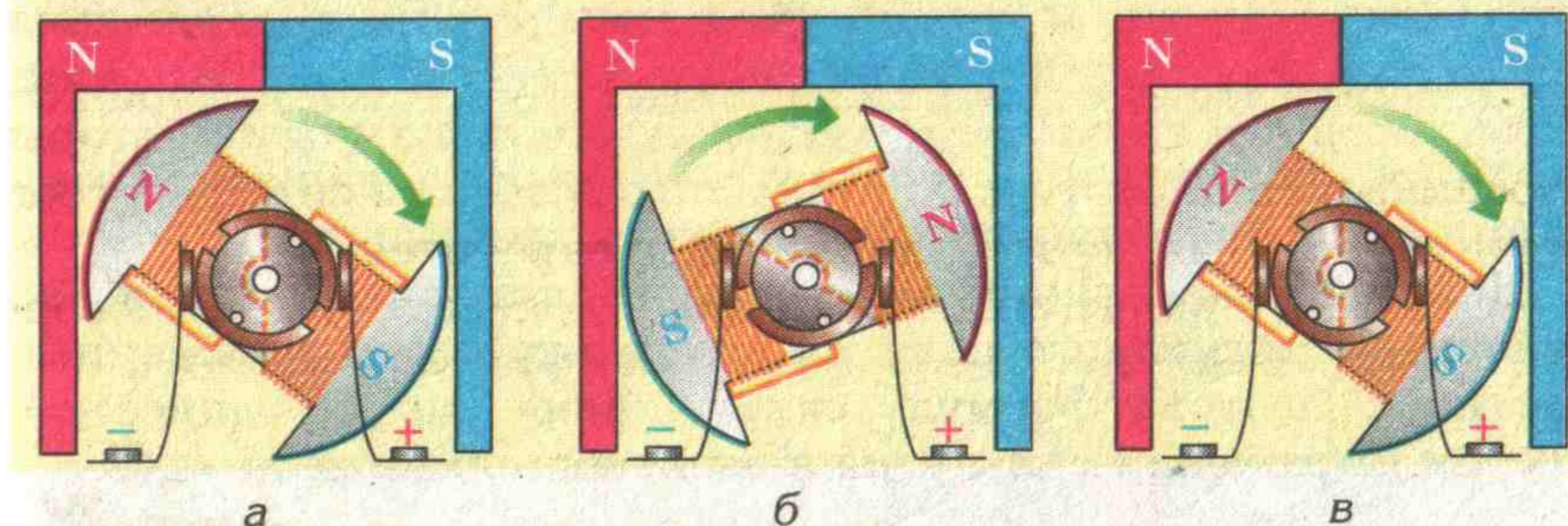


Рис. 2.14. Схемы, которые объясняют действие коллекторного электродвигателя постоянного тока

ство пар скользящих контактов в них больше: оно согласуется с количеством обмоток. В целом такое устройство называют коллектором. В новейших моделях двигателей постоянного тока роль коллектора выполняет специальное устройство с электронными приборами.

Таким образом, действие силы Ампера нашло применение в различных технических устройствах: электроизмерительных приборах, электрических двигателях и т. п.

89

## § 29. Сила Лоренца

Силой Лоренца  $F_L$  называют силу, действующую на электрически заряженную частицу,двигающуюся в электромагнитном поле, определяя действия на нее электрического и магнитного полей одновременно. Это выражается формулой:

$$\vec{F}_L = \vec{F}_{эл} + \vec{F}_м,$$

где  $\vec{F}_{эл}$  – электрическая составляющая силы Лоренца, описывающая взаимодействие движущейся частицы и равная  $\vec{F}_{эл} = e\vec{E}$ ;  $\vec{F}_м$  – магнитная составляющая силы Лоренца, определяющая взаимодействие заряженной частицы с магнитным полем.

**Сила Лоренца действует на движущуюся электрически заряженную частицу в электромагнитном поле.**



Для упрощения рассмотрим случай, когда  $\vec{F}_{эл} = 0$ , а сила Лоренца равна магнитной составляющей.

Выясним, как можно рассчитать силу, действующую на движущуюся заряженную частицу в магнитном поле.

Как известно, электрический ток в проводнике – это упорядоченное движение заряженных частиц. Согласно электронной теории сила тока рассчитывается по формуле:



$$I = envS,$$

где  $I$  – сила тока;  $e$  – заряд частицы;  $n = \frac{N}{V}$  – концентрация частиц в проводнике;  $V$  – объем;  $v$  – скорость движения частиц;  $S$  – площадь поперечного сечения проводника.

Действие магнитного поля на проводник с током является действием магнитного поля на все движущиеся заряженные частицы. Поэтому формулу силы Ампера можно записать с учетом выражения силы тока в электронной теории:

$$F_A = BenvS\Delta l \sin \alpha,$$

или

$$F_A = Be \frac{N}{V} Sv\Delta l \sin \alpha.$$

Если учесть, что

$$S\Delta l = V, \text{ то } F_A = BeNv \sin \alpha.$$

Если сила Ампера является равнодействующей всех сил, действующих на  $N$  частиц, то на одну частицу будет действовать сила в  $N$  раз меньше:

$$F = \frac{F_A}{N} = Bev \sin \alpha.$$

Это и есть формула для расчета магнитной составляющей силы Лоренца:

$$F_L = evB \sin \alpha.$$



### Магнитная составляющая силы Лоренца

$$F_L = evB \sin \alpha.$$

Анализ этой формулы позволяет сделать выводы, что:

- 1) магнитная составляющая силы Лоренца действует только на движущуюся частицу ( $v \neq 0$ );
- 2) магнитная составляющая не действует на движущуюся частицу, которая движется вдоль линии магнитной индукции ( $\alpha = 0$ ).

Направление магнитной составляющей силы Лоренца, как и силы Ампера, определяется по правилу левой руки. При этом необходимо учитывать, что это справедливо для положительно заряженных частиц. Если определять направление силы Лоренца, действующей на электрон или другую отрицательно заряженную частицу, то, применяя правило левой руки, нужно мысленно изменять направление движения на противоположное.



Сила Лоренца направлена всегда под некоторым углом к скорости частицы, поэтому она придает ей центростремительное ускорение (рис. 2.15).

Для случая, если  $\alpha = 90^\circ$ ,  $evB = \frac{mv^2}{R}$ .



Откуда

$$R = \frac{mv}{eB}$$

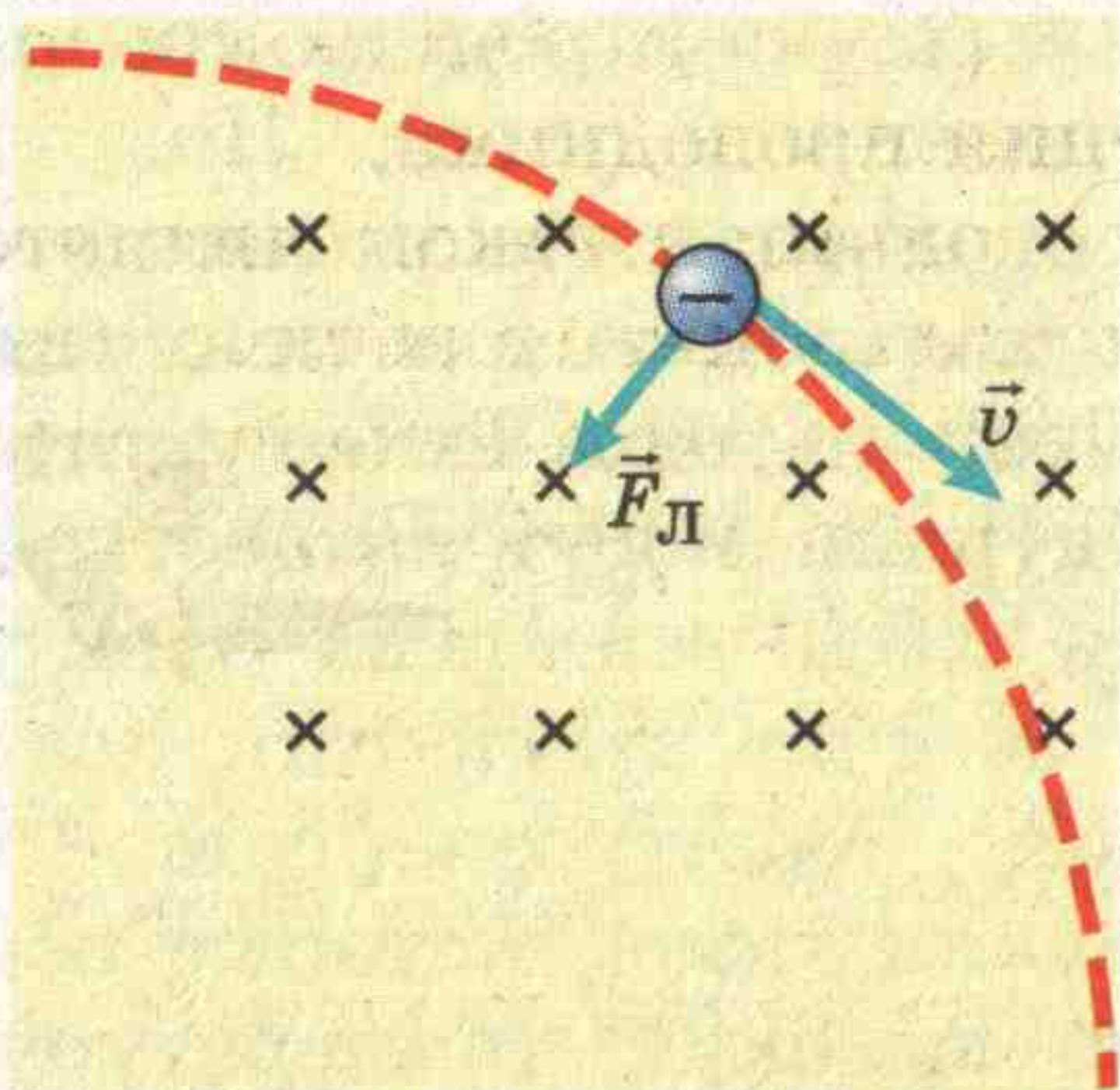


Рис. 2.15. Сила Лоренца придает частице центростремительное ускорение

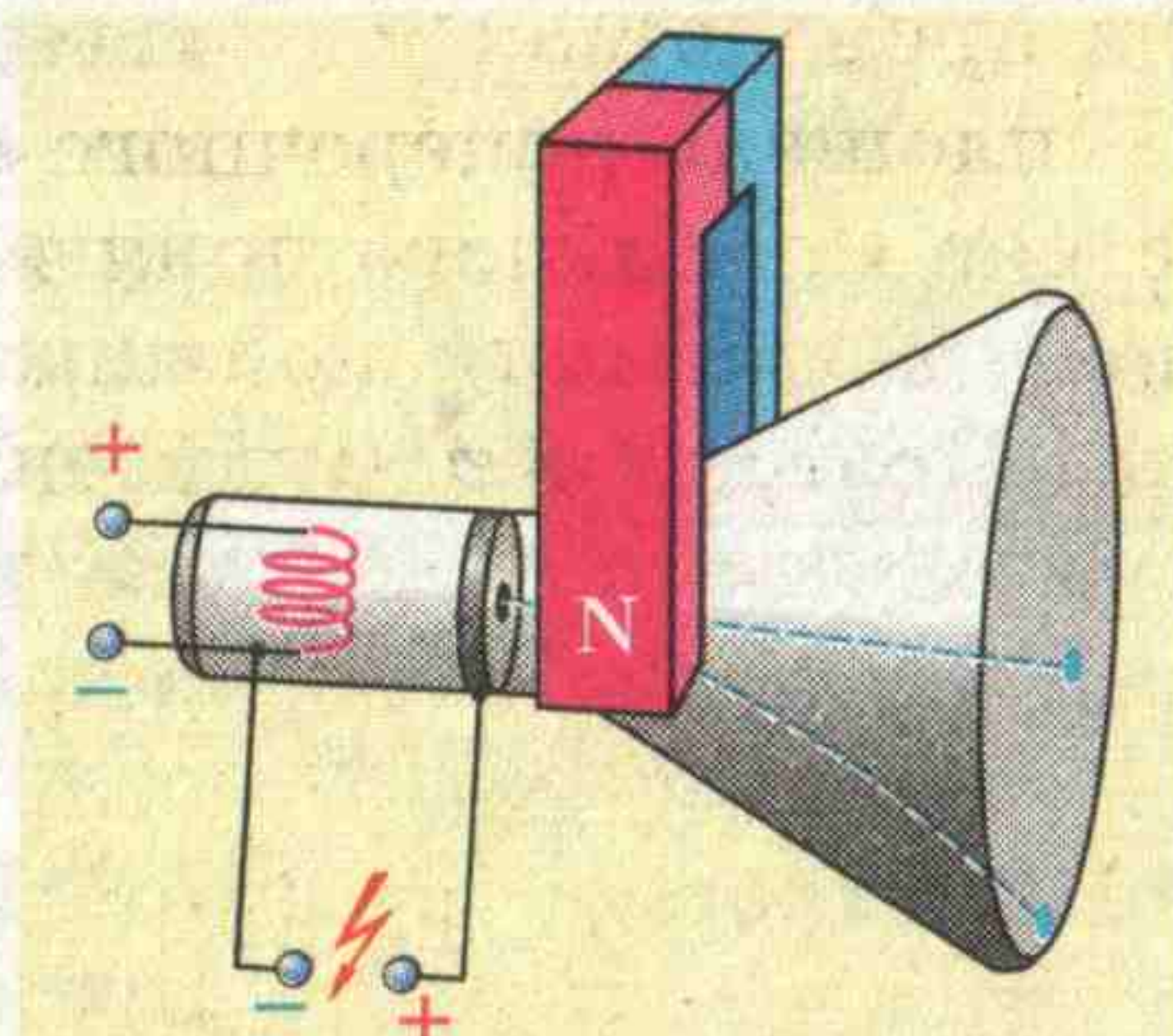


Рис. 2.16. Магнитное поле смещает электронный пучок в трубке осциллографа

Таким образом, заряженная частица, попадая в магнитное поле, начинает двигаться по дуге окружности. При иных значениях  $\alpha \neq 0$  траектория движения частицы в магнитном поле приобретает форму спирали.

Наблюдать действие силы Лоренца можно с помощью электронно-лучевой трубки, которая есть во многих осциллографах (рис. 2.16). Если включить питание осциллографа, то на его экране можно увидеть светлое пятно, появившееся в месте падения электронов на экран. Если теперь сбоку поднести к трубке постоянный магнит, то пятно сместится, что подтверждает действие магнитного поля на движущиеся электроны.

Действие силы Лоренца применяется во многих приборах и технических установках. Так, смещение электронного луча, который «рисует» изображение на экране вакуумного кинескопа телевизора или дисплея компьютера, совершается магнитным полем специальных катушек, в которых проходит электрический ток, изменяющийся во времени по определенному закону.

В научных исследованиях применяют так называемые циклические ускорители заряженных частиц, в них магнитное поле мощных электромагнитов удерживает заряженные частицы на круговых орбитах.

Весьма перспективными для развития электроэнергетики являются магнетогидродинамические генераторы (МГД-генераторы) (рис. 2.17). Поток высокотемпературного газа (плазмы), который образуется при сгорании органического топлива и имеет высокую концентрацию ионов обоих знаков, пропускается через магнитное поле.



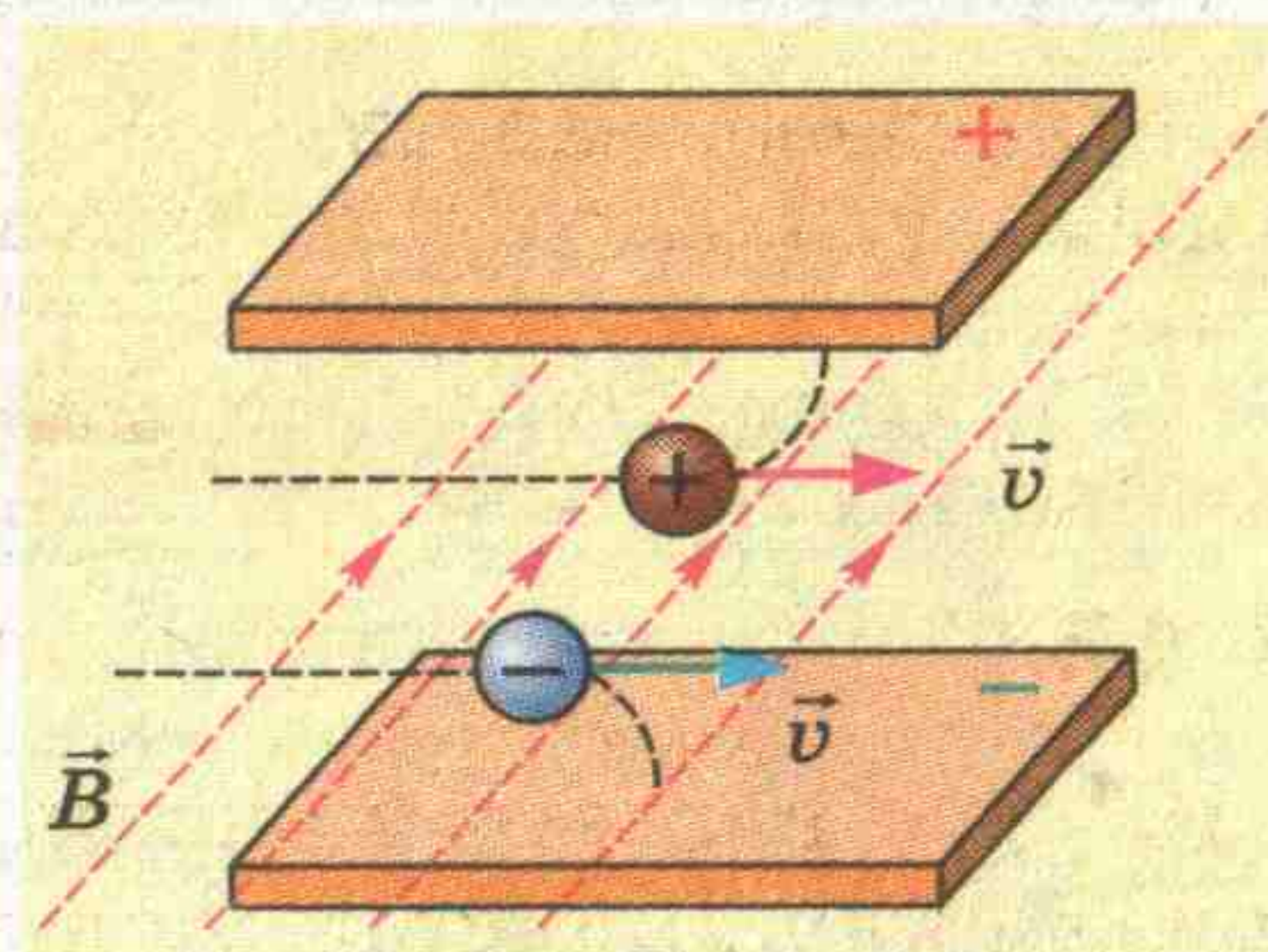


Рис. 2.17. Схема, объясняющая действие МГД-генератора

Вследствие действия силы Лоренца ионы отклоняются от прежнего направления движения и оседают на специальных электродах, сообщая им определенный заряд. Полученную при этом разность потенциалов можно использовать для получения электрического тока. Такие установки в будущем могут существенно повысить КПД тепловых электростанций за счет выработки дополнительной электроэнергии при прохождении газов, которые после

выхода из топки имеют довольно высокую температуру и высокую ионизацию, через МГД-генераторы.

**Задача.** Электрон влетает в однородное магнитное поле с индукцией  $10^{-4}$  Тл перпендикулярно к линиям магнитной индукции. Его скорость  $1,6 \cdot 10^6$  м/с. Найти радиус окружности, по которой движется электрон.

92

Д а н о :

$$B = 10^{-4} \text{ Тл,}$$

$$v = 1,6 \cdot 10^6 \text{ м/с,}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл,}$$

$$\alpha = 90^\circ.$$

$R = ?$

Р е ш е н и е

Сила Лоренца в данном случае действует под прямым углом к скорости движения электрона, не изменяя его скорости. Поэтому она придает электрону центростремительное ускорение. Таким образом, можно записать:

$$evB = \frac{mv^2}{R}.$$

Отсюда

$$R = \frac{mv}{eB}.$$

Подставим значения физических величин:

$$R = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 1,6 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 10^{-4} \text{ Тл}} = 9,1 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

**Ответ:** электрон будет двигаться по круговой орбите, радиус которой  $9,1 \cdot 10^{-2}$  м.

1. В чем физический смысл силы Лоренца?
2. Какова связь между силой Ампера и силой Лоренца?
3. Как получить формулу для расчета магнитной составляющей силы Лоренца?



4. Как применять правило левой руки для определения направления силы Лоренца для разноименно заряженных частиц?
5. Как движется заряженная частица в магнитном поле, если:  
а)  $\alpha = 90^\circ$ ; б)  $\alpha = 0$ ; в)  $0 < \alpha < 90^\circ$ ?



### Упражнение 13

1. В магнитное поле со скоростью  $10^3$  м/с влетает положительно заряженная частица. Определить силу Лоренца, если заряд частицы  $2e$ , а магнитная индукция  $0,2$  Тл.

2. С какой скоростью влетает в магнитное поле протон, если на него действует сила Лоренца  $2 \cdot 10^{-12}$  Н? Магнитная индукция поля  $0,4$  Тл.

3. Пылинка, заряд которой  $1$  мкКл, а масса  $1$  мг, влетает в однородное магнитное поле и движется по окружности. Определить период движения частицы, если модуль магнитной индукции равен  $1$  Тл.

4\*. Шарик, масса которого  $0,5$  г, а заряд  $2$  мкКл, движется в однородном магнитном поле перпендикулярно к линиям индукции со скоростью  $10$  м/с на неизменном расстоянии от поверхности Земли. Найти модуль вектора магнитной индукции.

5\*. Заряженная частица с очень малой массой движется со скоростью  $25$  м/с в однородных электрическом и магнитном полях, линии которых взаимно перпендикулярны. Найти отношение модуля вектора магнитной индукции к модулю вектора напряженности электрического поля, если вектор скорости перпендикулярен к этим векторам.

6\*. Электрон движется в магнитном поле, индукция которого  $2$  мТл, радиус винтовой линии равен  $2$  см, а шаг винта —  $5$  см. Найти скорость электрона.

## § 30. Магнитные свойства вещества

Многочисленные опыты показывают, что магнитное поле взаимодействует со всеми без исключения веществами, изменяя их физические и химические свойства. Проявления этого взаимодействия могут быть различными.

Возьмем мощный электромагнит с коническими полюсными наконечниками, расположим между полюсами висмутовый шарик, уравновешенный на небольших весах (рис. 2.18). При замыкании цепи питания электромагнита равновесие нарушится: шарик выйдет из магнитного поля.

Расположим горящую свечу так, чтобы ее пламя было между полюсами магнита. Замкнув цепь питания магнита, увидим, что пламя выталкивается из магнитного поля (рис. 2.19).



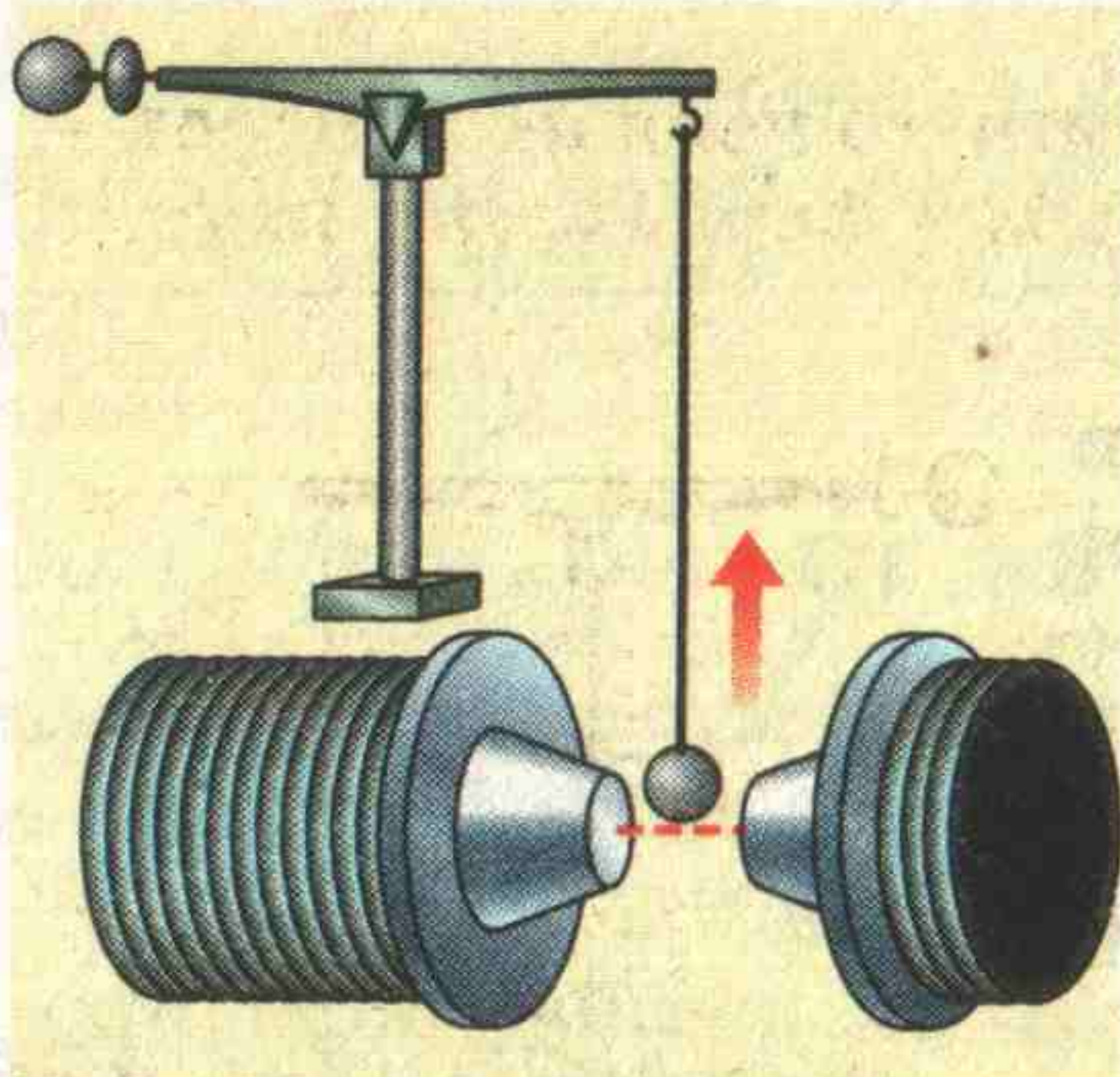


Рис. 2.18. Шарик из висмута выталкивается в область поля с меньшей магнитной индукцией

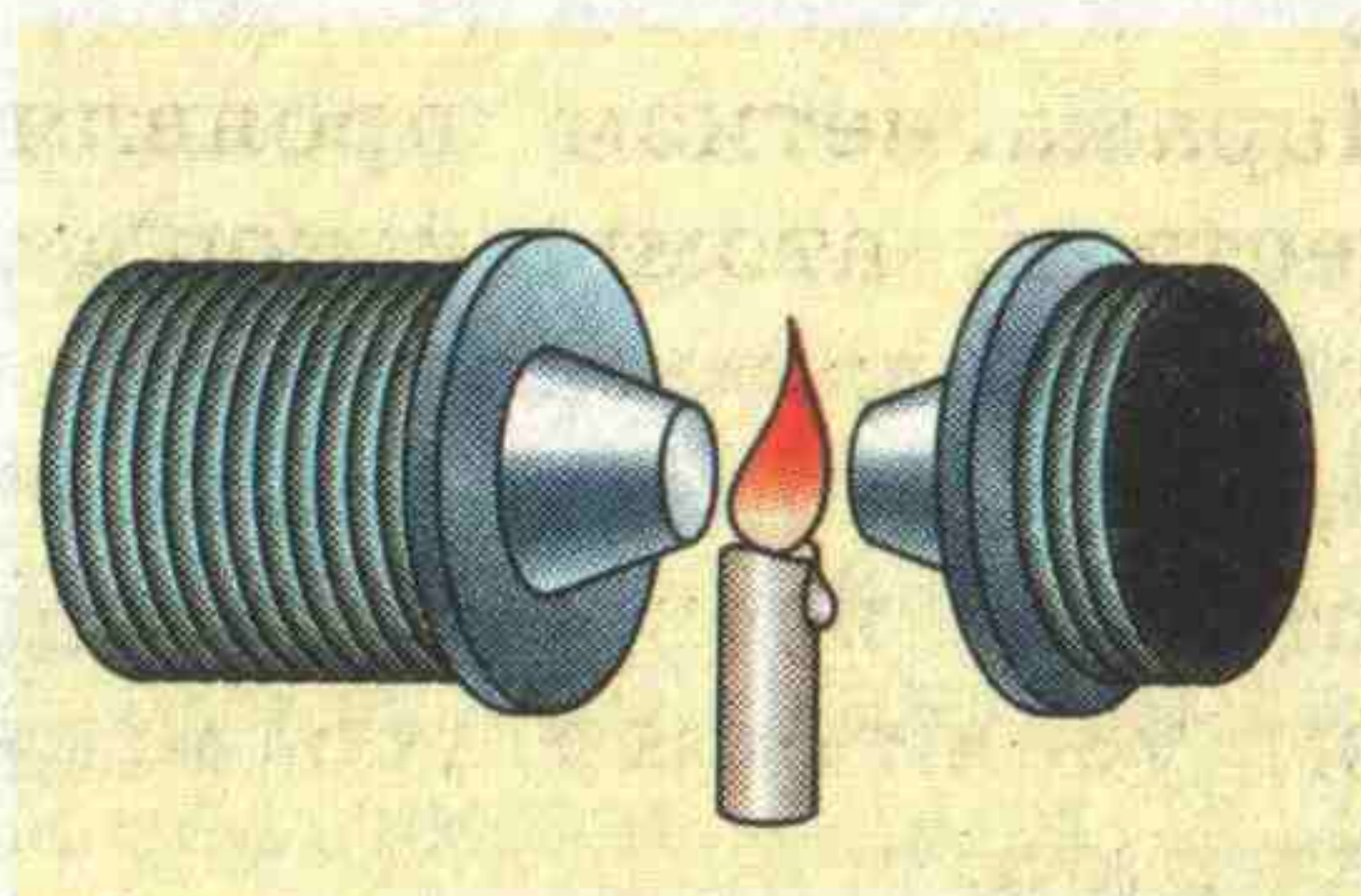


Рис. 2.19. Пламя горящей свечи выталкивается в область поля с меньшей магнитной индукцией

94

Описанные выше явления наблюдал еще в XIX в. М. Фарадей, который назвал их диамагнитными, а вещества, с которыми происходили такие явления, – *диамагнетиками*.

Тщательные исследования диамагнитных явлений показали, что магнитная индукция в диамагнетике меньше, чем



$$B_d < B_0.$$

магнитная индукция внешнего поля:  $B_d < B_0$ . Такой эффект объясняется изменениями, которые происходят в атомах диамагнетика

при внесении вещества в магнитное поле, поэтому этот эффект наблюдается у всех веществ.



**Вещества, у которых наблюдается диамагнитный эффект, называются диамагнетиками.**

Влияние вещества на магнитное поле описывает физическая величина, которая называется *магнитной проницаемостью*. Она определяется как отношение магнитной индукции в веществе  $B$  к магнитной индукции вне вещества  $B_0$ :

$$\mu = \frac{B}{B_0}.$$

Магнитная проницаемость – величина безразмерная. Для диамагнетика она несколько меньше единицы.

Если над полюсными наконечниками уравновесить на весах алюминиевый шарик, то при замыкании цепи питания он будет втягиваться в пространство между наконечниками, где индукция поля больше (рис. 2.20).

Такие явления называют парамагнитными, а сами вещества – *парамагнетиками*. Для парамагнетиков  $B_p > B_0$ .



**Взаимодействия вещества и магнитного поля проявляются как диамагнетизм, парамагнетизм и ферромагнетизм.**

Парамагнетизм проявляется в веществах, атомы которых, имея собственное поле, словно магнитные стрелочки, поворачиваются под действием внешнего магнитного поля, увеличивая его магнитную индукцию.

Большинство веществ принадлежат к диамагнетикам или парамагнетикам, являясь слабомагнитными веществами. Анализируя значения их магнитных проницаемостей, можно заметить, что она как у парамагнетиков, так и у диамагнетиков мало отличается от единицы. По-

этому диамагнетизм и парамагнетизм в большинстве случаев не влияют существенно на магнитные свойства среды.

Однако есть вещества, которые весьма заметно взаимодействуют с магнитным полем. Их называют *ферромагнетиками*.

Типичным признаком ферромагнетика является аномально большое значение магнитной проницаемости. Так, чистое железо после длительного отжига в атмосфере водорода имеет магнитную проницаемость до 340 000. Это значит, что этот ферромагнетик усиливает магнитное поле в 340 000 раз.

Большая магнитная проницаемость ферромагнетиков объясняется особенностями их кристаллической структуры. Имея некоторые особенности в застройке электронных орбит, атомы ферромагнетика объединяются так, что все вещество делится на отдельные участки – домены.

Домены – это участки ферромагнетика, в которых атомы расположены упорядоченно. Такая область-домен напоминает маленький магнит. Он имеет свое собственное поле как результат сложения магнитных полей всех атомов, которые входят в домен, он взаимодействует с внешним магнитным полем.

Магнитные поля всех доменов в ненамагниченном ферромагнетике компенсируют друг друга. Если же ферромагнетик внести в магнитное поле внешнего источника, то произойдет перестройка доменов. При этом не только смещаются границы доменов, но и скачкообразно происходит изменение направления магнитной индукции каждого домена отдельно. Одни домены увеличиваются, другие – уменьшаются. Уменьшаются

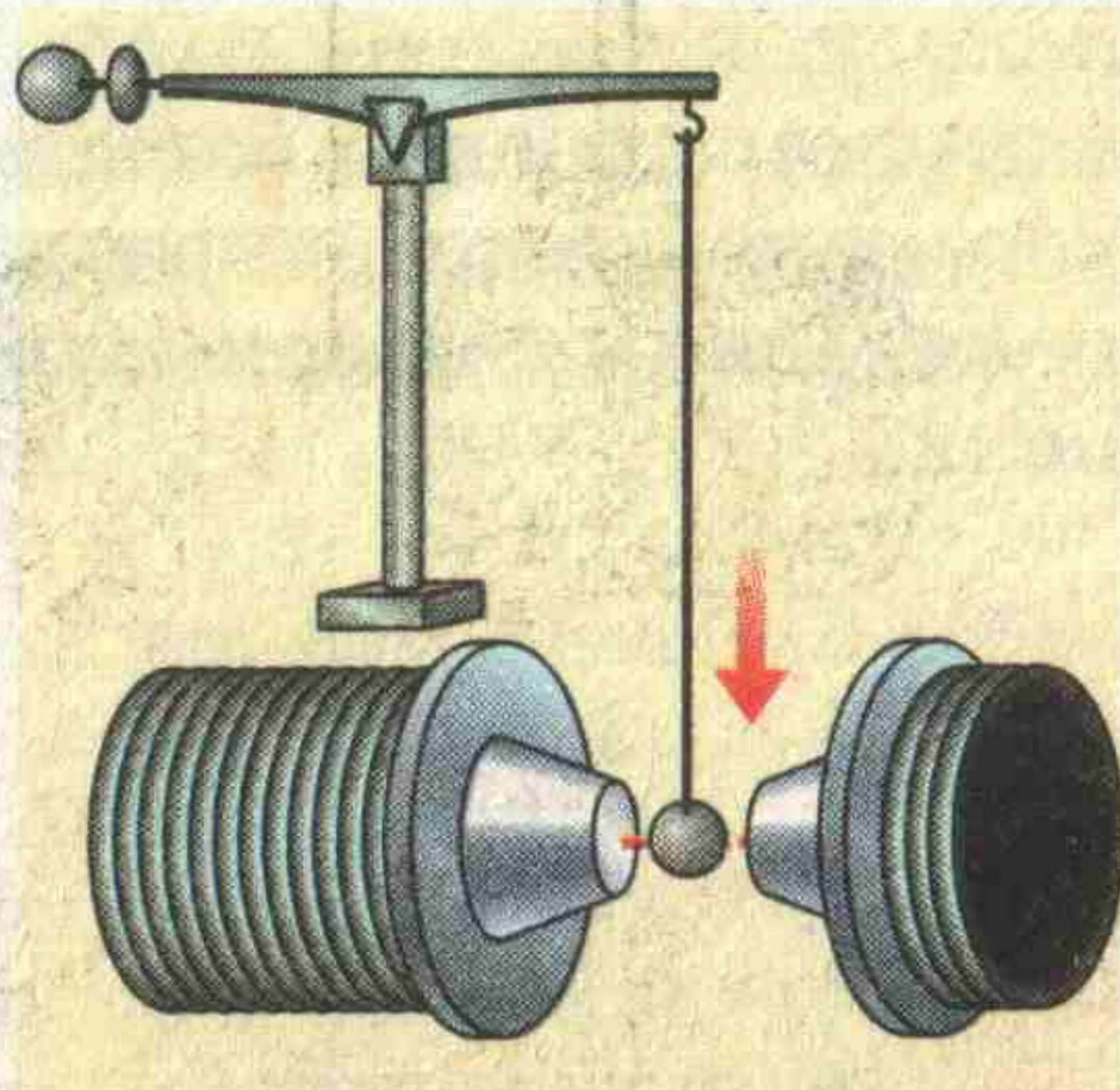



Рис. 2.20. Алюминиевый шарик втягивается в магнитное поле



домены, магнитная индукция полей которых образует тупой угол с магнитной индукцией внешнего поля, а увеличиваются те, у которых этот угол острый или равен нулю. При определенном значении магнитной индукции внешнего магнитного поля в ферромагнетике появляется насыщение: все домены сливаются в один большой домен, магнитная индукция которого совпадает с направлением магнитной индукции внешнего поля. Таким образом происходит большое усиление магнитного поля.

- 
1. Почему можно утверждать, что «магнитны» все вещества?
  2. Одинаково ли взаимодействуют различные вещества с магнитным полем?
  3. Какие вещества называют диамагнетиками?
  4. Как влияют на магнитное поле диамагнетики?
  5. Что описывает магнитная проницаемость?
  6. Какие вещества называют парамагнитными?
  7. Как изменяют магнитное поле парамагнетики?
  8. Как по магнитной проницаемости определить, к какому классу принадлежит данное вещество по его магнитным свойствам?
  9. Какие вещества принадлежат к ферромагнетикам?
  10. Какой основной признак ферромагнетика?

## § 31. Свойства ферромагнетиков



Многие специфические свойства ферромагнетиков являются производными от их кристаллической структуры. При внесении ферромагнетика в магнитное поле физические изменения в них происходят на уровне кристаллической решетки. Поэтому они имеют специфические свойства и составляют отдельный класс.

Типичным свойством ферромагнетиков является нелинейность процесса их намагничивания. Если ферромагнетик внести в магнитное поле и начать постепенно увеличивать магнитную индукцию этого поля, то магнитная индукция в ферромагнетике не будет увеличиваться пропорционально (рис. 2.21). При постепенном увеличении магнитной индукции внешнего поля магнитная индукция в ферромагнетике сначала увеличивается медленно, потом — быстрее, а потом снова возрастание уменьшается. При достижении состояния насыщения (точка А) магнитная индукция в ферромагнетике возрастает линейно.

Из такого сложного характера намагничивания можно сделать вывод, что магнитная проницаемость ферромагнетиков не является постоянной величиной.



Для ферромагнетиков характерно свойство, называемое гистерезисом. Сущность его в том, что процессы намагничивания и размагничивания проходят не одинаково. Ферромагнетик, находившийся в магнитном поле, сохраняет определенную намагниченность даже тогда, когда это поле исчезло. При перемагничивании ферромагнетика в магнитном поле переменного тока график перемагничивания имеет сложный характер (рис. 2.22). Поэтому этот график называют *петлей гистерезиса*.

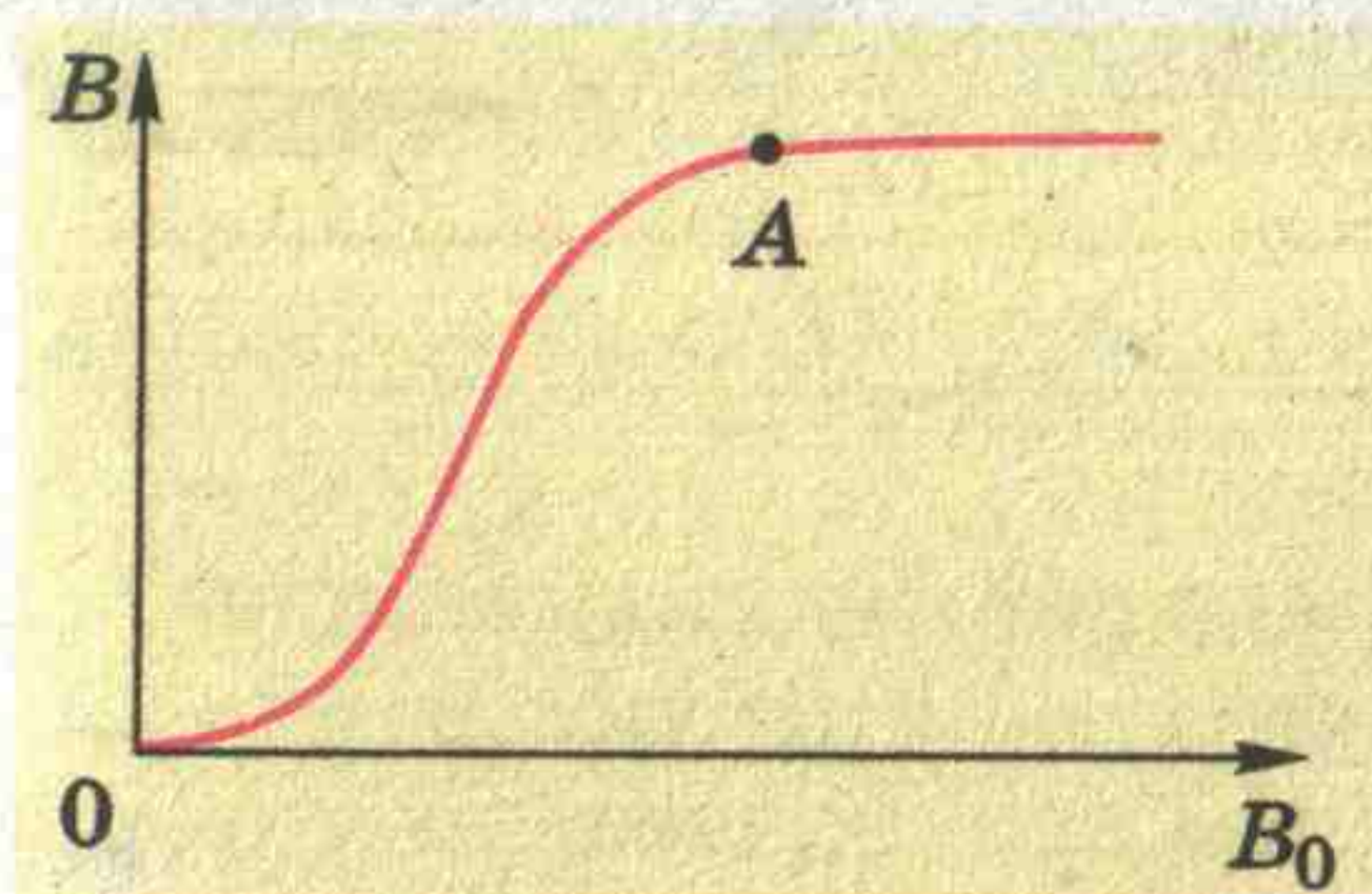


Рис. 2.21. График процесса намагничивания ферромагнетика

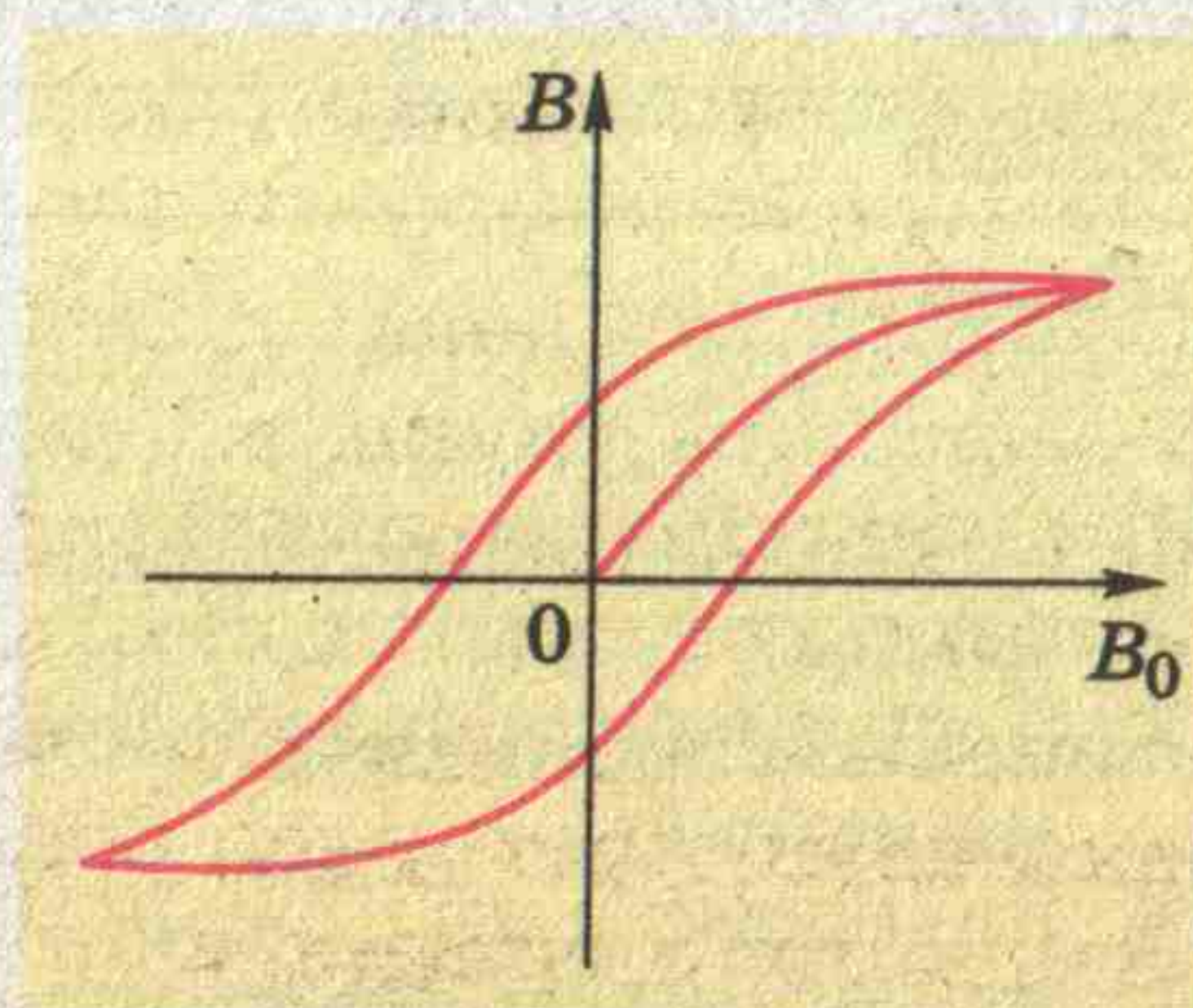


Рис. 2.22. Петля гистерезиса

Форма петли гистерезиса для различных сортов стали бывает разной. Для многих сталей высота петли намного больше ширины. Такие материалы называют *магнитно мягкими*. Они быстро намагничиваются и размагничиваются. Поэтому применяются в электротехнических устройствах, работающих на переменном токе.

Если ширина петли гистерезиса соразмерна с высотой, то ферромагнетик называют *жестким*.

Кристаллическая структура ферромагнетика зависит от температуры. Поэтому при изменении температуры изменяются и магнитные свойства ферромагнетика.

В подтверждение этого поднесем к полюсу постоянного магнита никелевое кольцо. Поскольку никель ферромагнетик, то кольцо притянется к магниту и будет находиться некоторое время в этом состоянии (рис. 2.23). Если кольцо нагреть (например, от газовой горелки), то через некоторое время кольцо отпадет вследствие потери ферромагнитных свойств. Температуру, при которой исчезают ферромагнитные свойства, называют *точкой Кюри*. Значения точки Кюри у различных ферромагнетиков разные.

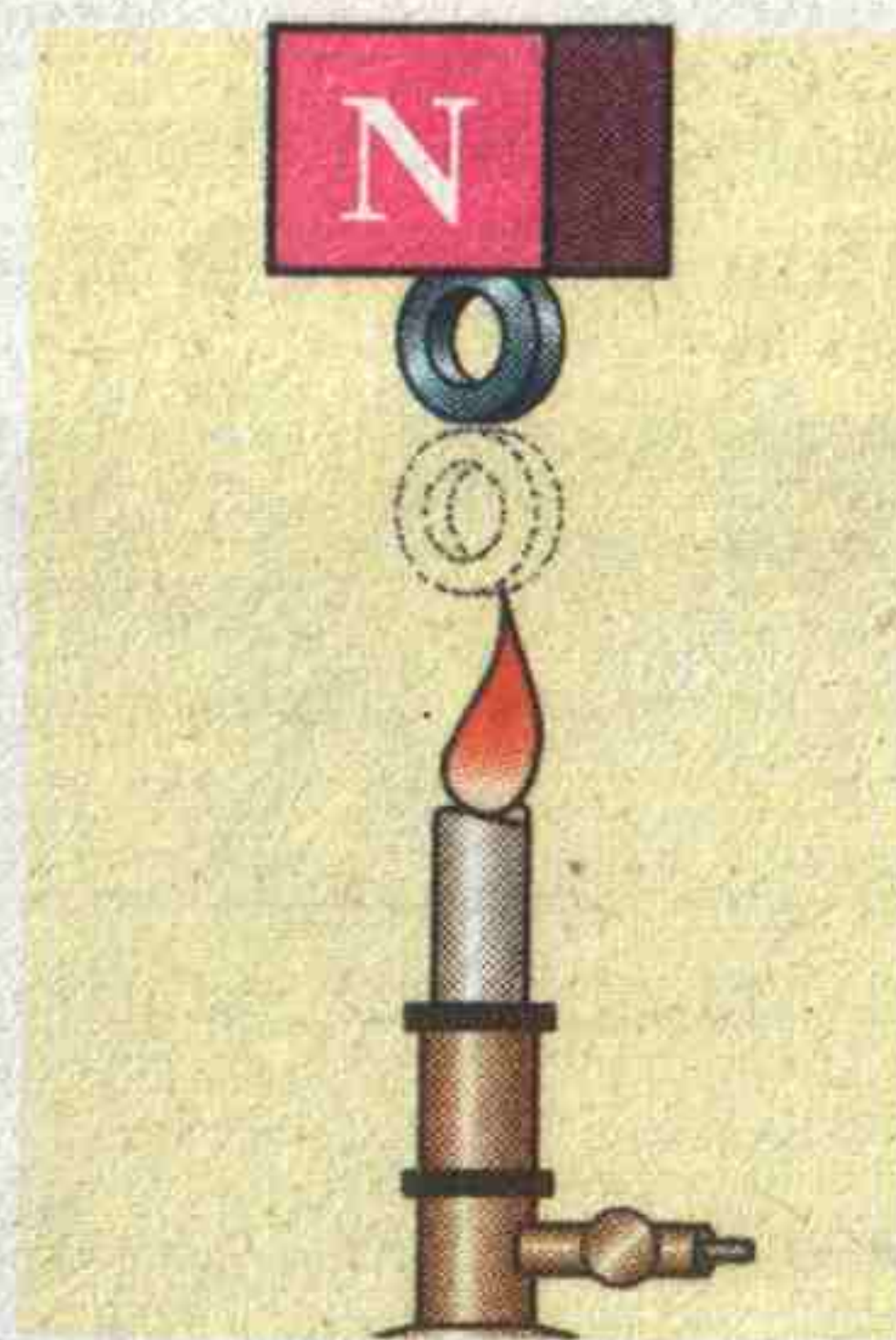


Рис. 2.23. Магнитные свойства ферромагнетиков зависят от температуры





Кристаллическая структура ферромагнетика зависит от температуры. Поэтому при изменении его температуры изменяются и его свойства.

Таблица

Вещество	Точка Кюри, °С
Железо	768
Никель	358
Кобальт	1120
Гадолиний	17

1. Почему ферромагнетики имеют специфические свойства?
2. Как происходит процесс намагничивания ферромагнетика?
3. Постоянно ли значение магнитной проницаемости у ферромагнетика?
4. Что происходит с ферромагнетиком при точке Кюри?
5. Как проявляется гистерезис у ферромагнетика?

## § 32. Использование магнитных свойств вещества

Во время взаимодействия вещества с магнитным полем изменяются не только магнитные, но и другие его свойства.

Одним из интересных примеров использования действия магнитного поля на вещество является «омагничивание» воды. Под действием магнитного поля она приобретает новые свойства.



Рис. 2.24. Электромагнитный кран

Такая вода не оставляет накипи в нагревательных водяных котлах, что позволяет использовать ее без дополнительной химической обработки. Бетон, замешанный на «омагниченной» воде, крепче, чем на обычной воде.

Явление усиления магнитного поля ферромагнетиками используется в различных электротехнических приборах: в электромагнитных кранах (рис. 2.24), в реле, в электродвигателях, в трансформаторах. Для этого используются специальные сорта стали.

Невозможно представить себе современную радиоэлектронику без



элементов из искусственных материалов – ферритов. Изготавливают их из материалов, имеющих высокое удельное сопротивление, что важно для высокочастотной техники. Из них изготавливают сердечники катушек колебательных контуров, магнитных антенн и трансформаторов. Широкое распространение приобрели постоянные ферритовые магниты.

**Все результаты взаимодействия магнитного поля и вещества нашли применение в практике.**

**При взаимодействии с магнитным полем меняются не только магнитные, но и другие свойства вещества – механические, тепловые, оптические и даже химические. Все эти явления используются человеком.**

Магнитное поле лечит злокачественные опухоли, позволяет исследовать внутренние органы человека, проникать в тайны многих болезней человека.

С магнитным полем связана жизнь всех живых организмов на Земле. Ученые выяснили, что перелетные птицы ориентируются в полете и поиске своих постоянных мест гнездования по магнитному полю Земли.

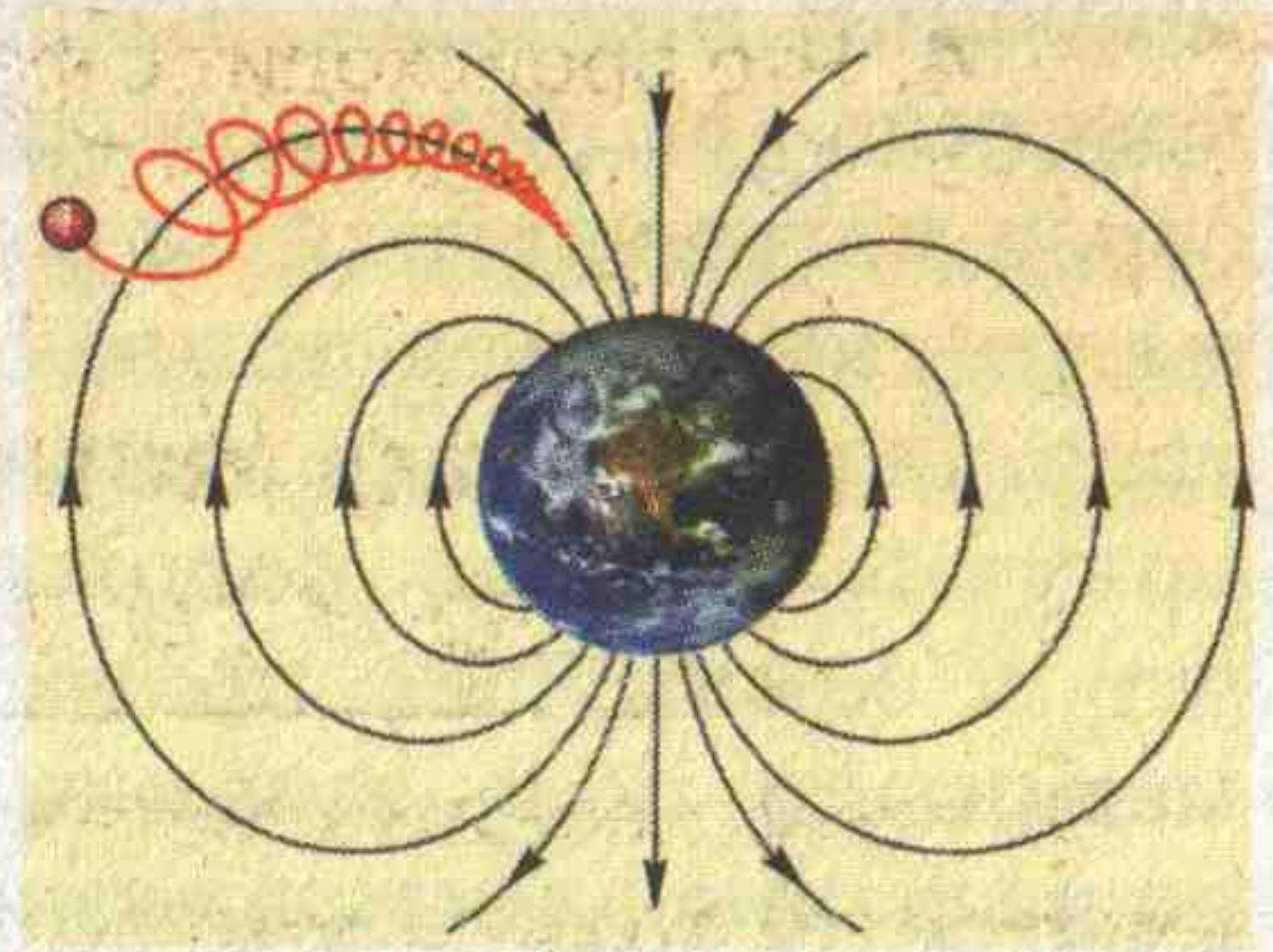


Рис. 2.25. Магнитное поле задерживает частицы космических лучей

**Магнитное поле охраняет жизнь на Земле от космических опасностей.**

На Землю из космоса поступает мощный поток быстрых частиц, которые в случае попадания в живой организм могут отрицательно воздействовать на него. Но в магнитном поле Земли на них действует сила Лоренца, защищающая жителей Земли от вредного влияния (рис. 2.25).

1. Какие свойства ферромагнетиков используются в электромагнитах?
2. Зачем воду «омагничивают»?



## § 33. Электромагнитная индукция

Неоценимая заслуга в изучении явления электромагнитной индукции принадлежит известному английскому физики М. Фарадею – непревзойденному мастеру проведения физического эксперимента.



**Фарадей Майкл (1791–1867)** – выдающийся английский физик, основоположник учения об электромагнитном поле, один из основателей электрохимии, исследователь взаимодействия вещества и магнитного поля.

100

Обнаружение в 1820 г. датским физиком Х. Эрстедом связи магнитного поля с электрическим током положило начало фундаментальным исследованиям открытого явления. Обладая широким научным кругозором, выдающийся физик и исследователь М. Фарадей предусмотрел возможность обратной связи магнитного поля и электрического тока, когда появление магнитного поля приводит к возникновению электрического тока. В результате длительных научных поисков он в 1821 г. получил первые положительные результаты: добился того, что в замкнутых проводниках, находящихся в переменном магнитном поле, возникал электрический ток. Явление получило название *электромагнитной индукции*, а ток, возникающий в проводниках, называли *индукционным*.



**Явление возникновения электрического тока в замкнутом проводнике, который расположен в переменном магнитном поле, называется электромагнитной индукцией.**

Опишем основные опыты М. Фарадея, которые можно повторить и на школьном оборудовании.

С клеммами гальванометра соединим длинный проводник, часть которого укреплена в штативе. Постоянный подковообразный магнит сначала будем приближать к проводнику, а потом удалять от него (рис. 2.26). При этом увидим, что стрелка гальванометра будет отклоняться сначала в одну сторону, потом – в противоположную.

Изменим условия опыта. Укрепим теперь подковообразный магнит в лапках штатива, а проводник, присоединенный к клеммам гальванометра, будем вводить в междуполусное пространство и выводить из него (рис. 2.27). Стрелка гальванометра также будет отклоняться сначала в одну, а потом в противоположную сторону.



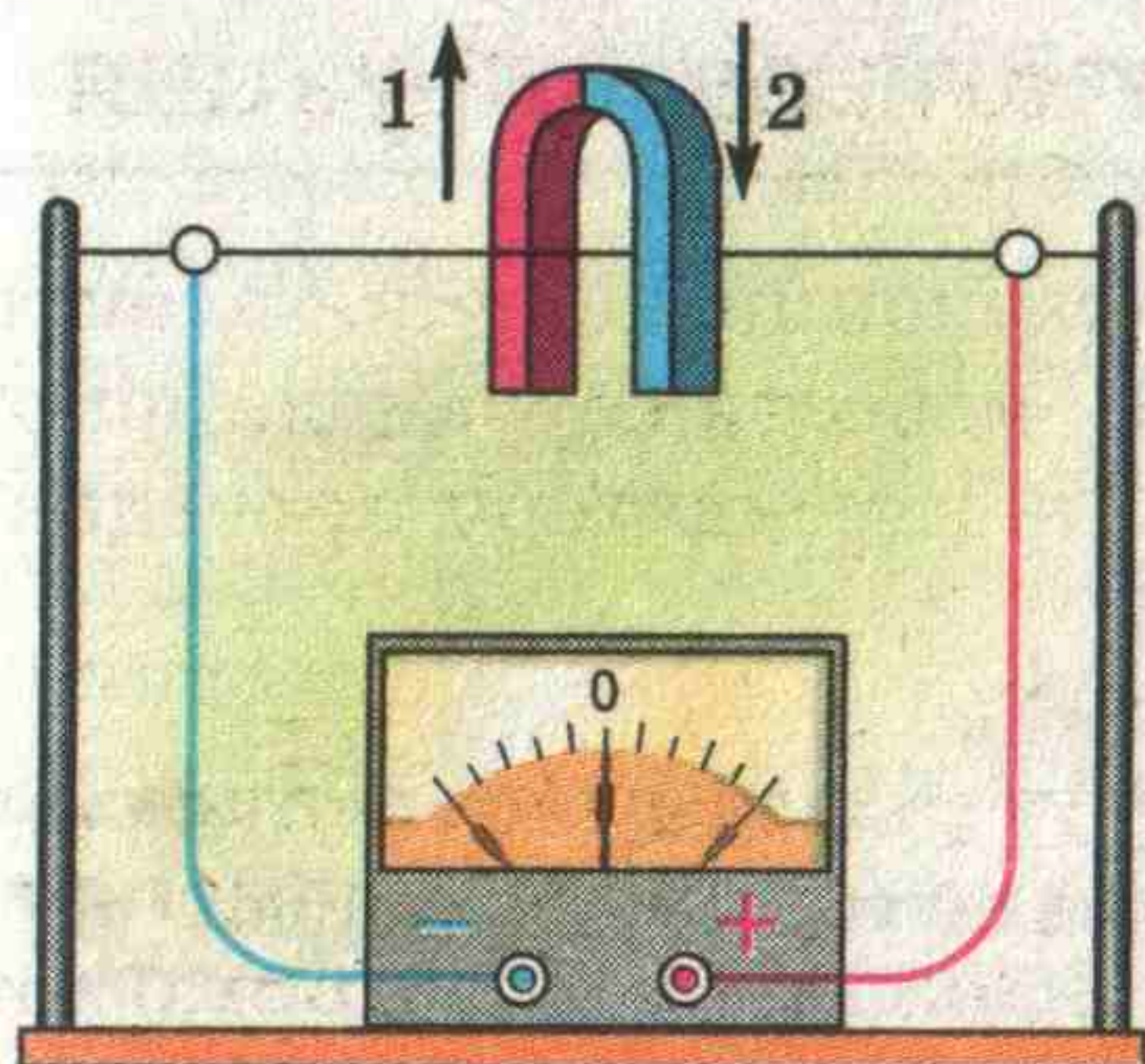


Рис. 2.26. Опыт с движущимся магнитом

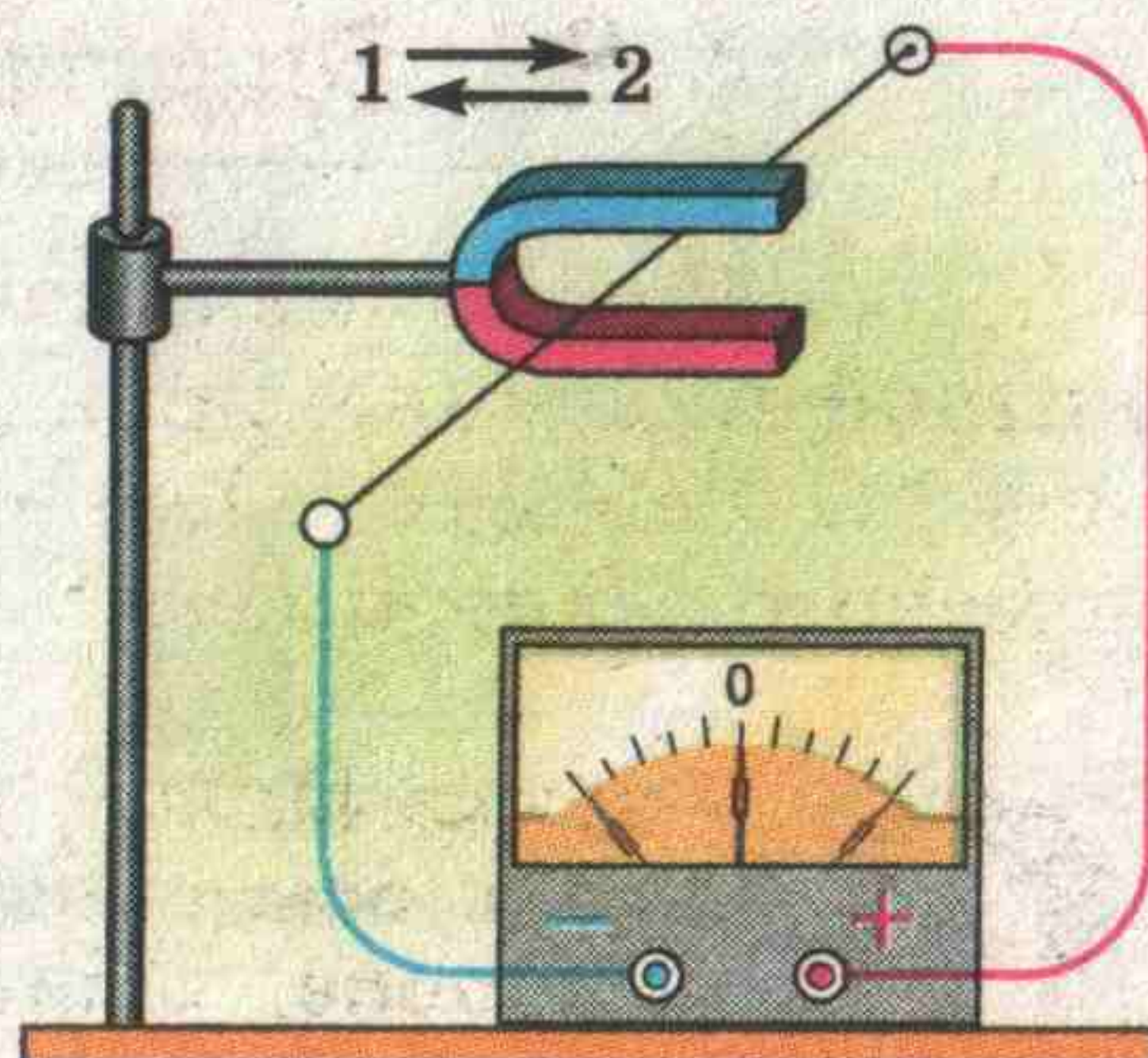


Рис. 2.27. Опыт с движущимся проводником

Видоизменим опыт. Одну из катушек присоединим к клеммам гальванометра, а вторую включим в электрическую цепь, состоящую из источника постоянного тока и выключателя. Замкнув цепь второй катушки, будем приближать ее к первой катушке (рис. 2.28). Отклонение стрелки гальванометра засвидетельствует появление тока в цепи первой катушки. Направление этого тока изменится, если вторую катушку удалять от первой. При неподвижных катушках ток будет отсутствовать.

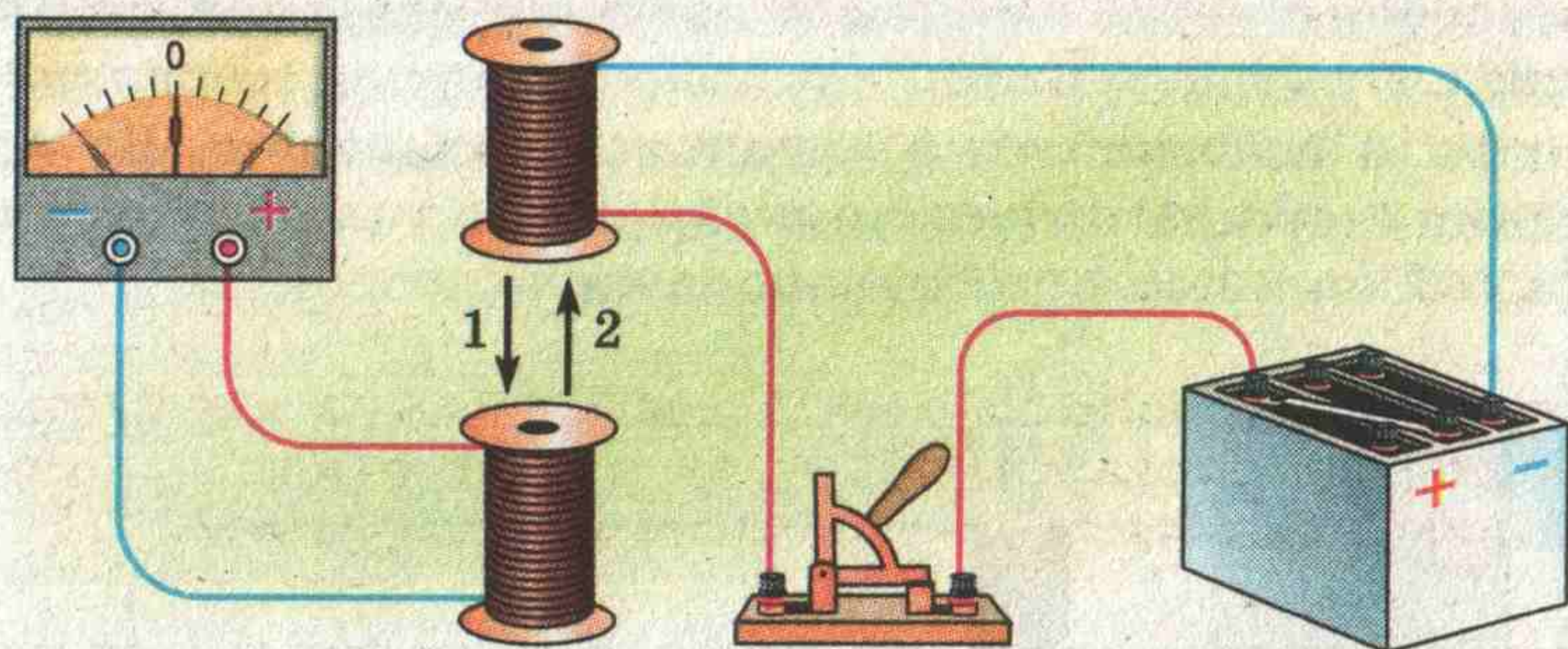


Рис. 2.28. Опыт с движущейся катушкой с током

Разместив вторую катушку неподвижно на первой, начнем замыкать и размыкать цепь второй катушки (рис. 2.29). Когда цепь будет замыкаться, стрелка гальванометра отклонится в одну сторону. При размыкании стрелка отклонится в противоположную сторону.

Изменим условия последнего опыта. Включим в цепь второй катушки реостат и снова замкнем цепь. Когда стрелка остановится на нулевом делении, начнем изменять силу тока, перемещая ползунок реостата (рис. 2.30).

При увеличении силы тока в цепи первой катушки стрелка гальванометра будет отклоняться в одну сторону. При уменьшении силы тока отклонение стрелки будет противоположным.



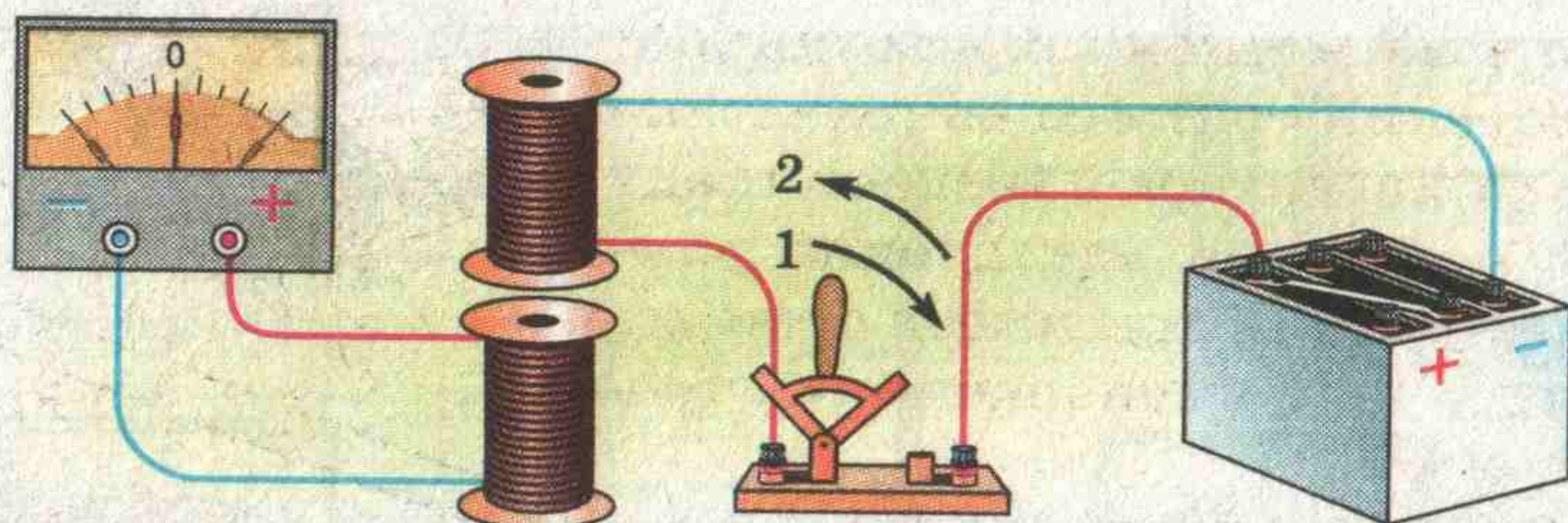


Рис. 2.29. Замыкание и размыкание цепи второй катушки

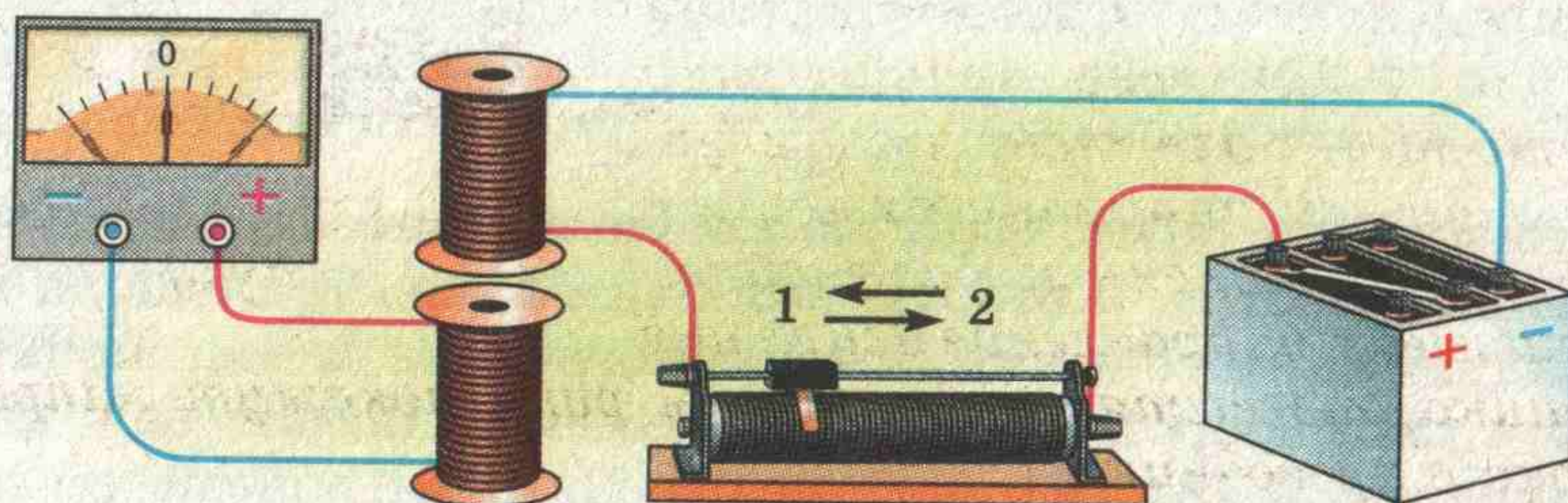


Рис. 2.30. Сила тока в катушке изменяется с помощью реостата

После этого, не изменяя положения катушек и не разрывая цепи второй катушки, введем в катушки стальной стержень (рис. 2.31). Стрелка и в этом случае отклонится от положения равновесия и возвратится в начальное положение. Во время вынимания стержня из катушки заметим, что стрелка гальванометра отклоняется в противоположную сторону.

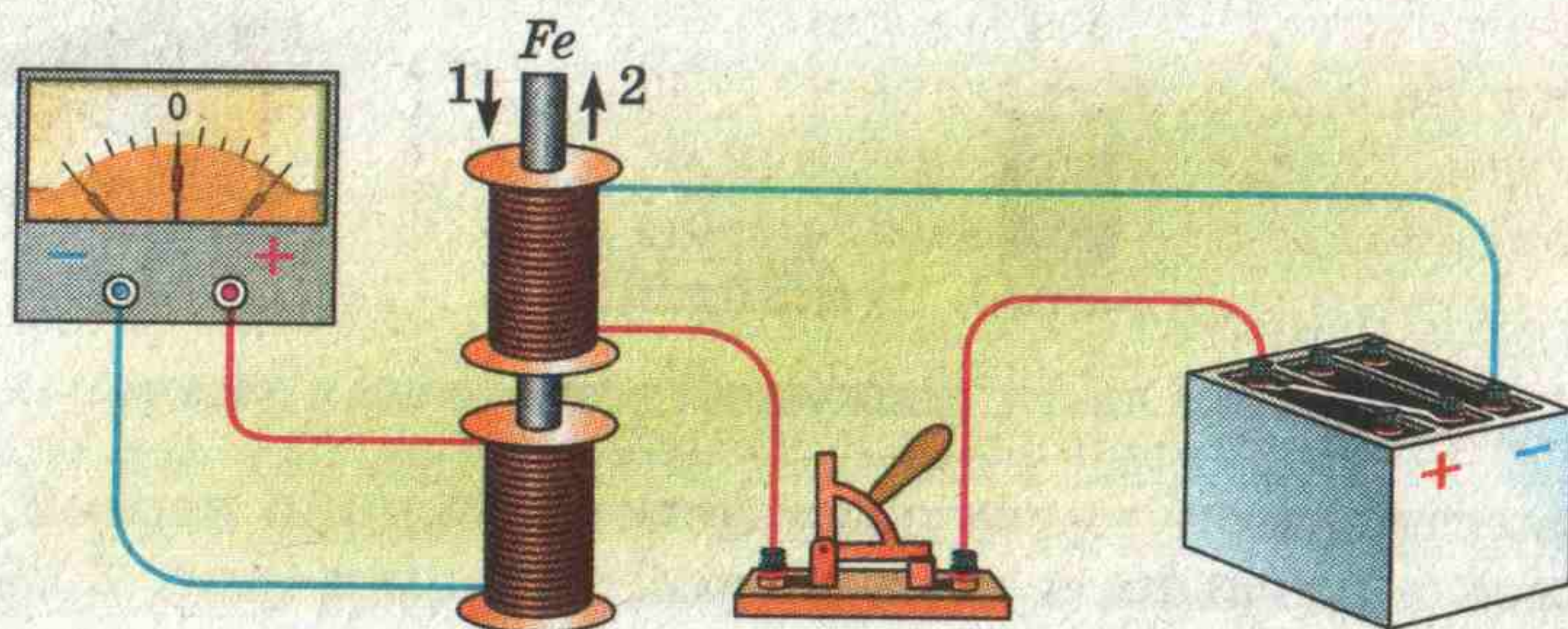


Рис. 2.31. Опыт, когда движется стальной стержень



**Электрический ток, возникающий в замкнутом проводнике в изменяющемся магнитном поле, называют индукционным.**

Результаты всех опытов свидетельствуют, что при любом изменении магнитного поля или движении замкнутого про-



водника в магнитном поле возникает электрический ток. Его направление зависит от характера изменения магнитного поля: при увеличении магнитной индукции ток имеет одно направление, при уменьшении – противоположное.

На практике направление тока в проводнике, который возникает вследствие электромагнитной индукции, определяют по **правилу правой руки** (рис. 2.32): если правую руку разместить в поле так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а отставленный большой палец показывал направление движения проводника, то вытянутые пальцы руки покажут направление тока в проводнике.

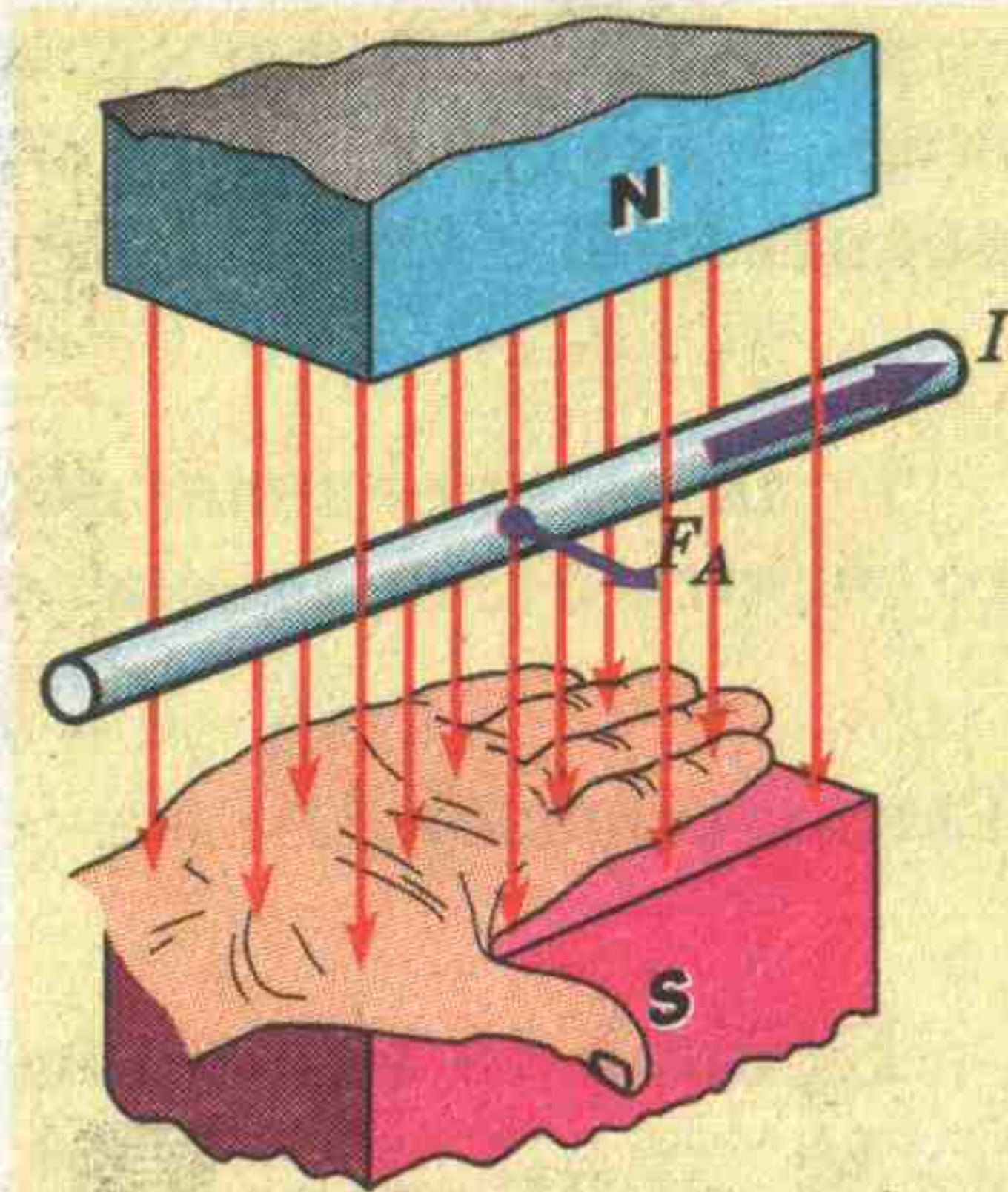


Рис. 2.32. Правило правой руки



Чтобы ток в проводниках протекал длительное время, необходимо, чтобы все это время существовала разность потенциалов. А это возможно при непрерывном движении проводника. При этом будет происходить разделение в проводнике положительно и отрицательно заряженных частиц под действием силы Лоренца, которая имеет неэлектростатическое происхождение. Это приводит к возникновению ЭДС индукции.

Определим способ расчета ЭДС для случая, когда прямой проводник, который является частью электрической цепи, равномерно движется в магнитном поле. Вызванное силой Лоренца движение заряженных частиц образует электрический ток, а в это время на него в магнитном поле будет действовать сила Ампера (рис. 2.33):

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

где  $B$  – модуль вектора магнитной индукции;  $I$  – сила тока в проводнике;  $l$  – длина проводника;  $\alpha$  – угол между направлением тока в проводнике и вектором магнитной индукции.

Возникающий ток в проводнике всегда будет иметь направление, при котором сила Ампера «тормозит» движение проводника. Чтобы проводник двигался равномерно (условие

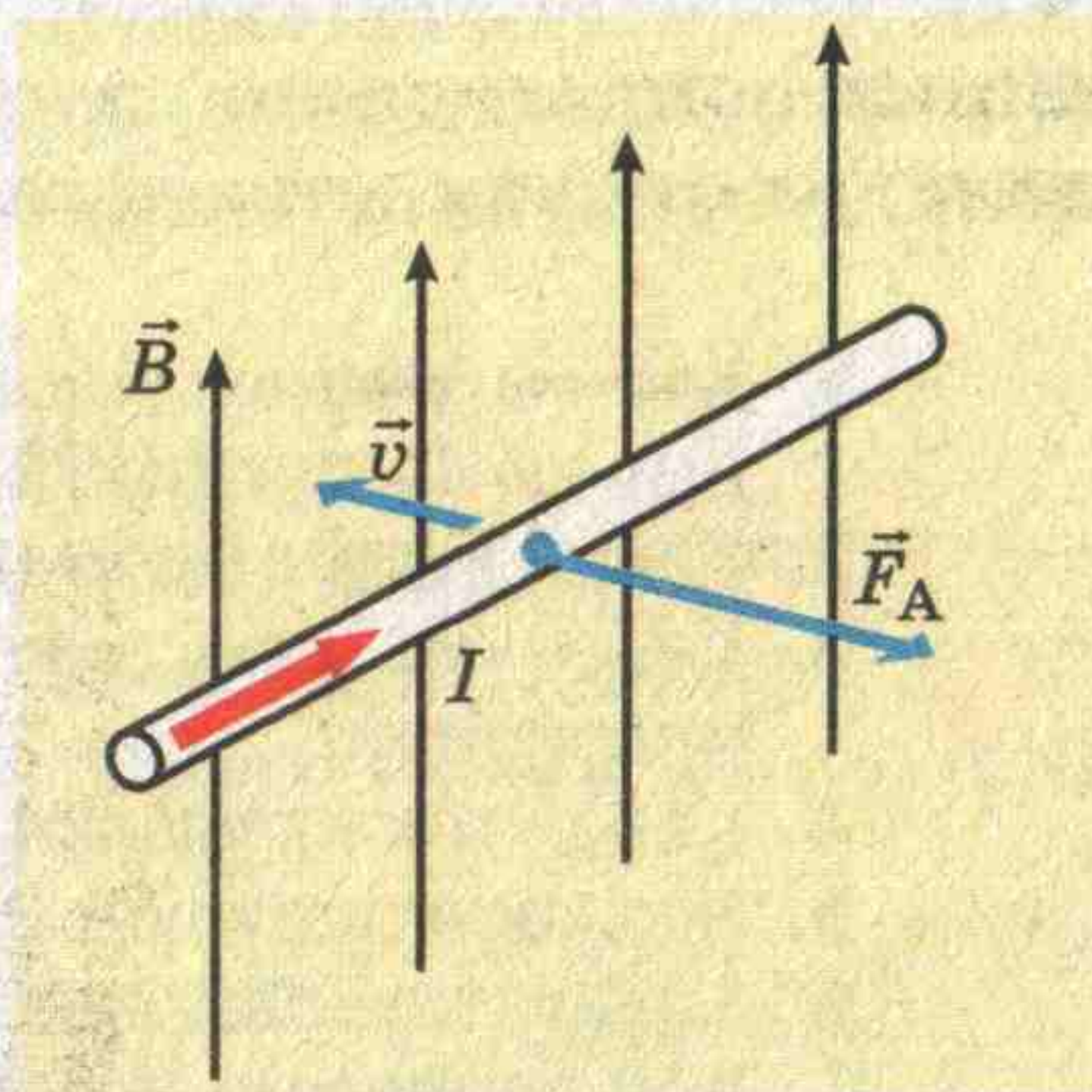


Рис. 2.33. К объяснению ЭДС индукции



существования электрического тока), к нему нужно приложить силу, которая по модулю равна силе Ампера, а по направлению – противоположна:

$$F = F_A.$$

Если за определенное время  $\Delta t$  проводник сместится на  $\Delta s$ , то работа будет равна

$$A = F\Delta s, \text{ или } A = F_A\Delta s.$$

Таким образом,

$$A = BIl\Delta s \sin \alpha.$$

Приняв во внимание, что по определению сила тока равна  $I = \frac{Q}{\Delta t}$ , а ЭДС равна  $\mathcal{E} = \frac{A}{Q}$ . И произведя определенные математические преобразования, получим

$$A = BQlv \sin \alpha,$$

$$\mathcal{E} = \frac{A}{Q} = \frac{BQlv \sin \alpha}{Q} = Blv \sin \alpha.$$

104



$$\mathcal{E} = Blv \sin \alpha$$

Таким образом, для случая, когда проводник движется равномерно в однородном магнитном поле, значение ЭДС индукции зависит от магнитной индукции поля, длины

прямого проводника и скорости его движения в магнитном поле, учитывая значение угла между  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$ .



1. Кто из ученых провел эффективные опыты по электромагнитной индукции?
2. Какой вывод можно сделать из описанных выше опытов?
3. Какое из описанных явлений является электромагнитной индукцией?
4. Какой ток называют индукционным?
5. Что характеризует ЭДС индукции?
6. Какая сила разделяет положительные и отрицательные заряды при движении прямого проводника в магнитном поле?
7. От чего зависит ЭДС индукции?

## Упражнение 14

1. Определить направление индукционного тока в проводниках на рисунке 2.34.

2. Определить ЭДС индукции в проводнике с активной частью длиной 0,25 м, который перемещается в однородном магнитном поле с индукцией 8 мТл со скоростью 5 м/с под углом  $30^\circ$  к вектору магнитной индукции.



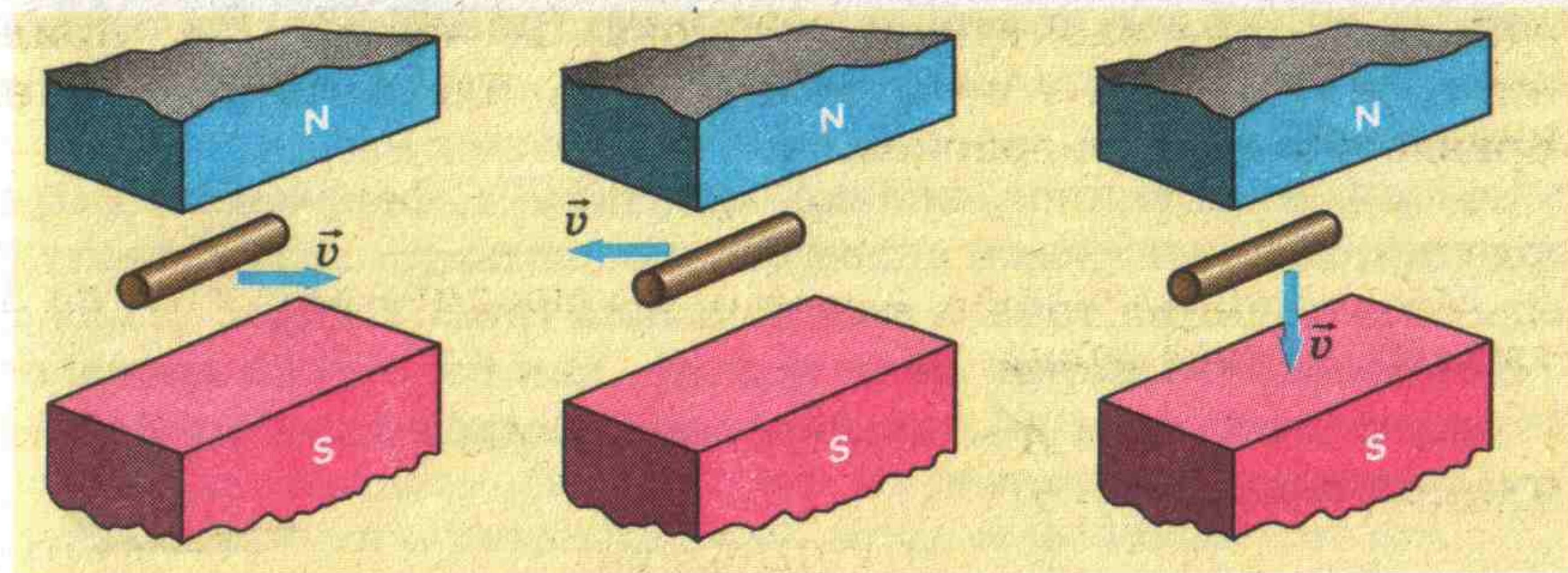


Рис. 2.34. К задаче 1

3. Две параллельные медные шины, расположенные вертикально на расстоянии 1 м друг от друга, замкнуты в верхней части резистором с сопротивлением 1 Ом и находятся в магнитном поле с индукцией 0,1 Тл, перпендикулярной к плоскости шин. Вдоль шин, касаясь их, начинает падать проводник массой 0,1 кг. Пренебрегая сопротивлением шин и проводника, трением проводника о рельсы, определить максимальную скорость проводника.

4. Горизонтальными рельсами, расположенными в вертикальном магнитном поле с индукцией  $10^{-5}$  Тл, движется проводник длиной 1 м с постоянной скоростью 10 м/с. Концы рельсов замкнуты проводником с сопротивлением 2 Ом. Какое количество теплоты выделится в этом проводнике за 1 с? Сопротивлением рельс и движущегося проводника пренебречь.

105

## § 34. Правило Ленца



Правило установлено известным русским физиком Э.Х. Ленцем как обобщение многочисленных опытов по определению направления индукционного тока. С этой целью Э.Х. Ленц исследовал взаимодействие замкнутого проводника и переменного магнитного поля, которое вызвало индукционный ток в этом проводнике.

Чтобы лучше понять сущность этого правила, рассмотрим опыт.

На легком горизонтальном рычаге, который имеет вертикальную ось вращения, находятся два легких металлических кольца, одно из

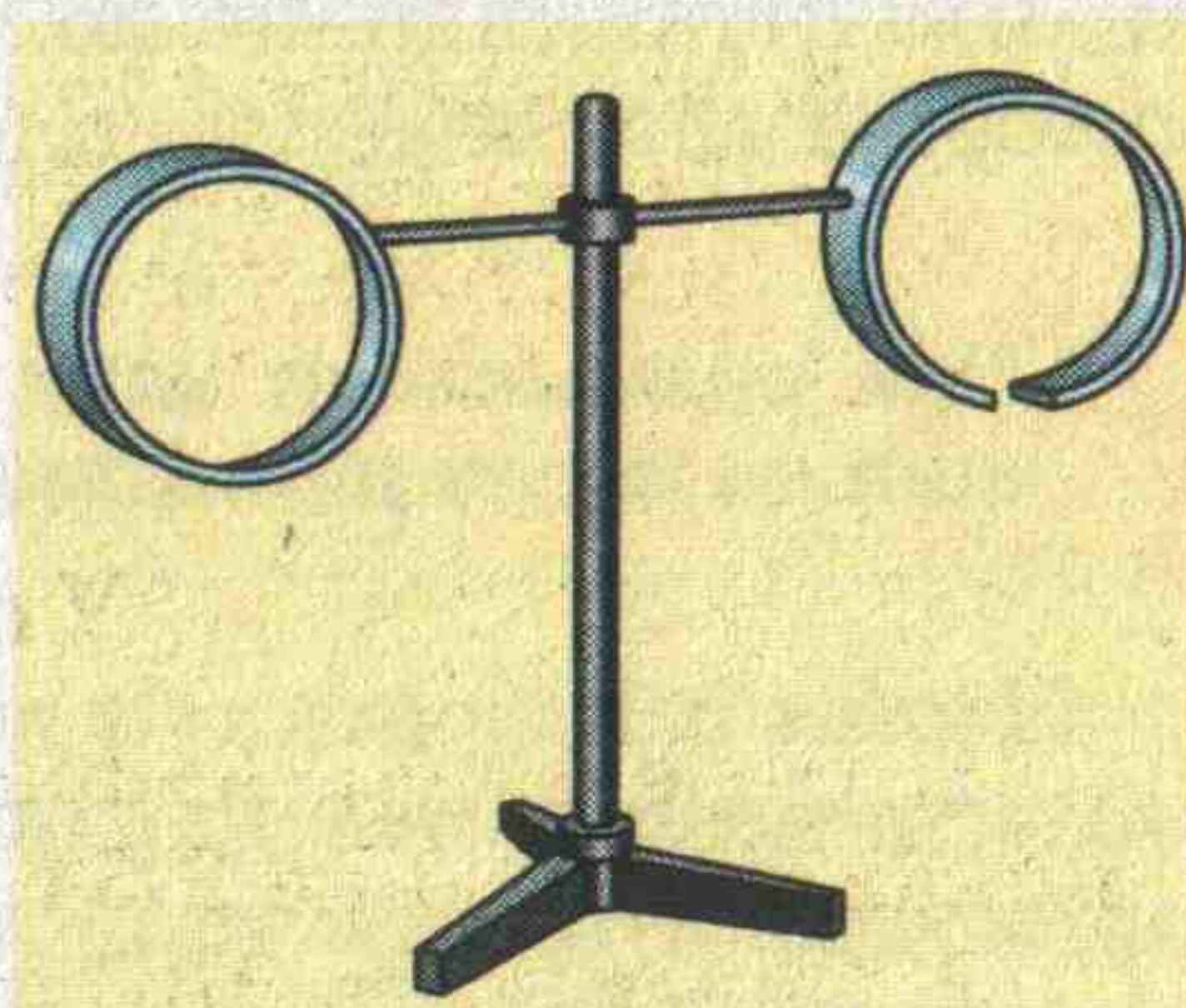


Рис. 2.35. Прибор для демонстрации правила Ленца



которых сплошное, а второе разрезано (рис. 2.35). Рычаг посажен на тонкое стальное острие так, чтобы трение было минимальным.

Введем в сплошное кольцо катушку с ферромагнитным сердечником (электромагнитом), включенным в электрическую цепь из источника тока и выключателя (рис. 2.36).

В момент замыкания цепи кольцо, как бы отталкиваясь от катушки, сместится на определенное расстояние и развернет рычаг на некоторый угол.

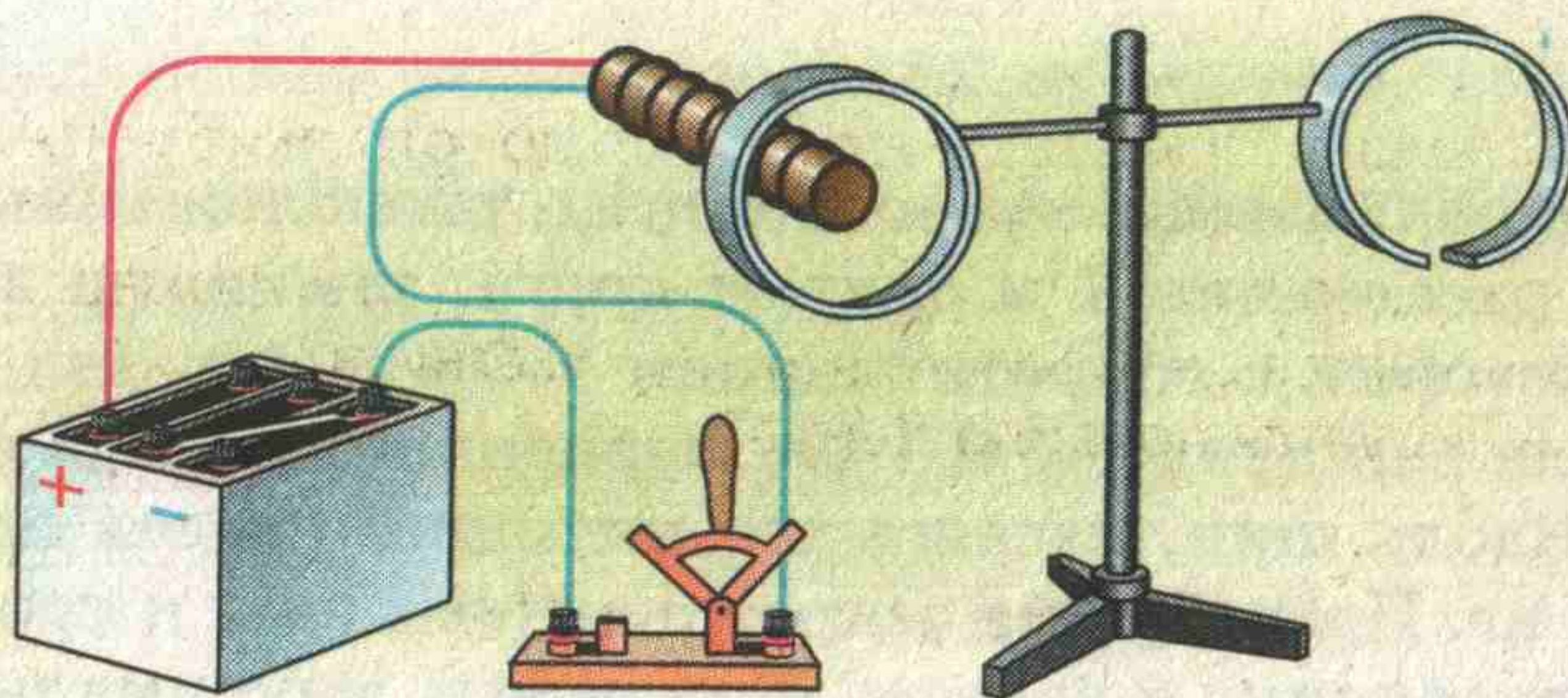


Рис. 2.36. К правилу Ленца

**В момент появления тока в электромагните электропроводное кольцо, находящееся возле полюса электромагнита, всегда притягивается к нему.**

Если опыт повторить, изменив направление тока в катушке, то будем наблюдать тот же эффект. Таким образом, определяющим в данном случае является не направление магнитной индукции, а характер изменения магнитной индукции.

Если опыт попытаться провести с разрезанным кольцом, то подобного эффекта наблюдать не сможем. Это свидетельствует, что отталкивание кольца связано с индукционным током, который возникает в сплошном кольце.

**При размыкании цепи питания электромагнита проводящее кольцо будет двигаться от него.**

Чтобы разобраться в дальнейших рассуждениях, необходимо вспомнить, что параллельные проводники, в которых ток проходит в одном направлении, притягиваются, а в противоположных — отталкиваются. Таким образом, если кольцо отталкивается от катушки, то в нем индуцируется ток, противоположный току в катушке по направлению. Взаимно



противоположными будут и магнитные индукции полей этих токов.

Обобщив результаты опытов, можно сделать выводы, к которым пришел Э.Х. Ленц: *магнитное поле индукционного тока всегда противодействует изменениям, которые вызвали этот ток.*

**Правило Ленца:** индукционный ток в замкнутом проводнике имеет такое направление, что его магнитное поле компенсирует изменение магнитного поля, которое вызвало этот ток.



1. Почему сплошное металлическое кольцо отталкивается от электромагнита в момент замыкания цепи?
2. Почему сплошное кольцо притягивается к электромагниту, когда размыкается цепь питания электромагнита?
3. Как формулируется правило Ленца?



### Упражнение 15

107

1. Почему колебания стрелки компаса затухают быстрее, если корпус латунный, и медленнее, если корпус пластмассовый?

2. Что происходит с диэлектрическим кольцом, если в него вводить постоянный магнит?

3. Прямой постоянный магнит свободно падает сквозь замкнутое металлическое кольцо. С каким ускорением он будет двигаться в кольце?

4. Если водитель трамвая на полном ходу выключит напряжение на входных клеммах двигателя и закоротит их, то вагон очень быстро остановится. Чем это можно объяснить?

5\*. В кольцо из сверхпроводника вносят постоянный магнит. Чему равен магнитный поток сквозь кольцо в момент внесения?

6\*. Сверхпроводящее кольцо висит поблизости от северного полюса постоянного магнита. Какое направление электрического тока в кольце?

## § 35. Магнитный поток

Электромагнитную индукцию можно наблюдать в двух случаях: когда проводник движется в однородном магнитном поле или неподвижный проводник находится в магнитном поле, магнитная индукция которого изменяется со временем. На практике, как правило, случается так, что одновременно изменяется магнитная индукция и положение проводника в магнитном поле. Примером может быть движение проводника



в неоднородном магнитном поле. Так как в этом случае расчеты сложнее, для их упрощения ввели физическую величину, которая одновременно зависит и от индукции магнитного поля, и от параметров движения проводника. Эта величина получила название *магнитного потока*.

Представим себе проводник в виде замкнутого кольца, которое находится в магнитном поле (рис. 2.38-а). Приведем кольцо в движение так, чтобы оно двигалось в плоскости, перпендикулярной к линиям магнитного поля. При этом количество линий индукции магнитного поля, которые проходят через него, будет уменьшаться, и в кольце возникнет индукционный ток (рис. 2.38-б).

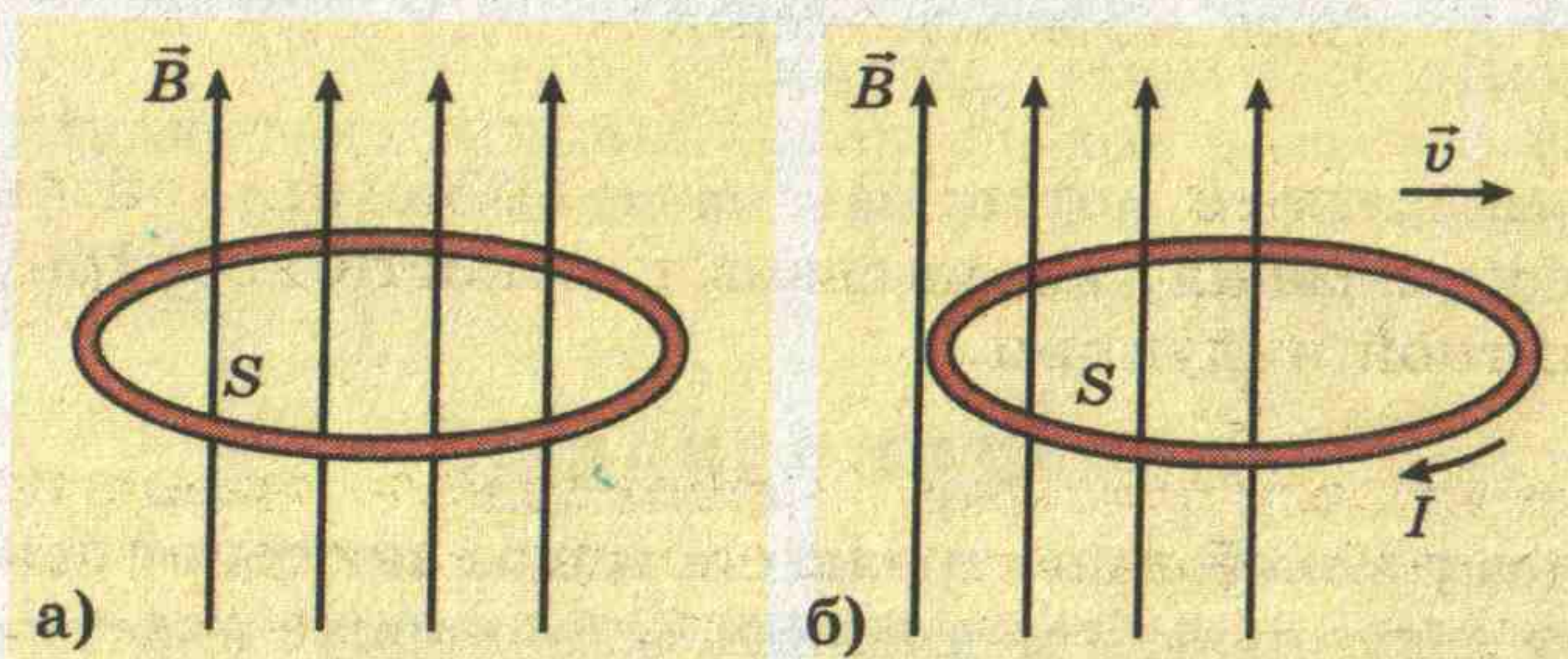


Рис. 2.38. Движение кольца в магнитном поле

Если теперь кольцо проводника поместить в магнитное поле, индукция которого изменяется, то количество линий магнитной индукции, которые проходят через контур, также будет изменяться и в проводнике возникнет индукционный ток (рис. 2.39).

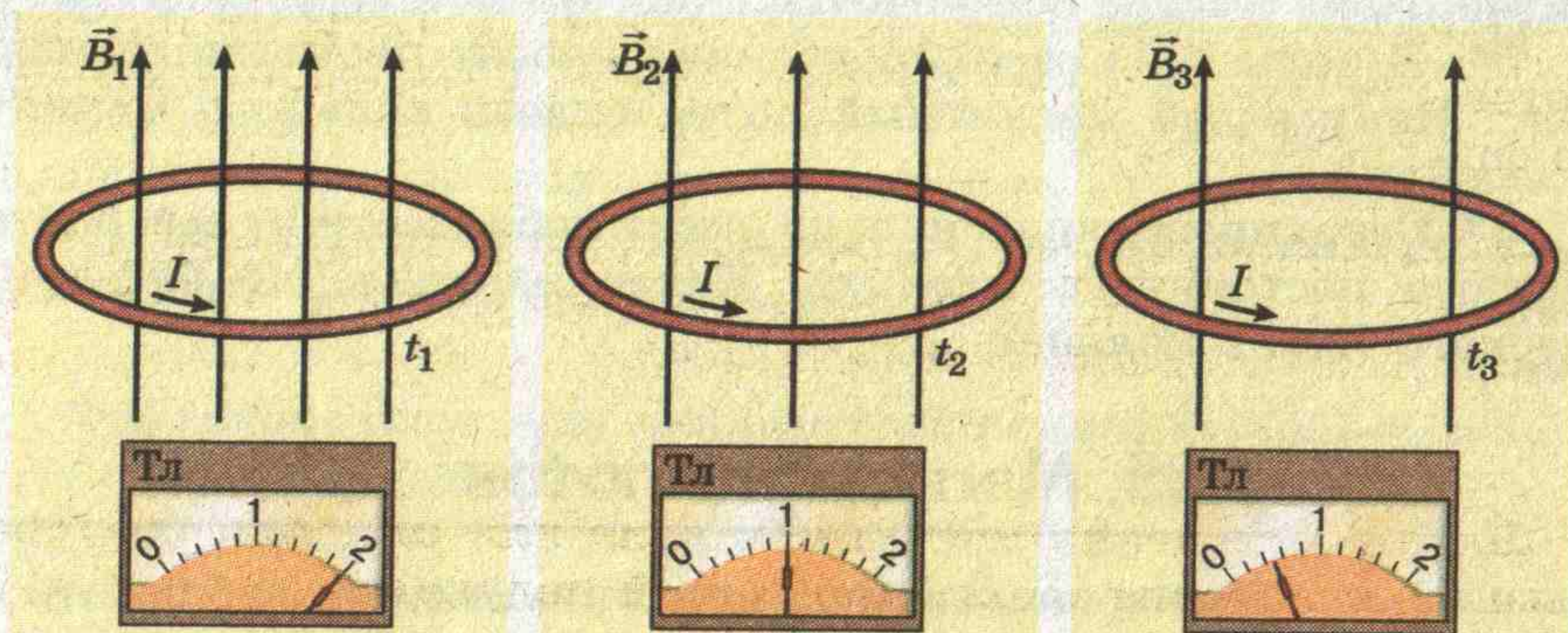


Рис. 2.39. Изменение магнитного потока через кольцо

Оба описанных случая можно объяснить проще, если для каждого из них учитывать произведение площади кольца на значение магнитной индукции магнитного поля. Именно это



произведение изменялось в обоих случаях. Фактически это произведение характеризовало поток линий магнитной индукции, которые пронизывают контур определенной площади, или просто – *магнитный поток*.

Магнитный поток  $\Phi$  зависит не только от модуля магнитной индукции и площади контура, но и от угла, который образуют нормаль с плоскостью контура и вектором магнитной индукции поля (рис. 2.40). Поэтому в общем виде значение магнитного потока записывается как

$$\Phi = BS \cos \alpha,$$

где  $\Phi$  – магнитный поток;  $B$  – модуль магнитной индукции поля;  $\alpha$  – угол между нормалью к плоскости контура и вектором магнитной индукции.

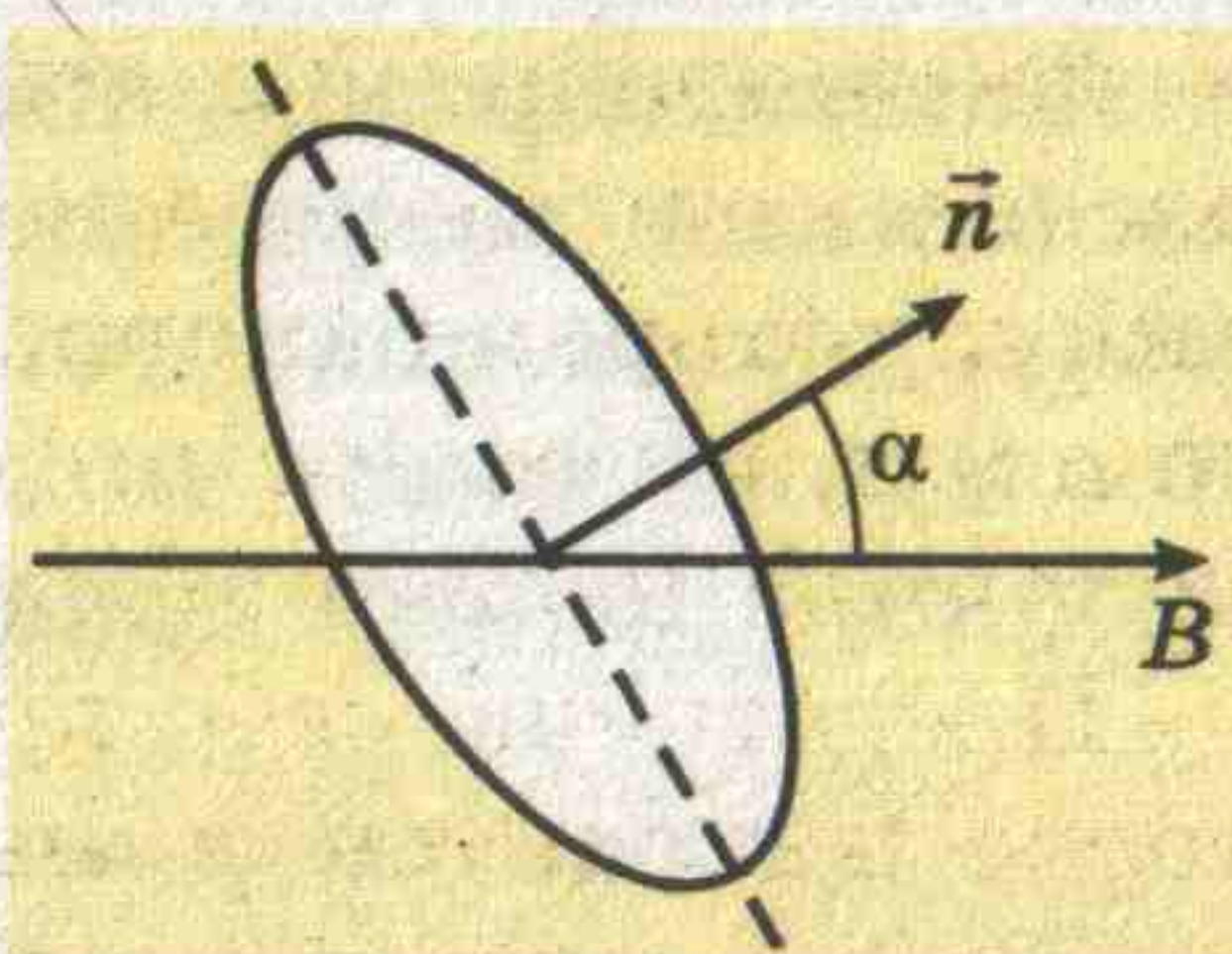


Рис. 2.40. К определению магнитного потока

Величина, которая описывает магнитное поле и равна произведению магнитной индукции на площадь замкнутого контура и косинус угла (между вектором магнитной индукции и нормалью к контуру), называется магнитным потоком, или потоком магнитной индукции.

Анализ формулы показывает, что минимальное значение магнитного потока ( $\Phi = 0$ ) будет тогда, когда  $\alpha = 90^\circ$ , т. е. плоскость контура параллельна линиям магнитного поля. Если  $\alpha = 0$ , то магнитный поток при всех равных условиях будет максимальным ( $\Phi = BS$ ).

Магнитный поток – скалярная величина. В СИ магнитный поток измеряется в *веберах* (Вб), на честь известного немецкого физика В. Вебера.

Если магнитная индукция магнитного поля 1 Тл, а площадь контура, сквозь который проходит магнитный поток, 1 м<sup>2</sup>, то магнитный поток равен 1 веберу (1 Вб):

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2.$$

Любые изменения магнитного поля или площади контура вызывают явление электромагнитной индукции.




Вебер Вильгельм Эдуард (1804–1891) – немецкий физик, основные работы посвящены электромагнетизму, работал также над проблемами акустики, теплоты, молекулярной физики, земного магнетизма.





Таким образом, любое изменение магнитного потока обуславливает возникновение электрического тока в замкнутом проводящем контуре. С учетом закона Ома для полной цепи последний вывод можно записать так: *любое изменение магнитного потока приводит к возникновению ЭДС индукции.*

- 
1. Какую физическую величину называют магнитным потоком?
  2. С какой целью введено понятие магнитного потока?
  3. Назовите единицы магнитного потока.
  4. От каких величин зависит магнитный поток?

### Упражнение 16

1. Какой магнитный поток проходит через поверхность площадью  $40 \text{ см}^2$ , если магнитная индукция поля составляет  $0,2 \text{ Тл}$ ?  $\angle \alpha = 90^\circ$
2. Стальной сердечник с площадью поперечного сечения  $20 \text{ см}^2$  пронизывает магнитный поток  $8 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$ . Какая магнитная индукция в сердечнике?

110

## § 36. Закон электромагнитной индукции

Проанализировав результаты экспериментальных исследований электромагнитной индукции, можно найти общую формулу для выражения особенностей этого явления, которые отражают сущность закона электромагнитной индукции: *при изменении магнитного потока в замкнутых проводниках возникает электрический ток, вызванный ЭДС индукции, которая пропорциональна скорости изменения магнитного потока:*

$$\mathcal{E}_i \sim \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}, \quad \text{или} \quad \mathcal{E}_i = k \frac{\Delta \Phi}{\Delta t},$$

где  $\mathcal{E}_i$  – электродвижущая сила индукции;  $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$  – скорость изменения магнитного потока  $\Phi$ ;  $k$  – коэффициент пропорциональности.



**Закон электромагнитной индукции:** электродвижущая сила индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока.

При использовании единиц СИ коэффициент  $k = 1$ . Приняв во внимание, что индукционный ток противодействует изме-



нению магнитного потока (правило Ленца), окончательно имеем:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Закон электромагнитной индукции часто называют законом Фарадея. Но он записал его в несколько иной форме.

Пусть магнитный поток, который пронизывает проводящий контур, изменяется на  $\Delta\Phi$ . При этом в контуре возникает ЭДС индукции:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Так как согласно закону Ома  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ , то можно записать его для случая электромагнитной индукции в виде  $I = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t \cdot R}$ , где  $R$  — сопротивление контура, а  $r = 0$ .

Заряд, который проходит в контуре вследствие электромагнитной индукции:  $Q = I\Delta t$ .

Учитывая, что заряд скалярная величина, а знак минус можно опустить, получим:

$$Q = \frac{\Delta\Phi}{R}, \text{ или } \Delta\Phi = QR.$$

**Задача.** Магнитный поток, пронизывающий катушку, которая состоит из 75 витков, равен  $4,8 \cdot 10^{-3}$  Вб. На протяжении какого времени исчезнет этот поток, если в катушке индуцируется ЭДС индукции 0,74 В?

Д а н о:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}, \\ \Phi_2 &= 0, \\ N &= 75, \\ \mathcal{E}_i &= 0,74 \text{ В}. \end{aligned}$$

Р е ш е н и е

$\Delta t = ?$	ЭДС индукции возникает в катушке потому, что магнитный поток, пронизывающий ее, изменяется на $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ . В каждом витке катушки при этом будет возникать ЭДС индукции в соответствии с законом электромагнитной индукции: $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ .
----------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Общая ЭДС будет в  $N$  раз больше:  $\mathcal{E}_i = \frac{N\Delta\Phi}{\Delta t}$ . Отсюда:  $\Delta t = \frac{N\Delta\Phi}{\mathcal{E}_i}$ .

Подставив значения физических величин, получим

$$\Delta t = \frac{75 \cdot 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}}{0,75 \text{ В}} = 0,48 \text{ с}.$$

**Ответ:** ток исчезнет через 0,48 с.





1. Как формулируется закон электромагнитной индукции?
2. Какое физическое содержание знака минус в формуле закона?

## Упражнение 17

1. Замкнутый проводник в форме кольца площадью  $100 \text{ см}^2$  находится в однородном магнитном поле с индукцией  $1 \text{ Тл}$ . Плоскость кольца перпендикулярна вектору магнитной индукции поля. Какое среднее значение ЭДС индукции при исчезновении магнитного поля на протяжении  $0,01 \text{ с}$ ?

2. Проволочное кольцо радиусом  $5 \text{ см}$  находится в магнитном поле с индукцией  $1 \text{ Тл}$  так, что вектор индукции перпендикулярен к плоскости. Определить среднее значение ЭДС индукции, если кольцо повернуть на  $90^\circ$  за  $0,1 \text{ с}$ .

3. Определить скорость изменения магнитного потока в катушке из  $2000$  витков, которая индуцирует в ней ЭДС  $120 \text{ В}$ .

4. Какое среднее значение силы тока индукции, возникающего в замкнутом медном проводнике длиной  $62,8 \text{ см}$  и диаметром  $0,5 \text{ мм}$ , если проводник согнут в виде кольца и расположен в магнитном поле с индукцией  $0,2 \text{ Тл}$ , которая за  $0,05 \text{ с}$  уменьшается до нуля?

5. Алюминиевое кольцо внесено в магнитное поле так, что его плоскость перпендикулярна к магнитной индукции поля. Средний диаметр кольца  $25 \text{ см}$ , его толщина  $2 \text{ мм}$ . Определить скорость изменения магнитного потока, если при этом возникает индукционный ток  $12 \text{ А}$ .

112

## § 37. Электродинамический микрофон



Одним из примеров практического применения явления электромагнитной индукции является электродинамический микрофон. С помощью этого прибора звуковые колебания превращаются в колебания электрического тока, которые усиливаются при помощи специальных электронных усилителей и используются в быту, научных исследованиях, производстве.



**Микрофоны превращают звуковые колебания в электрические.**

Обязательной частью электродинамического микрофона является постоянный магнит, изготовленный в виде кольца (рис. 2.41).



К одному из полюсов магнита приклеен цилиндрический стержень 1 из мягкого ферромагнетика (железа). К другому — ферромагнитная пластина 2 из такого же ферромагнетика. В центре этой пластины находится круглое отверстие, которое охватывает стержень. Диаметр отверстия несколько больше диаметра стержня, поэтому между стержнем и пластиной образуется узкая щель 5, в которой сосредоточен весь магнитный поток магнита.

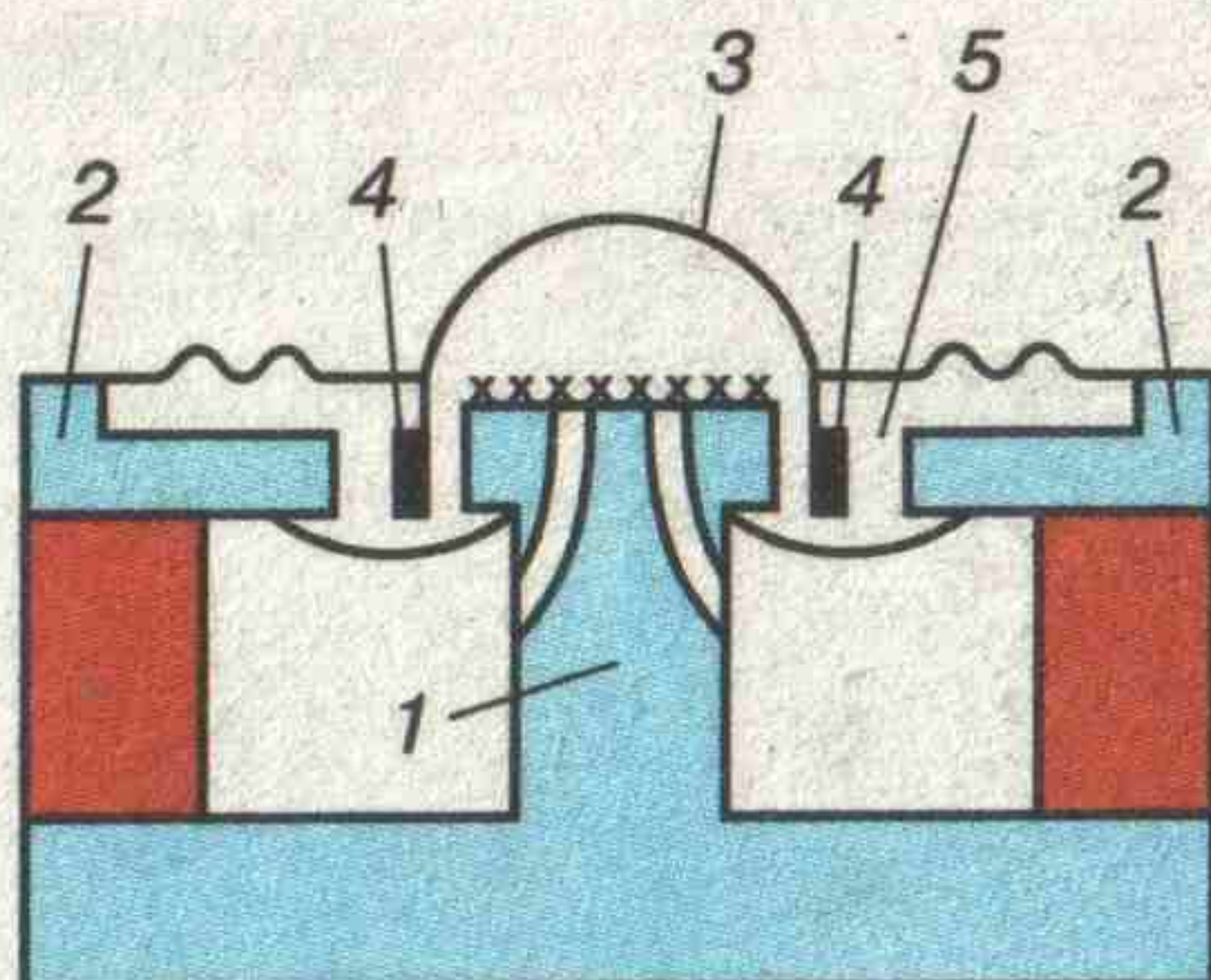


Рис. 2.41. Схема устройства электродинамического микрофона

На стержне находится мембрана 3, которая колеблется под действием звуковых волн. К нижней части мембраны приклеена небольшая катушка 4 с некоторым количеством витков изолированного провода. Катушка помещена в кольцевую щель между полюсами постоянного магнита.

**В электродинамическом микрофоне катушка находится в магнитном поле.**



113

Концы катушки соединены гибкими проводниками со специальными клеммами. Если на мембрану микрофона попадают звуковые волны, то она начинает колебаться вместе с катушкой. При колебании катушки магнитный поток, пронизывающий ее, изменяется и в ней индуцируется ЭДС индукции.

**В движущейся катушке, находящейся в магнитном поле, возникает ЭДС индукции.**



Если катушка включена в цепь электронного усилителя, то электрические колебания усиливаются и могут быть или записаны на магнитный либо оптический диск, или сразу воспроизведены громкоговорителем.

Принцип действия электродинамического микрофона используется в различных датчиках для изучения и контроля колебательных процессов.

1. Какое физическое явление используется в электродинамическом микрофоне?
2. С какой целью катушку микрофона помещают в узкой щели между полюсами постоянного магнита?
3. Как преобразуются механические колебания в электрические?
4. Где применяются электродинамические микрофоны?
5. В каких других приборах применяется принцип действия электродинамического микрофона?





## Лабораторная работа № 3

## Исследование явления электромагнитной индукции

**Цель.** Научиться воспроизводить явление электромагнитной индукции и узнать его основные закономерности.

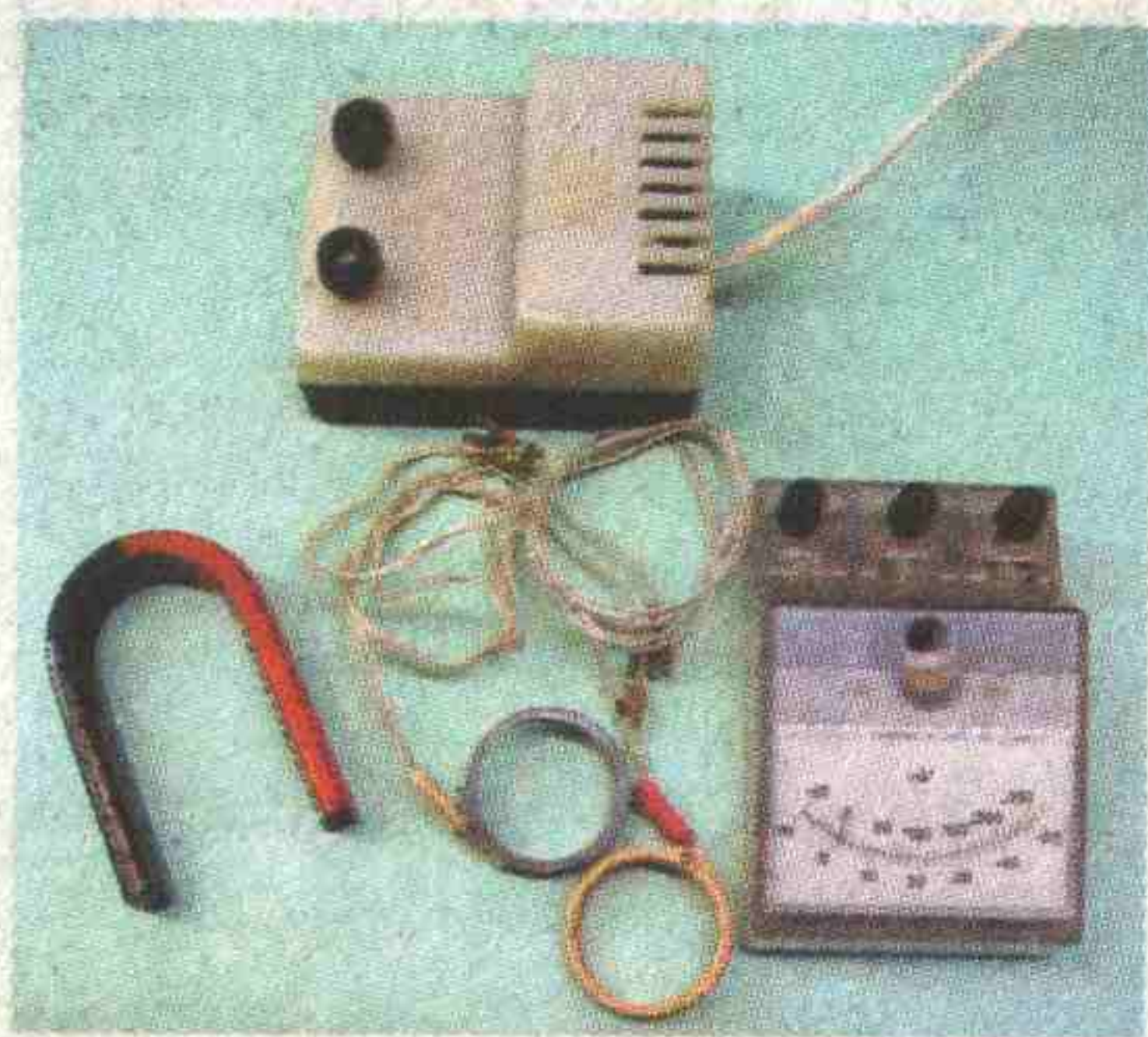


Рис. 2.42. К лабораторной работе

**Оборудование.** Две катушки с длинными проводниками, постоянный магнит, гальванометр, имеющий нуль посреди шкалы, источник постоянного тока (рис. 2.42).

## Указания к работе

1. Соединить катушку с гальванометром.

2. Приближая к катушке и отводя от нее постоянный магнит, убедиться в работоспособности установки.

3. Приближая северный полюс магнита к катушке, а потом удаляя

его, отметить направление отклонения стрелки гальванометра в обоих случаях.

4. Повторить опыт с южным полюсом.

5. Провести исследования, изменив скорость движения магнита.

6. Исследование повторить с магнитом, составленным из двух магнитов одноименными полюсами.

Таблица

Полюс	N		S	
Направление движения магнита	К катушке	От катушки	К катушке	От катушки
Направление отклонения стрелки				
Медленное движение				
Быстрое движение				

7. Выводы сформулировать как доказательство справедливости формулировки закона электромагнитной индукции.

8\*. Пользуясь знаниями по теории относительности, доказать, что результаты не изменятся, если вместо магнита перемещать катушку.

Дополнительное задание. Предложить способ выполнения опыта, который докажет влияние ферромагнитного стержня на значение ЭДС индукции.



## § 38. Самоиндукция

Каждый проводник, в котором существует электрический ток, создает «собственное» магнитное поле. Это поле образуется сразу же, как только в проводнике начинает проходить электрический ток. Если индукция магнитного поля перед замыканием цепи была равна нулю, то через некоторое время после замыкания она будет иметь максимальное значение  $B$ , соответствующее силе тока в проводнике. Таким образом, момент возникновения электрического тока можно считать моментом начала изменения магнитного потока. А любое изменение магнитного потока, по закону электромагнитной индукции, порождает вихревое электрическое поле, способствующее появлению ЭДС индукции во всех проводниках, находящихся в магнитном поле.

**Явление самоиндукции выявил Д. Генри в 1832 г.**



115

Не может быть исключения и для проводника, который является «источником» этого поля. Вихревое поле создает и в нем ЭДС индукции  $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ , которую называли ЭДС самоиндукции.

Наличие ЭДС самоиндукции можно подтвердить опытом. Для этого составим электрическую цепь из источника тока, выключателя и электрической лампочки (рис. 2.43). При замыкании цепи лампочка зажигается практически мгновенно. Если же в цепь включить катушку с железным сердечником, то максимальная яркость свечения лампочки устанавливается постепенно (рис. 2.44).

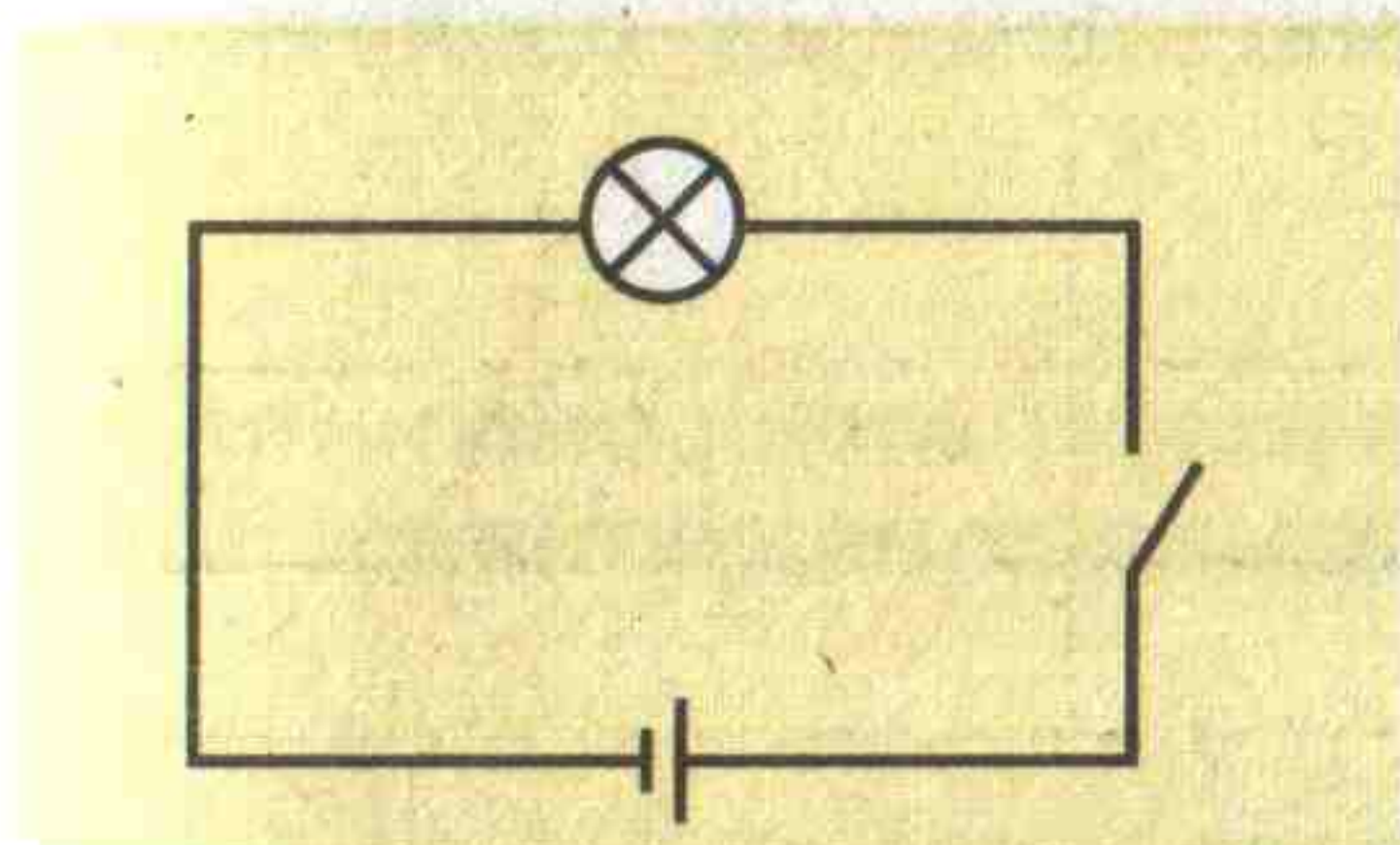


Рис. 2.43. Лампочка загорается сразу после замыкания цепи

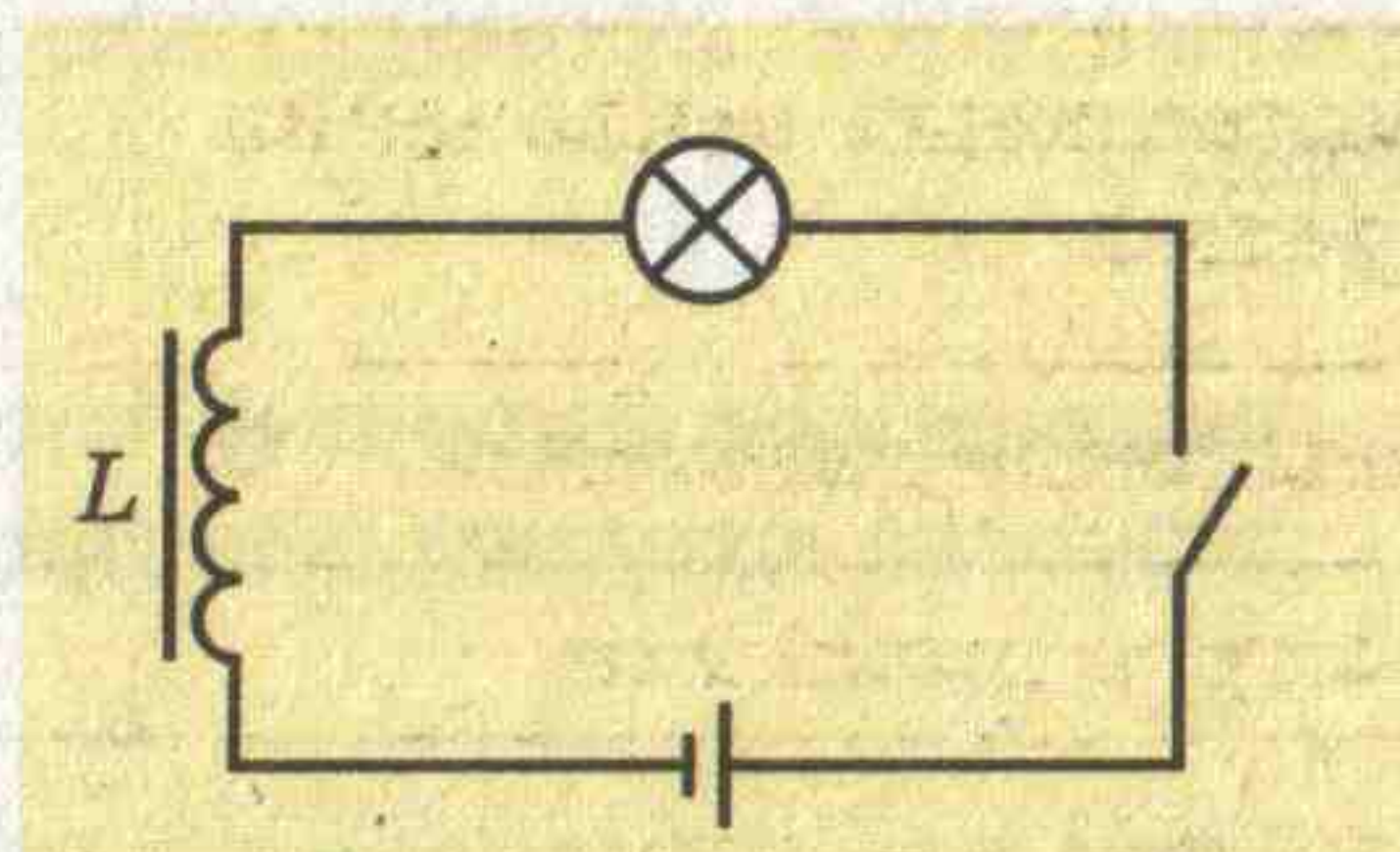


Рис. 2.44. В цепи с катушкой лампочка загорается постепенно

Это является свидетельством того, что ток в цепи увеличивается не мгновенно, а на протяжении некоторого времени. Посмотрев на графики рисунков 2.45 и 2.46, можно сказать, что в цепи, где находится катушка из 100 витков, ток нарастает



быстрее, чем в цепи, в которой находится катушка из 1000 витков. На прохождение тока в цепи существенно влияет также ферромагнитный сердечник в катушке (рис. 2.47).

Поскольку ЭДС самоиндукции противодействует ЭДС источника тока, то можно сделать вывод, что ЭДС самоиндукции зависит от характеристик катушки или проводника, включенного в электрическую цепь.

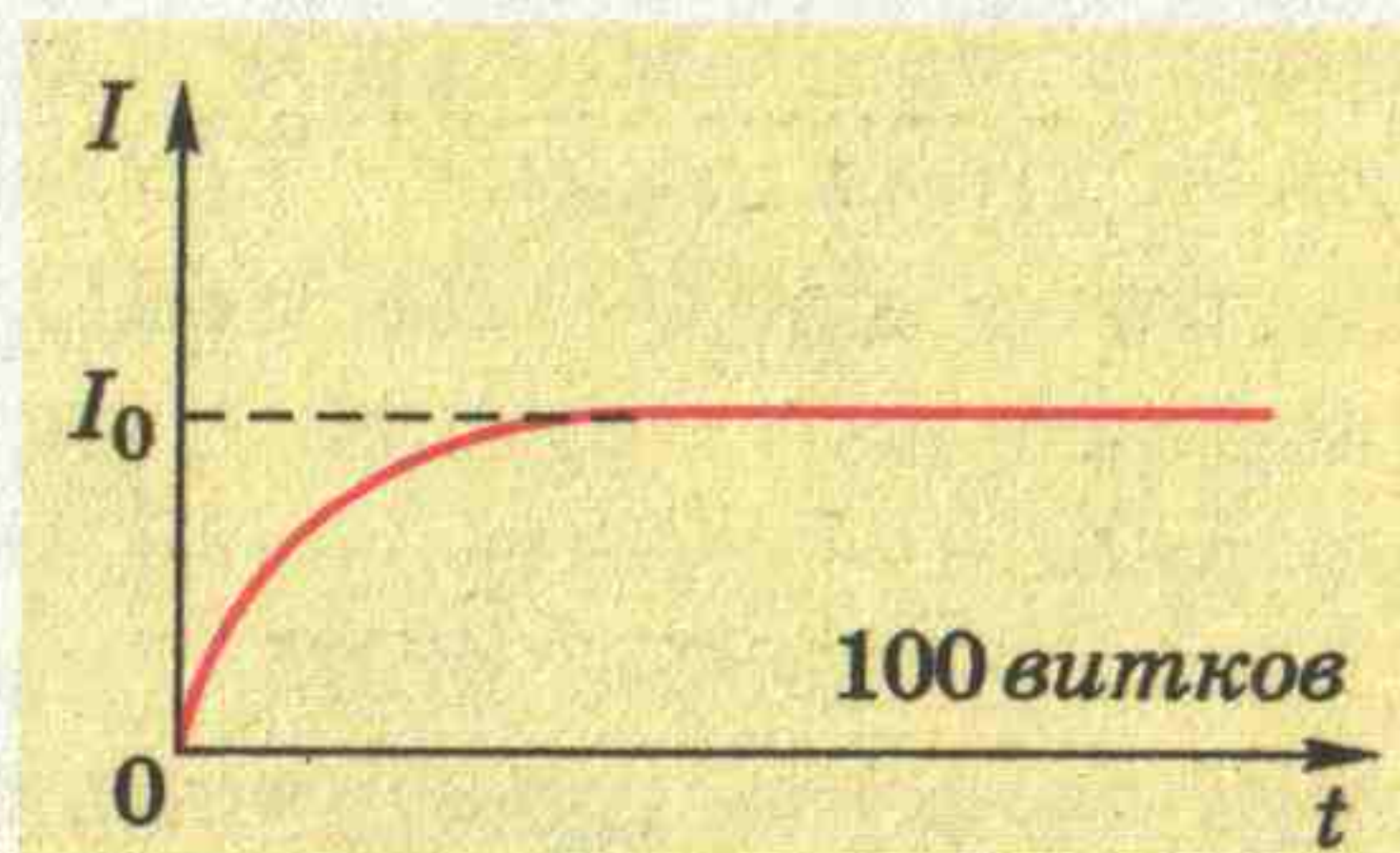


Рис. 2.45. График силы тока при замыкании цепи с катушкой из 100 витков

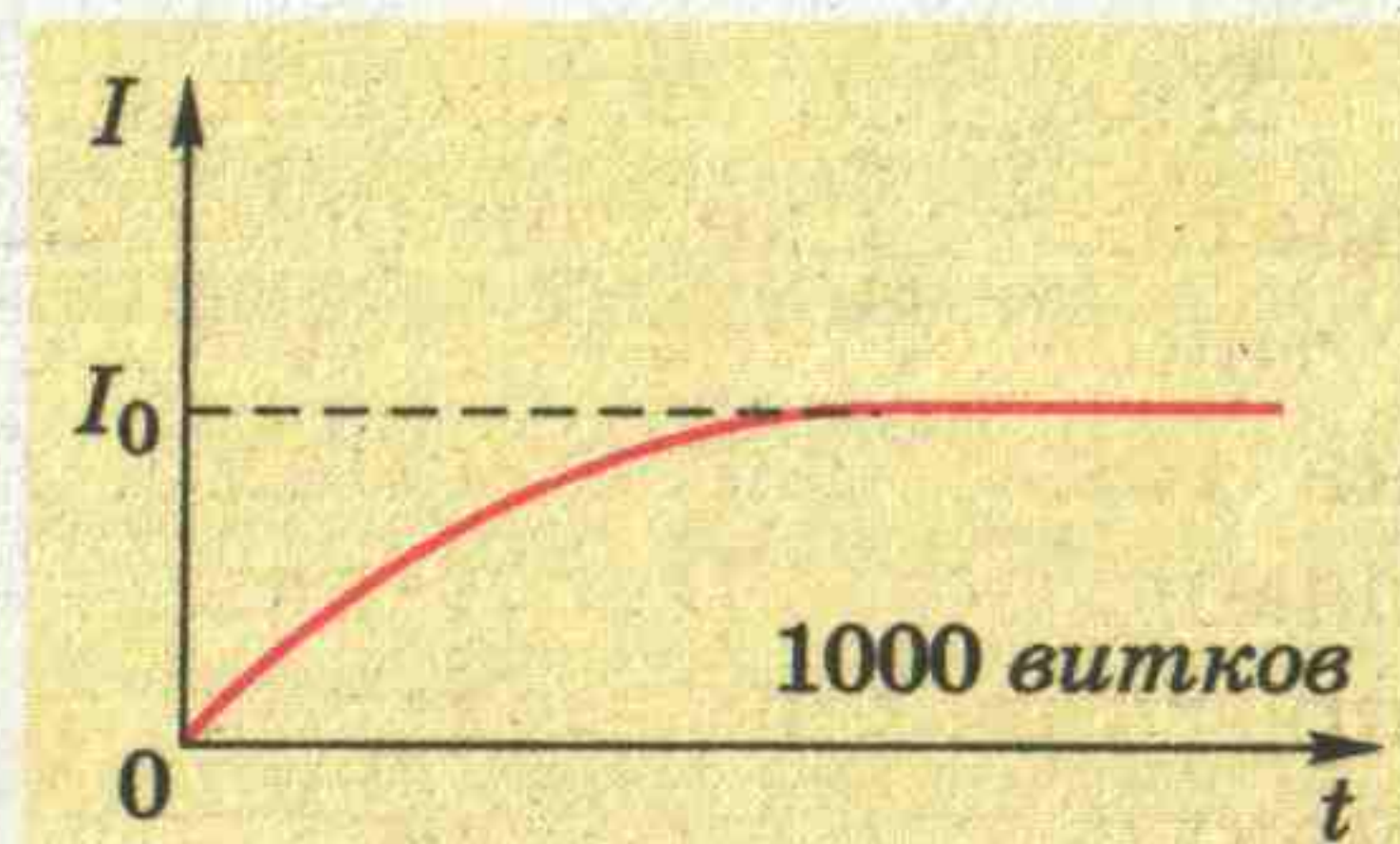


Рис. 2.46. График силы тока при замыкании цепи с катушкой из 1000 витков

116

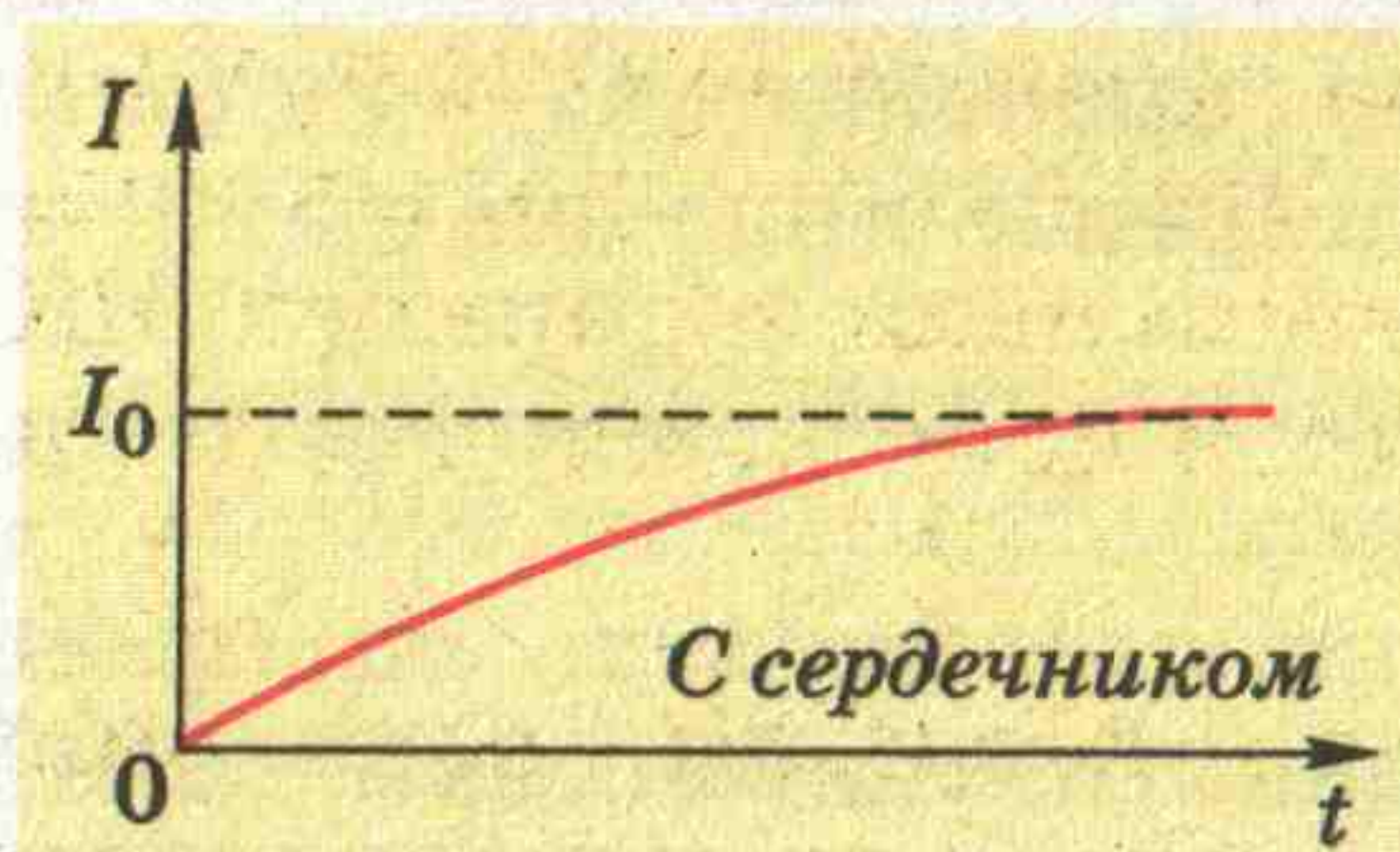


Рис. 2.47. График силы тока при замыкании цепи с катушкой (сердечником)

А магнитный поток, создаваемый катушкой или проводником, будет пропорционален силе тока в них:  $\Phi \sim I$ . Если ввести коэффициент пропорциональности, то можно получить более точное соотношение и новую формулу:  $\Phi = L \cdot I$ . Здесь коэффициент пропорциональности  $L$  учитывает электромагнитные свойства катушки (проводника) и называется *индуктивностью*. Индуктивность определяется формой

и размерами проводника, а также магнитными свойствами среды.



Физическую величину, которая характеризует электромагнитные свойства катушки или проводника, называют индуктивностью.



Если при изменении силы тока в проводнике на 1 А за 1 с в нем индуцируется ЭДС самоиндукции 1 В, то этот проводник имеет индуктивность 1 Гн.

В СИ индуктивность измеряют в *генри* (Гн) в честь известного американского физика Д. Генри.

Единица 1 генри имеет довольно большой размер, поэтому применяют, как правило, долевые единицы:



$$1 \text{ миллигенри} = 1 \text{ мГн} = 10^{-3} \text{ Гн};$$

$$1 \text{ микрогенри} = 1 \text{ мкГн} = 10^{-6} \text{ Гн}.$$

Если в любом проводнике изменяется электрический ток, то это приводит к изменению магнитного потока  $\Delta\Phi = L\Delta I$ , которое вызывает ЭДС самоиндукции:

$$\mathcal{E}_{si} = -\frac{L\Delta I}{\Delta t}.$$

Явление самоиндукции наблюдается также при размыкании цепи с током. Составим цепь из источника тока, выключателя, катушки и лампочки. Лампу накаливания, сопротивление которой значительно меньше сопротивления катушки, включим параллельно катушке (рис. 2.48). Если замкнуть цепь, то накаливание волоска лампочки будет происходить постепенно, как

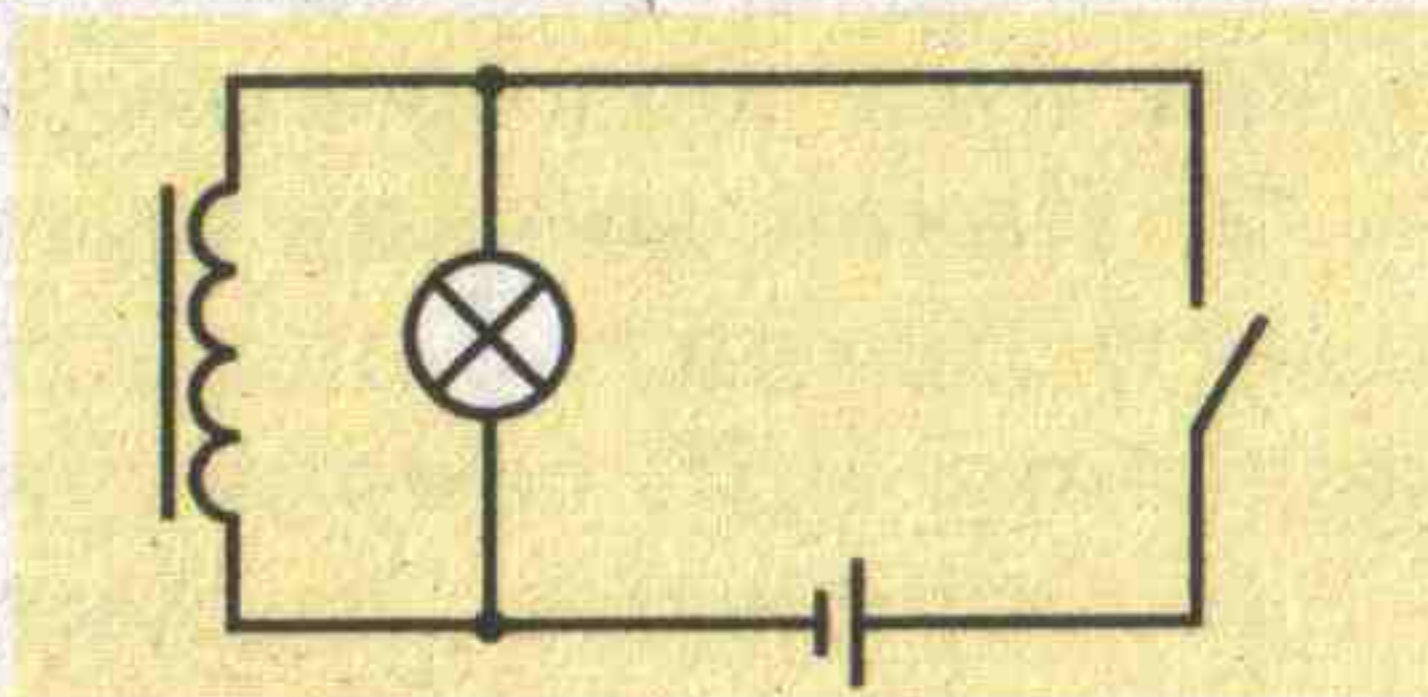


Рис. 2.48. Схема электрической цепи для наблюдения явления самоиндукции при размыкании

бы с задержкой. Если после полного загорания лампы разомкнуть ключ, то она ярко вспыхнет. Это будет проявлением самоиндукции. В результате размыкания цепи возникнет ЭДС самоиндукции, которая поддержит ток в цепи лампочки и катушки.

**Задача.** Определить индуктивность катушки, если сила тока в ней изменяется на 50 А за 1 с и при этом появляется ЭДС самоиндукции 0,08 В.

Дано:

$$\Delta I = 50 \text{ А},$$

$$\Delta t = 1 \text{ с},$$

$$\mathcal{E}_{si} = 0,08 \text{ В}.$$

$L = ?$

Решение

По закону ЭДС самоиндукции

$$\mathcal{E}_{si} = -\frac{L\Delta I}{\Delta t}.$$

Отсюда 
$$L = \frac{\mathcal{E}_{si} \cdot \Delta t}{\Delta I}.$$

Подставив значения физических величин, получим 
$$L = \frac{0,08 \text{ В} \cdot 1 \text{ с}}{50 \text{ А}} = 1,6 \text{ мГн}.$$

**Ответ:** индуктивность катушки 1,6 мГн.

1. Как проявляется явление самоиндукции при замыкании электрической цепи?
2. Как проявляется явление самоиндукции при размыкании цепи?







3. Как влияет индуктивность проводника на протекание явления самоиндукции?
4. От каких величин зависит ЭДС самоиндукции?
5. Какие единицы индуктивности в СИ?

## Упражнение 18

1. Определить индуктивность катушки, если при изменении в ней тока со скоростью 80 А/с ЭДС самоиндукции равна 30 В.
2. Какой должна быть скорость изменения тока в обмотке электромагнита с индуктивностью катушек 2 Гн, чтобы среднее значение ЭДС самоиндукции было равно 20 В?
3. Определить индуктивность проводника, в котором равномерное изменение силы тока на 2 А за 0,25 с индуцирует ЭДС самоиндукции 20 мВ.
4. Какая ЭДС самоиндукции возбуждается в обмотке электромагнита с индуктивностью катушек 0,4 Гн при равномерном изменении силы тока в ней на 5 А за 0,02 с?

118

## § 39. Энергия магнитного поля

Самоиндукция подтверждает действие закона сохранения и превращения энергии в электромагнитных явлениях.

Как известно, вследствие явления самоиндукции при замыкании цепи возникает ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_{si}$ . Если же сила тока не изменяется, ЭДС самоиндукции не возникает. Такое положение в электрической цепи обусловлено тем, что за счет энергии источника тока выполняется работа по компенсации ЭДС самоиндукции. Это аналогично случаю, когда для сообщения скорости неподвижному телу необходимо выполнить определенную работу по преодолению инерции.

Любые изменения силы тока в катушке вызовут появление ЭДС индукции и приведут к выполнению работы источником тока для компенсации ее действия. Эта работа равна энергии магнитного поля катушки или проводника.

Для компенсации ЭДС самоиндукции источник тока выполнит работу по перемещению заряженных частиц, общий заряд которых равен  $Q$ . Приняв во внимание, что  $|\mathcal{E}_{si}| = \frac{L\Delta I}{\Delta t}$  и то, что  $A = Q\mathcal{E}$ , получим значение выполненной работы для явления самоиндукции:

$$A = \frac{QL\Delta I}{\Delta t}.$$



**ЭДС самоиндукции зависит от индуктивности проводника и скорости изменения силы тока в нем.**



При этом сила тока в цепи изменяется от нуля до  $I_{max}$ , которое равно  $I_0$ . По определению  $Q = I\Delta t$ .

Поскольку при замыкании цепи сила тока не имеет постоянного значения, то для упрощения расчетов будем считать, что сила тока линейно изменяется на протяжении всего времени.

Тогда сила тока  $I = \frac{I_{max}}{2} = \frac{I_0}{2}$ .

Таким образом,

$$A = \frac{LI_0\Delta t}{2} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Изменение силы тока  $\Delta I$  за интервал времени  $\Delta t$  равно  $I_0$ .

Работа, выполненная источником тока, равна энергии магнитного поля катушки с током:

$$W_m = \frac{LI_0\Delta t}{2} \cdot \frac{I_0}{\Delta t} = \frac{LI_0^2}{2}.$$

119

**Энергия магнитного поля катушки с током пропорциональна индуктивности катушки и квадрату силы тока в ней.**



1. От каких величин зависит энергия магнитного поля проводника с током?
2. Какие преобразования энергии происходят при замыкании электрической цепи с индуктивностью?
3. Какие преобразования энергии происходят при размыкании электрической цепи с индуктивностью?



### Упражнение 19

1. Объяснить превращения, которые происходят в таких процессах:

а) магнитная стрелка вблизи проводника отклоняется, когда в нем появляется ток;

б) из электромагнита, обмотками которого проходит ток, вынимают железный сердечник;

в) электромагнит притягивает к себе кусок железа;

г) постоянный магнит притягивает к себе кусок железа.

2. На катушку, имеющую сопротивление 8,2 Ом, подают напряжение 55 В. Какова энергия катушки, если ее индуктивность 25 мГн?

3. Обмотка электромагнита имеет сопротивление 10 Ом, индуктивность 0,2 Гн и находится под постоянным напряжением. За какой интервал времени в обмотке выделится такое же количество теплоты, как и энергия магнитного поля в сердечнике?



## § 40. Переменный ток

Жизнь современного человека невозможно представить без использования энергии электрического тока. Благодаря ему происходят многочисленные технологические процессы, работают различные машины, средства связи и коммуникаций, от него зависит весь современный комфорт.

Опыт применения энергии электрического тока показал, что самым удобным в технологическом плане является применение переменного электрического тока, в частности такого его вида, когда все изменения напряжения и силы тока происходят по законам синуса или косинуса.

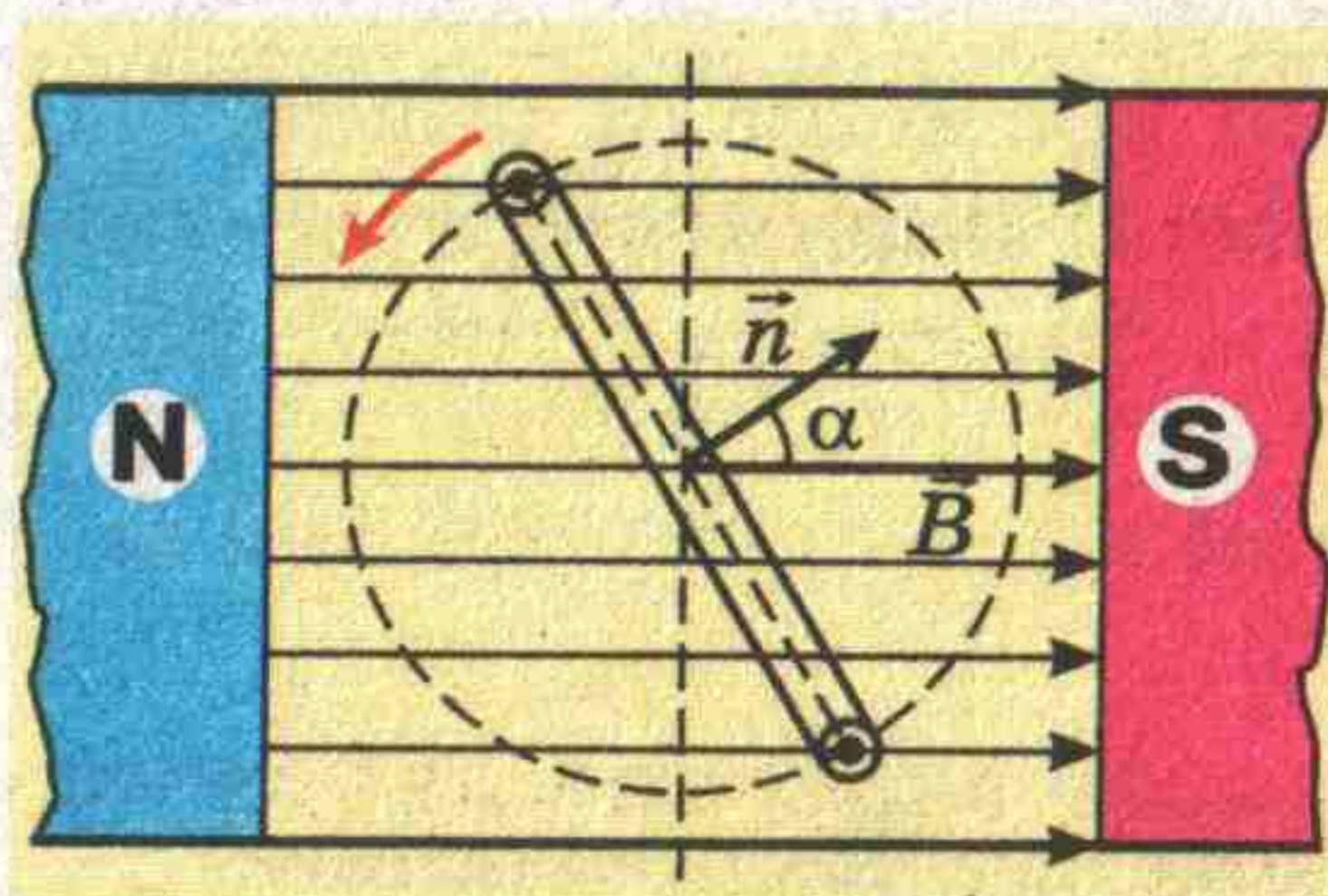


Рис. 2.49. Вращение проволочной рамки в магнитном поле

Самым удобным способом получения переменного тока является вращение рамки в магнитном поле. Представим, что в начальный момент времени рамка (рис. 2.49) расположена так, что направление нормали  $\vec{n}$  (перпендикуляра) к ее плоскости совпадает с направлением вектора магнитной индукции поля  $\vec{B}$ , в котором вращается рамка. Магнитный поток, который проходит через рамку, имеет максимальное значение:

$$\Phi_0 = BS.$$

Если рамка вращается равномерно с угловой скоростью  $\omega$ , то угол поворота в любой момент равен

$$\varphi = \omega t.$$

Проанализировав рисунок, можно заметить, что магнитный поток, пронизывающий рамку, изменяется по закону косинуса:

$$\Phi = BS \cos \omega t = \Phi_0 \cos \omega t.$$

Поскольку магнитный поток изменяется, то в рамке возникает ЭДС индукции:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta (BS \cos \omega t)}{\Delta t}.$$

Если индукция магнитного поля и площадь рамки постоянны, а  $\frac{\Delta(\cos \omega t)}{\Delta t} = -\sin \omega t$  (при  $\Delta t \rightarrow 0$ ), то можно сделать вывод:

*при равномерном вращении рамки в однородном магнитном поле в ней возникает электродвижущая сила индукции, которая изменяется по закону синуса.*

Из формулы видно, что максимальное значение  $\mathcal{E}_i$  достигается тогда, когда  $\sin \omega t = \pm 1$ . Это такие положения рамки, при



которых магнитный поток через нее максимален (рамка пересекает линии индукции магнитного поля в перпендикулярном направлении).

Практически переменный ток не отличается от постоянного. Это такое же направленное движение заряженных частиц. Он имеет тепловое, магнитное, химическое действия. Отличие только в том, что он периодически изменяет свое направление. Это вынужденные колебания силы тока и напряжения в электрической цепи.

Обычные измерительные приборы переменного тока показывают значения так называемых эффективных значений силы тока и напряжения. Фактически это значения характеристик постоянного тока, который производит такие же действия, как и данный переменный ток.

Между максимальным (амплитудным) значением силы тока и его эффективным значением существует определенная связь:

$$I_{\text{эф}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}}.$$

Аналогично определяется и эффективное значение напряжения переменного тока:

$$U_{\text{эф}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}.$$

На этикетках всех современных электрических приборов указаны эффективные значения напряжения и силы тока.

Переменный ток имеет определенную частоту. В Украине стандартная частота переменного тока в сети составляет 50 Гц. Ее обязательно учитывают при разработке всех приборов переменного тока: трансформаторов, электродвигателей, генераторов и др.

В промышленных условиях переменный ток вырабатывают с помощью электромеханических генераторов (рис. 2.50).

Такой генератор имеет статор 1 в виде пустотелого цилиндра, на внутренней поверхности которого расположены обмотки изолированного провода. Ротор 2 укреплен на валу и вращается вместе с ним. Его соединяют с движущим механизмом, в частности с гидравлической, паровой или газовой турбиной. В пазах стального корпуса ротора расположены обмотки, создающие магнит-

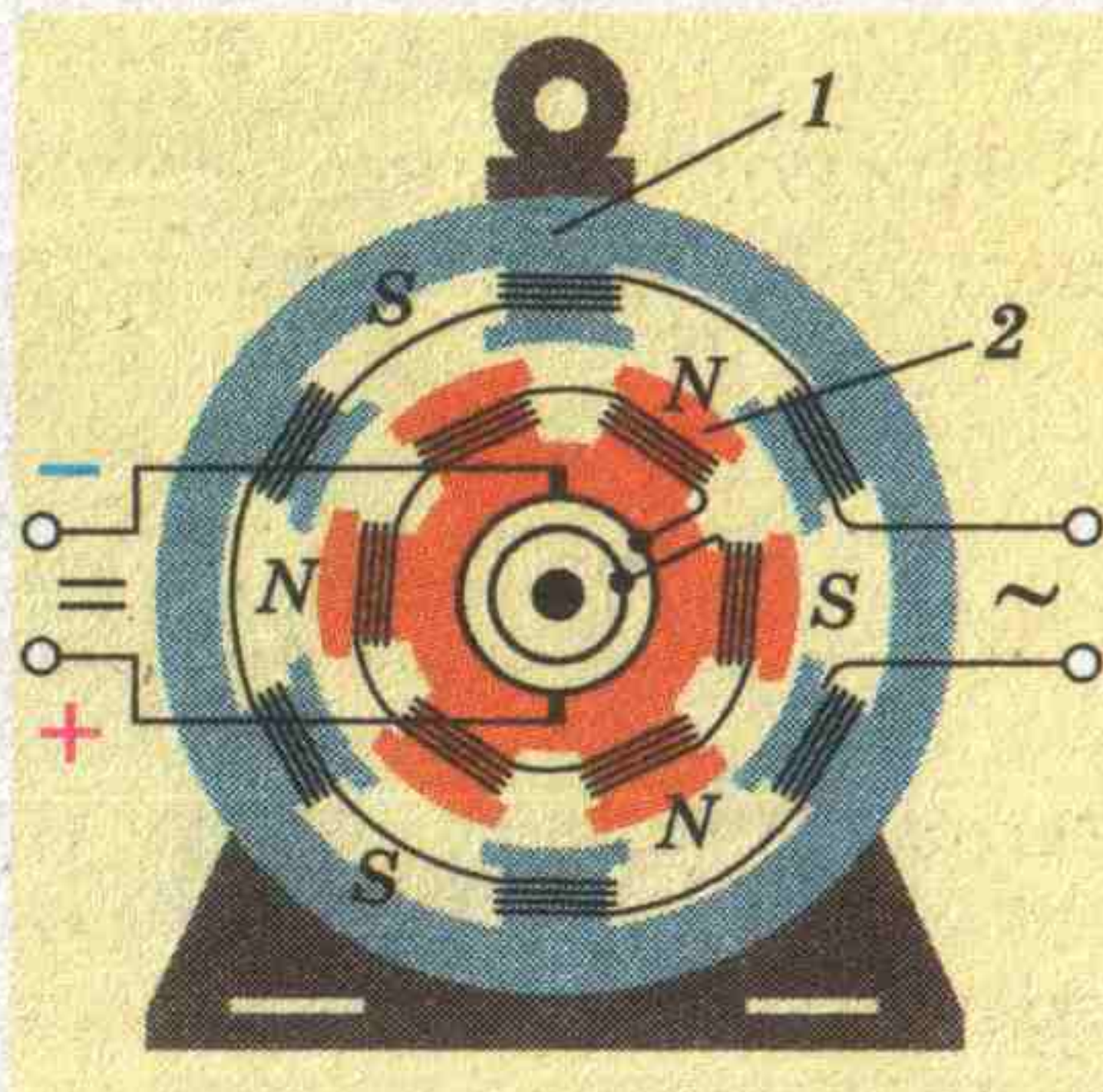


Рис. 2.50. Схема устройства генератора переменного тока



ное поле, когда по ним проходит электрический ток. Вместе с ротором вращается и вектор магнитной индукции, благодаря чему в статоре индуцируется переменная ЭДС. У большинства промышленных генераторов она составляет несколько десятков киловольт.

## § 41. Трансформатор. Передача энергии переменного тока

Чрезвычайно важным свойством переменного электрического тока является то, что напряжение и силу тока можно изменять (трансформировать) без ощутимых потерь энергии. Такие превращения особо важны для передачи электроэнергии на большие расстояния с минимальными затратами.

Так, доказано, что потери в линиях электропередач существенно уменьшаются, если передача происходит при высоком напряжении – несколько десятков, сотен киловольт. В местах потребления это напряжение приходится понижать до 380–220 В.

122

Все такие преобразования производятся с помощью весьма простого по устройству прибора – трансформатора.

Трансформатор (рис. 2.51) в большинстве случаев состоит из двух катушек-обмоток, имеющих общий ферромагнитный сердечник. Одна из катушек (она называется первичной) соединяется с генератором, а потребители (электродвигатели, лампы-обогреватели и т. п.) присоединяются ко вторичной обмотке трансформатора.

Принцип действия трансформатора переменного тока (рис. 2.52) основан на использовании явления электромагнитной индукции.

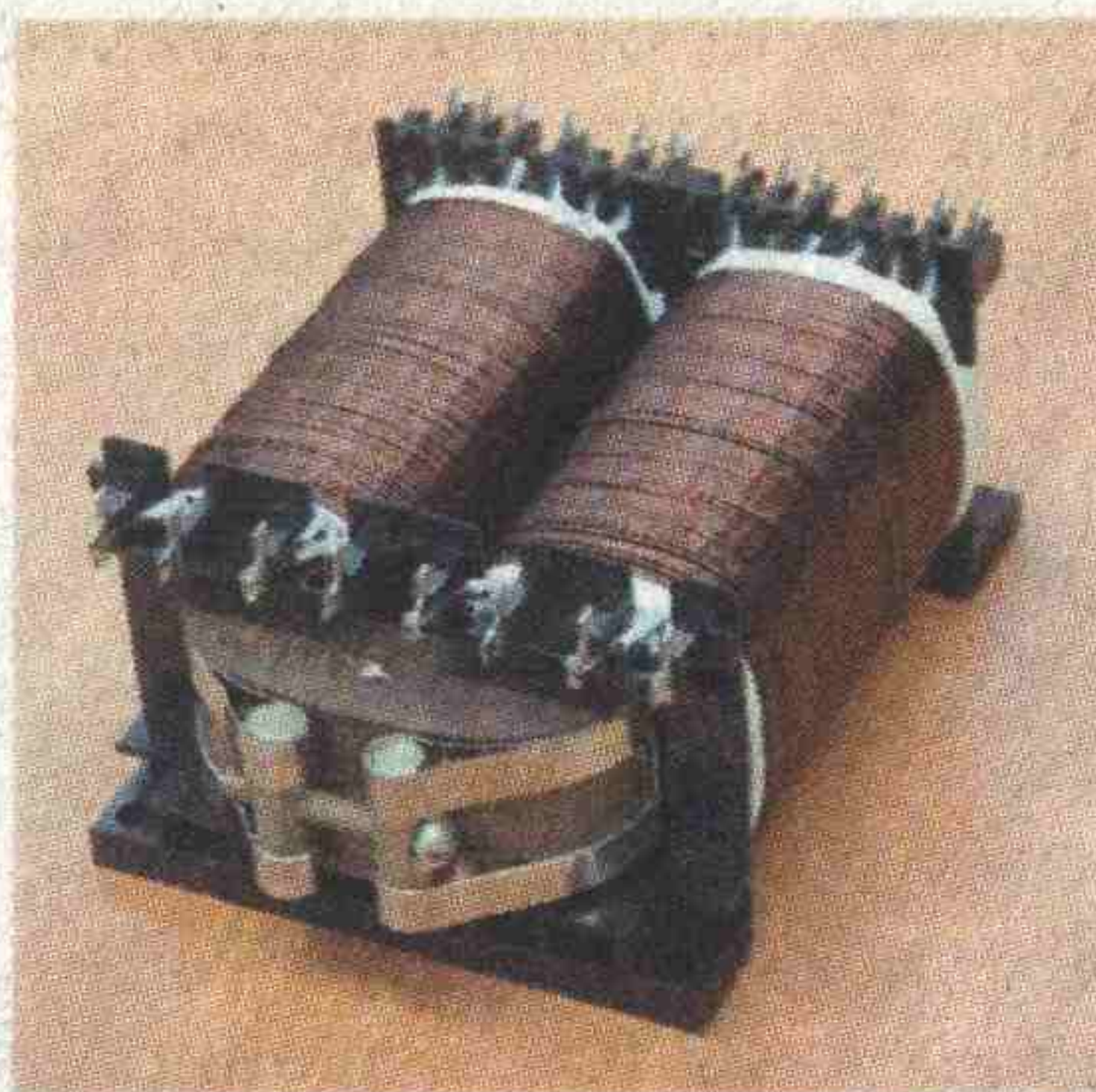


Рис. 2.51. Трансформатор переменного тока с двумя обмотками

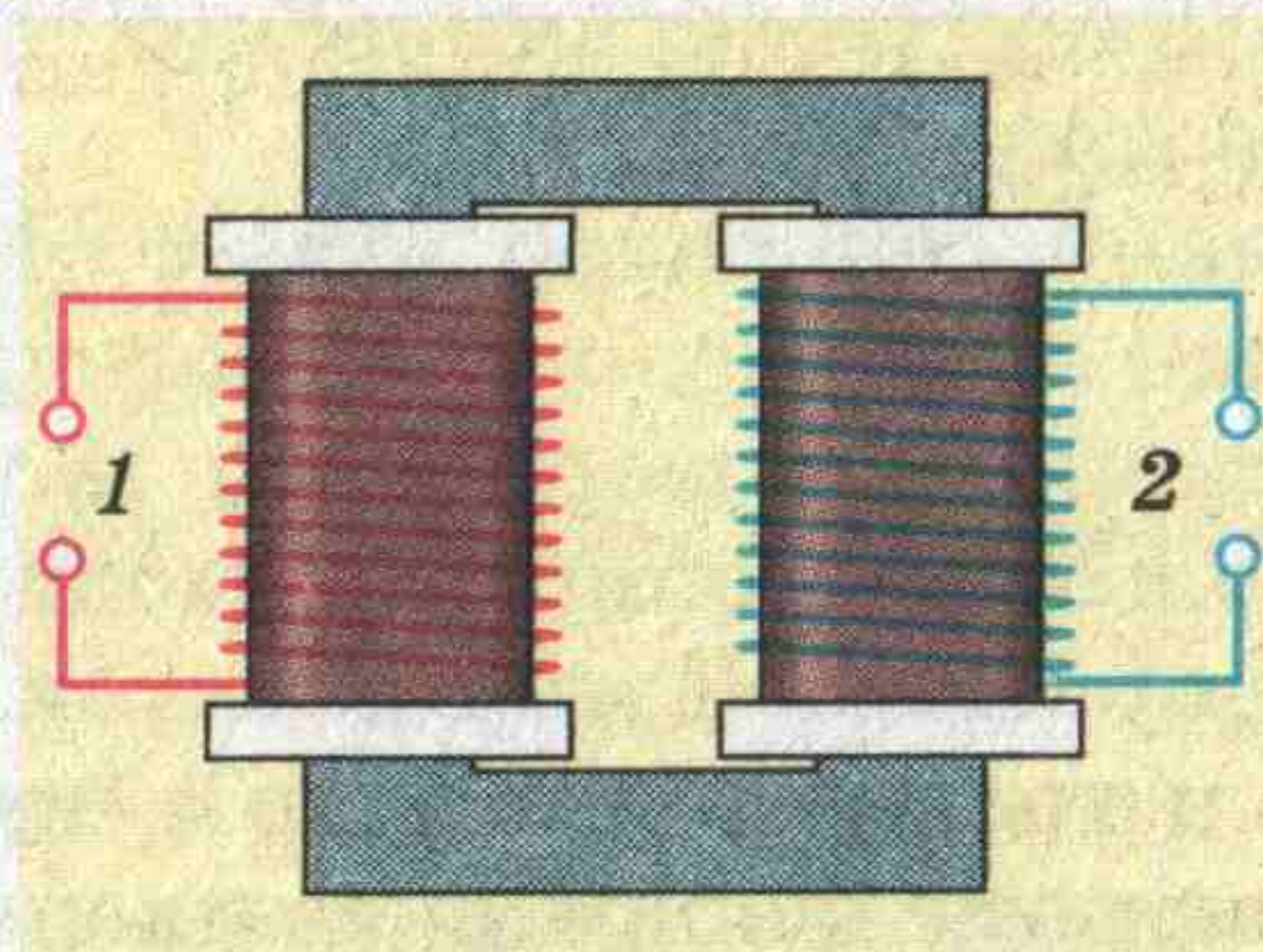


Рис. 2.52. Схема трансформатора переменного тока с двумя обмотками



Переменный ток, который проходит первичной обмоткой 1, например, с количеством витков  $N_1$ , создает в сердечнике переменное магнитное поле, оно в свою очередь индуцирует во вторичной обмотке трансформатора 2 с количеством витков  $N_2$  электродвижущую силу. Поскольку обмотки имеют общий сердечник, то в каждом их витке возникает электродвижущая сила, пропорциональная количеству витков:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Если вторичная обмотка разорвана, а к первичной обмотке присоединен источник переменного тока, то такой режим называют режимом *холостого хода*. В этом случае напряжение  $U_2$  равно электродвижущей силе  $\mathcal{E}_2$ . В первичной обмотке в это время проходит незначительный ток холостого хода. Поэтому  $U_1 \approx \mathcal{E}_1$ . В таком случае напряжение на обеих обмотках трансформатора на холостом ходу можно считать пропорциональным количеству витков в них:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = k,$$

где  $k$  — коэффициент трансформации.

Если  $k > 1$ , то  $U_2 > U_1$ , и трансформатор называют повышающим; если  $k < 1$ , то  $U_2 < U_1$ , и трансформатор будет называться понижающим.

Когда трансформатор соединить с потребителями, цепь вторичной обмотки замкнется. Это будет *рабочий режим трансформатора*. Поскольку обмотки и сердечник образуют замкнутую систему, то в ней действует закон сохранения и преобразования энергии. В данном случае он проявляется равенством мощностей первичной и вторичной обмоток трансформатора (тепловые потери в сердечнике будут незначительными, поскольку коэффициент полезного действия современных трансформаторов равен около 99,5%).

Таким образом,

$$P_1 \approx P_2; \quad I_1 U_1 \approx I_2 U_2,$$

или

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1}.$$

Только с помощью трансформатора переменного тока удалось эффективно решить проблему передачи электроэнергии на большие расстояния. Как указывалось выше, такая передача с незначительными потерями возможна при высоком напряжении. Подтверждением этого может быть решение следующей задачи.



**Задача.** Электроэнергию от электростанции мощностью 50 кВт передают с помощью линии сопротивлением 5 Ом. Определить потери напряжения и мощности в линейных проводах и коэффициент полезного действия в электросети в случаях, когда передача энергии осуществляется при напряжениях 1000 и 10 000 В.

Д а н о:	Р е ш е н и е
$P = 50\,000\text{ Вт},$ $R = 5\text{ Ом},$ $U_1 = 1000\text{ В},$ $U_2 = 10\,000\text{ В}.$	<p>Потери напряжения в линии можно определить по формуле</p> $U = IR,$ <p>где <math>I</math> – сила тока в линии; <math>R</math> – сопротивление линии.</p>
$U - ?$ $P - ?$ $\eta - ?$	<p>Потеря мощности в линии</p> $P = I^2 R.$ <p>Коэффициент полезного действия <math>\eta</math> можно определить как отношение полезной мощности к полной мощности:</p>

124

$$\eta = \frac{P_{\text{пз}}}{P_{\text{п}}}.$$

Рассчитаем значение коэффициента полезного действия для разных значений напряжений:

$$1) U_1 = \frac{50 \cdot 10^3 \text{ Вт}}{1000 \text{ В}} \cdot 5 \text{ Ом} = 250 \text{ В};$$

$$I_1 = \frac{50 \cdot 10^3 \text{ Вт}}{1000 \text{ В}} = 50 \text{ А};$$

$$P_1 = (50 \text{ А})^2 \cdot 5 \text{ Ом} = 12,5 \cdot 10^3 \text{ Вт};$$

$$\eta = \frac{50 \text{ кВт} - 12,5 \text{ кВт}}{50 \text{ кВт}} \approx 0,75.$$

$$2) U_2 = \frac{50 \cdot 10^3 \text{ Вт}}{10\,000 \text{ В}} \cdot 5 \text{ Ом} = 25 \text{ В};$$

$$I_2 = \frac{50 \cdot 10^3 \text{ Вт}}{10\,000 \text{ В}} = 5 \text{ А};$$

$$P_2 = (5 \text{ А})^2 \cdot 5 \text{ Ом} = 125 \text{ Вт};$$

$$\eta = \frac{50 \text{ кВт} - 0,125 \text{ кВт}}{50 \text{ кВт}} \approx 0,997.$$

Сравнение полученных результатов позволяет сделать выводы:

1) повышение напряжения в линии в 10 раз во столько же раз уменьшает силу тока;



2) повышение напряжения в линии в 10 раз значительно уменьшает потери мощности.

Налицо преимущества передачи электроэнергии при высоком напряжении. Этого можно достичь, применяя в линиях электропередачи трансформаторы, которые повышали бы напряжение перед тем, как ток поступает в линию электропередачи, и снижали бы ее на входе к потребителю.

На рисунке 2.53 представлена схема современной линии электропередач (ЛЭП) переменного тока.

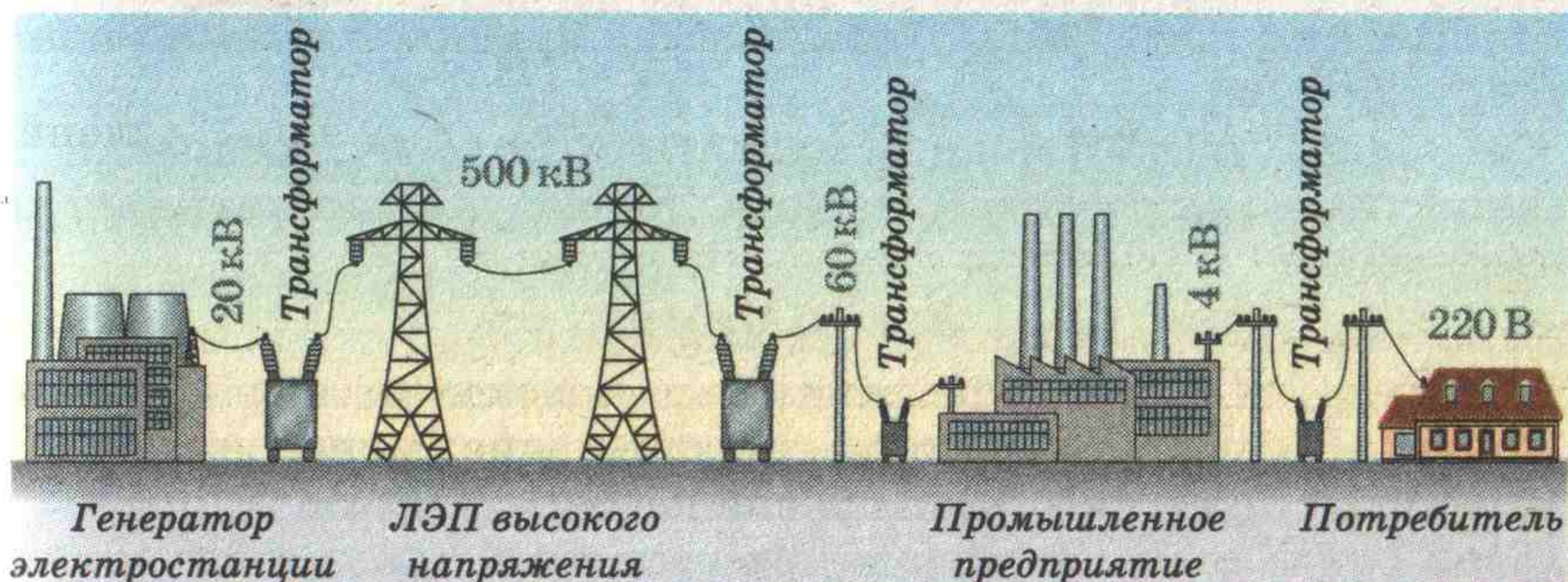


Рис. 2.53. Система передачи электроэнергии на расстояние

На всех промышленных электростанциях Украины работают электромеханические генераторы, вырабатывающие переменный ток напряжением 20 кВ и частотой 50 Гц. Повышение напряжения генератора выше этого значения опасно из-за возможности пробоя изоляции проводов в генераторе. Поэтому повышение напряжения происходит за пределами генератора с помощью трансформаторов, которые повышают его до 500...750 кВ. Прежде чем подать электроэнергию потребителям, напряжение понижается с помощью понижающих трансформаторов согласно с потребностями предприятий, транспорта, потребителей бытовой сферы. В наши квартиры электричество подается при напряжении 220 В.

1. Каковы функции трансформатора переменного тока?
2. Как устроен трансформатор?
3. Какие обмотки считают первичными, а какие – вторичными?
4. Что такое холостой и рабочий ход трансформатора?
5. Как изменяются потери напряжения в линии электропередач при повышении напряжения в них?
6. Как изменяются потери мощности при повышении напряжения в линии?
7. Для чего нужны трансформаторы?





## Главное в разделе 2

1. Основным признаком магнитного поля, который позволяет отличить его от других полей, является его действие на движущийся заряд.

2. Силовое действие магнитного поля характеризуется магнитной индукцией – векторной величиной, определяющей силу, с которой магнитное поле действует на проводник с током или движущуюся заряженную частицу. Ее направление для прямого проводника определяется правилом правого винта (буравчика).

3. Сила, действующая в магнитном поле на проводник с током, называется силой Ампера. Ее модуль рассчитывается по формуле

$$F_A = B I \Delta l \sin \alpha.$$

Вектор силы Ампера лежит в плоскости, перпендикулярной к плоскости вектора скорости заряженных частиц и магнитной индукции. Ее направление определяется по правилу левой руки: если левую руку расположить так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а четыре пальца показывали направление тока, то отставленный на  $90^\circ$  большой палец укажет на направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле.

4. На обособленную частицу, имеющую электрический заряд и движущуюся в магнитном поле, действует магнитная составляющая силы Лоренца:

$$F_L = e v B \sin \alpha.$$

5. Все без исключения вещества взаимодействуют с магнитным полем. Магнитные свойства вещества определяются его внутренним строением. По магнитным свойствам все вещества разделяются на диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. В отличие от диа- и парамагнетиков, ферромагнетики имеют большую магнитную проницаемость как следствие их доменной структуры.

6. Магнитный поток – это физическая величина, которая характеризует магнитное поле и равна произведению магнитной индукции на площадь контура и косинус угла между вектором магнитной индукции и нормалью к плоскости контура:

$$\Phi = B S \cos \alpha.$$

Магнитный поток измеряется в веберах (Вб).

7. При изменении магнитной индукции поля в замкнутом проводнике возникает ЭДС индукции. ЭДС индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока:



$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

8. ЭДС индукции в проводнике, который движется в магнитном поле, возникает вследствие действия силы Лоренца на свободные электроны. Направление индукционного тока определяют по правилу правой руки и правилу Ленца: индукционный ток, возникающий в замкнутом проводнике, имеет такое направление, что его магнитное поле противодействует изменению магнитного поля, которое вызвало этот ток.

9. Вследствие взаимодействия проводника с током со своим магнитным полем возникает явление самоиндукции. Физическая величина, характеризующая электромагнитные свойства проводника, называется индуктивностью. Единицей индуктивности является генри (Гн).

Индуктивность проводника зависит от его геометрических параметров и магнитной проницаемости среды, в которой он находится.

10. ЭДС самоиндукции зависит от скорости изменения силы тока в проводнике и его индуктивности:

$$|\mathcal{E}_{si}| = \frac{L\Delta I}{\Delta t}.$$

11. Энергия магнитного поля проводника с током пропорциональна его индуктивности и квадрату силы тока в нем:

$$W_m = \frac{LI_0^2}{2}.$$



# Раздел 3

Усвоив материал этого раздела, ты **будешь знать**:

- ♦ виды механических колебаний и волн;
- ♦ ученых, сделавших весомый вклад в становление теории колебаний;
- ♦ виды электромагнитных волн в зависимости от длины их волны (частоты);
- ♦ основные элементы колебательного контура и приемника радиоволн.

Ты сможешь **объяснить**:

- ♦ причины возникновения колебаний пружинного и математического маятника;
- ♦ процесс возникновения колебаний в колебательном контуре;
- ♦ распространение механических и электромагнитных волн;
- ♦ превращение энергии в колебательном контуре;
- ♦ сущность метода идеализации на примере гармонических колебаний;
- ♦ экологические проблемы, возникающие в связи с применением радиосвязи.

Ты будешь **уметь**:

- ♦ называть признаки гармонических колебаний;
- ♦ записывать уравнения гармонических колебаний и периода колебаний в колебательном контуре;
- ♦ определять основные характеристики колебательного и волнового движений;
- ♦ проводить описание колебаний математического маятника, распространения упругой волны;
- ♦ представлять упругие и электромагнитные колебания схематически;
- ♦ определять период механических и электромагнитных колебаний;
- ♦ исследовать зависимость частоты колебаний математического маятника от длины подвеса;
- ♦ решать задачи на определение частоты, периода колебаний и длины волны;
- ♦ представлять результаты расчетов и исследований в виде графиков и формул.



# КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

129

## § 42. Колебательное движение. Свободные колебания

Колебания – это любой процесс, в котором состояние тела или системы тел со временем повторяются. Колебания являются наиболее распространенной формой движения в природе.

**Колебания – это любой процесс, повторяющийся во времени.**



Колеблются деревья под действием ветра, поршни двигателя автомобиля под действием продуктов сгорания топлива. Мы можем разговаривать благодаря колебаниям голосовых связок гортани и слышать вследствие колебаний барабанных перепонки. Колебательным является биение сердца. С колебаниями связан и свет, который возникает при колебаниях молекул и атомов. С помощью электромагнитных колебаний, которые распространяются в пространстве, можно осуществлять радиосвязь, радиолокацию, лечить и диагностировать многие болезни.

В приведенных примерах колебаний на первый взгляд мало общего. Но при детальном исследовании приведенных примеров можно найти их общие свойства: различные по происхождению и природе колебания описываются одинаковыми



уравнениями, имеют общие характеристики, это существенно облегчает их изучение и исследование.

Колебания бывают периодическими и непериодическими. Первые – это колебания, в которых состояние системы повторяется через одинаковые интервалы времени. В природе такие процессы практически не встречаются, но в теоретических исследованиях эти обобщения дают возможность вести продуктивные исследования.



**Колебания, в которых состояние системы повторяется через одинаковые интервалы времени, называются периодическими.**

Непериодические колебания не имеют постоянного периода колебаний и являются процессами, в которых состояние системы повторяется через произвольные и, как правило, неодинаковые интервалы времени. Такими, например, являются колебания веток дерева под действием порывов ветра.

130



**Непериодические колебания не имеют постоянного периода колебаний.**

Простейшими колебаниями являются так называемые гармонические колебания. Это колебания, в которых основные физические величины, касающиеся колебаний, изменяются по закону синуса или косинуса. Без изучения этих колебаний нельзя изучить более сложные колебания.



**Колебания, в которых основные физические величины, касающиеся колебаний, изменяются по закону синуса или косинуса, называются гармоническими.**

При изучении колебательных процессов для упрощения измерений и расчетов пользуются замкнутой системой, в которой тела взаимодействуют только в пределах определенной системы. *Колебания, происходящие в замкнутой системе, называются свободными.*

Примером свободных колебаний являются колебания пружинного маятника.



Пружинный маятник – это грузик некоторой массы  $m$ , укрепленный на конце пружины, которая в свою очередь укреплена неподвижно (рис. 3.1). Почему же этот маятник может колебаться? Отведем грузик от положения равновесия  $OO'$  на расстояние  $+x$ . При этом согласно закону Гука возникнет сила упругости, которая будет действовать на тело в направлении равновесия:  $F_{\text{упр}} = -kx$ .



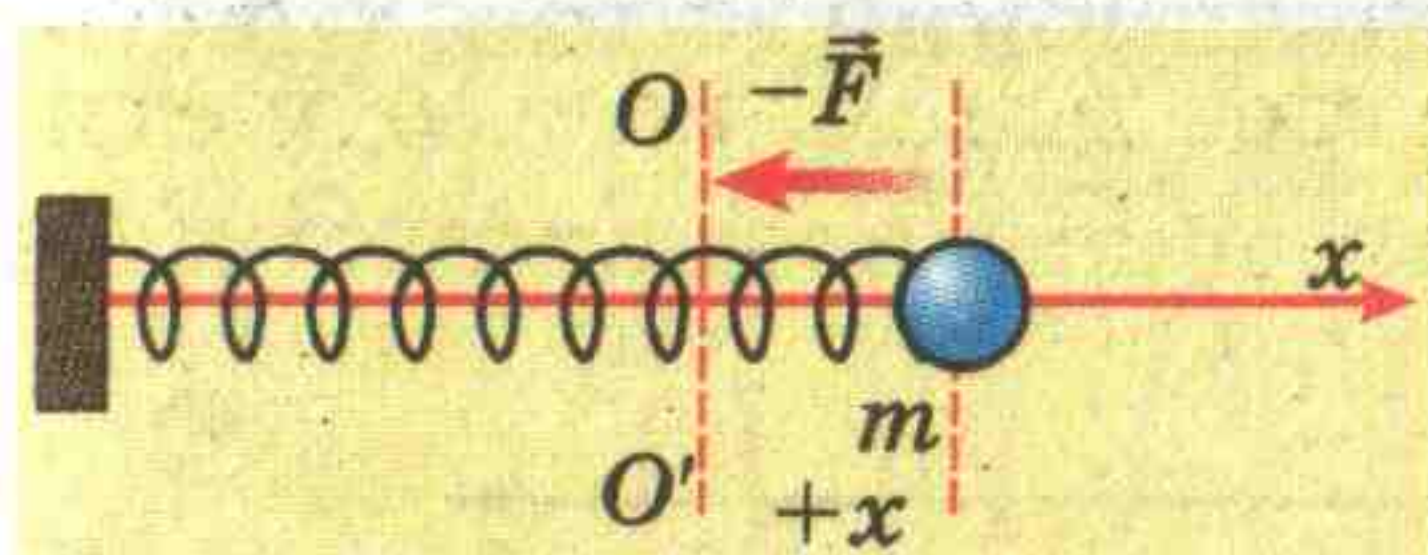
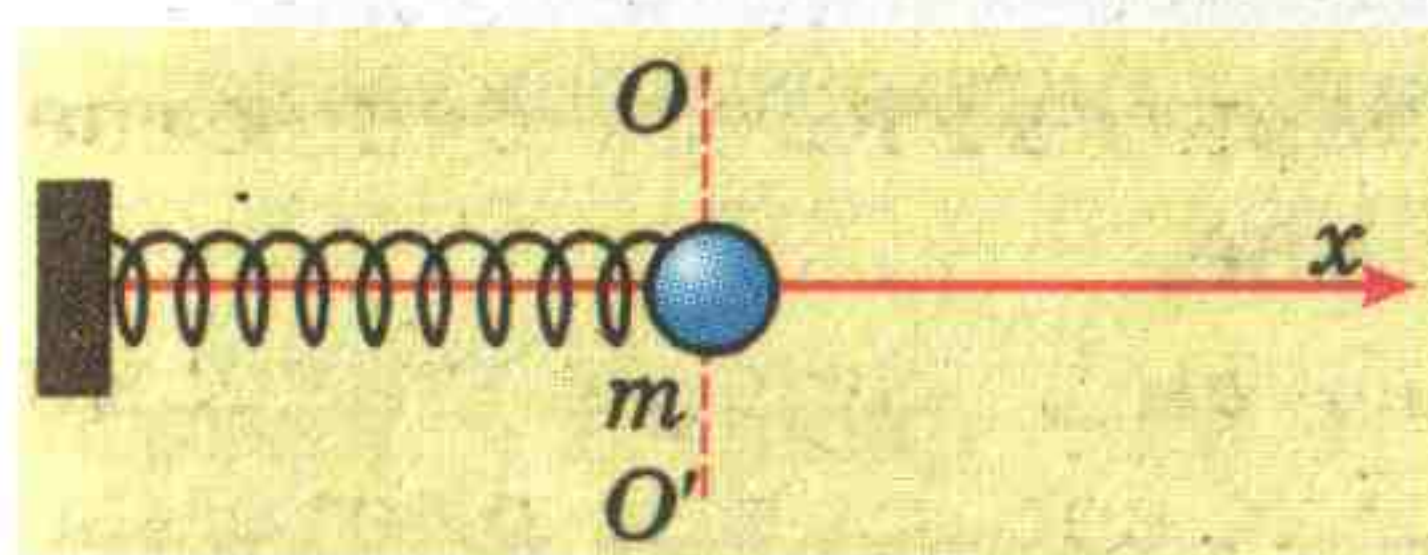


Рис. 3.1. Колебания пружинного маятника

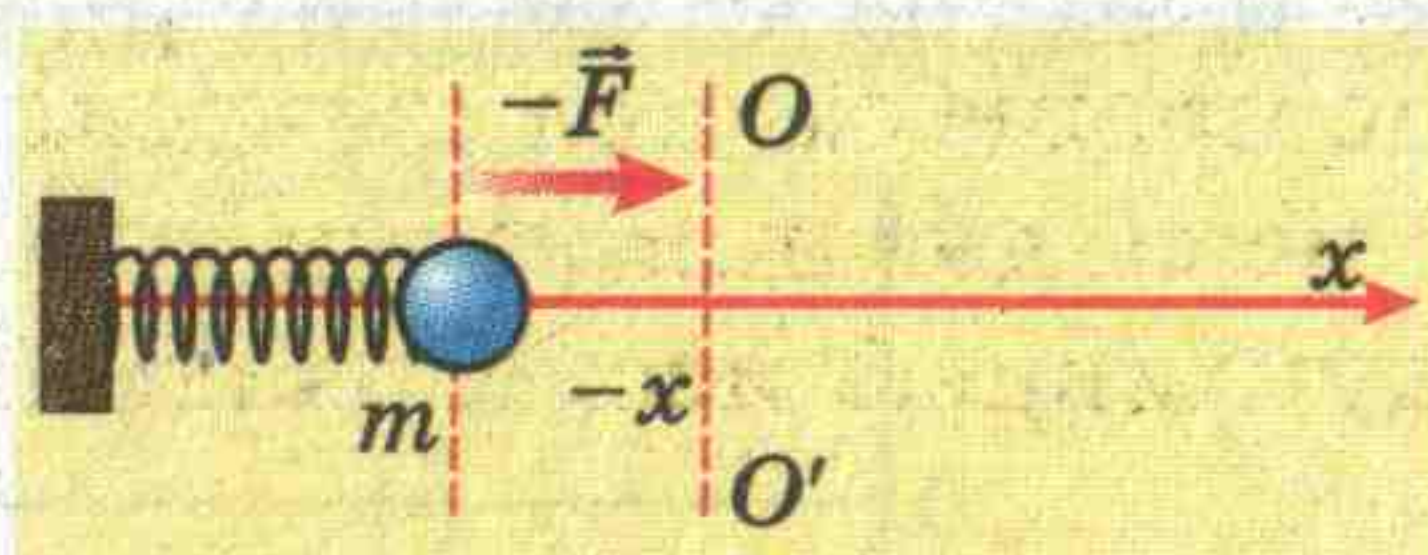
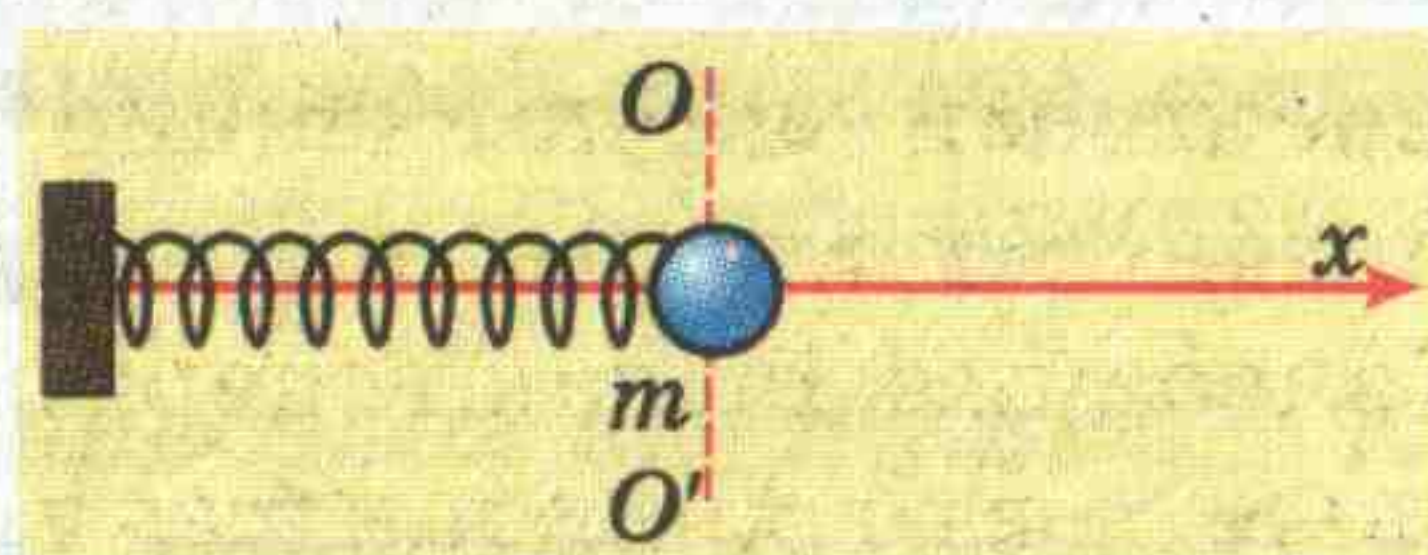


Рис. 3.2. Грузик движется влево

Если освободить грузик, то он начнет двигаться до положения равновесия с ускорением  $\vec{a}$ . Согласно второму закону Ньютона  $\vec{F} = m\vec{a}$ .

В момент прохождения грузика через положение равновесия его скорость и кинетическая энергия будут максимальными (рис. 3.2).

Имея определенную кинетическую энергию, грузик по инерции продолжает двигаться дальше (влево), выполняя работу по деформации пружины. Сила упругости, возникающая при этом, направлена к положению равновесия. Когда грузик окажется в крайнем левом положении, на него будет действовать сила упругости, направленная к положению равновесия (вправо). Под действием этой силы грузик начнет ускоренно двигаться до положения равновесия (вправо). Если предположить, что силы трения и сопротивления воздуха ничтожны, то процесс должен продолжаться бесконечно.

Записав совместно формулу второго закона Ньютона и закона Гука, получим уравнение движения грузика:

$$ma = -kx.$$

Отсюда

$$a = -\frac{k}{m} \cdot x.$$

В этом уравнении величина  $\frac{k}{m}$  всегда положительная, поскольку жесткость пружины и масса грузика не могут быть отрицательными. Поэтому эту величину обозначают символом  $\omega_0^2$ , а уравнение движения тела на пружине записывают в виде

$$a = -\omega_0^2 x.$$

**Общее уравнение колебаний:**

$$a = -\omega_0^2 x.$$





Решением этого уравнения является периодическая функция

$$x = A \sin(\omega t + \alpha),$$

где  $A$  — амплитуда колебаний;  $(\omega t + \alpha)$  — фаза;  $\alpha$  — начальная фаза. Поскольку смещение груза  $x$  происходит по закону синуса, то такие колебания являются гармоническими (рис. 3.3).

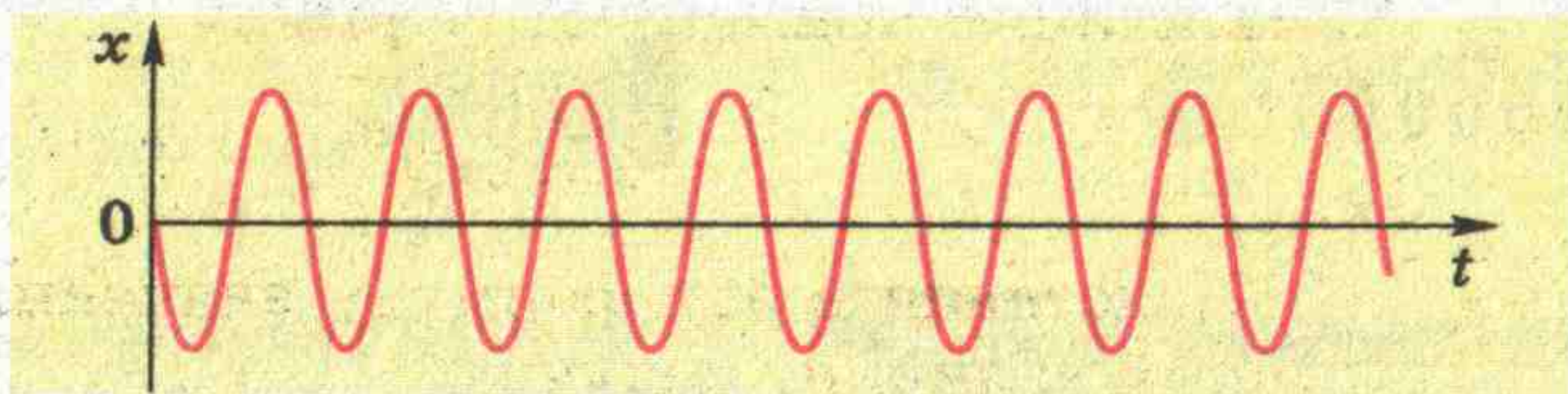


Рис. 3.3. График незатухающих гармонических колебаний

Воспользовавшись тем, что  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ , получим формулу периода колебаний пружинного маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Кроме смещения по гармоническим законам, изменяются скорость и ускорение движения груза.

Поскольку в реальных условиях в каждой системе действуют силы трения и сопротивления, то амплитуда колебаний будет постепенно уменьшаться (рис. 3.4).

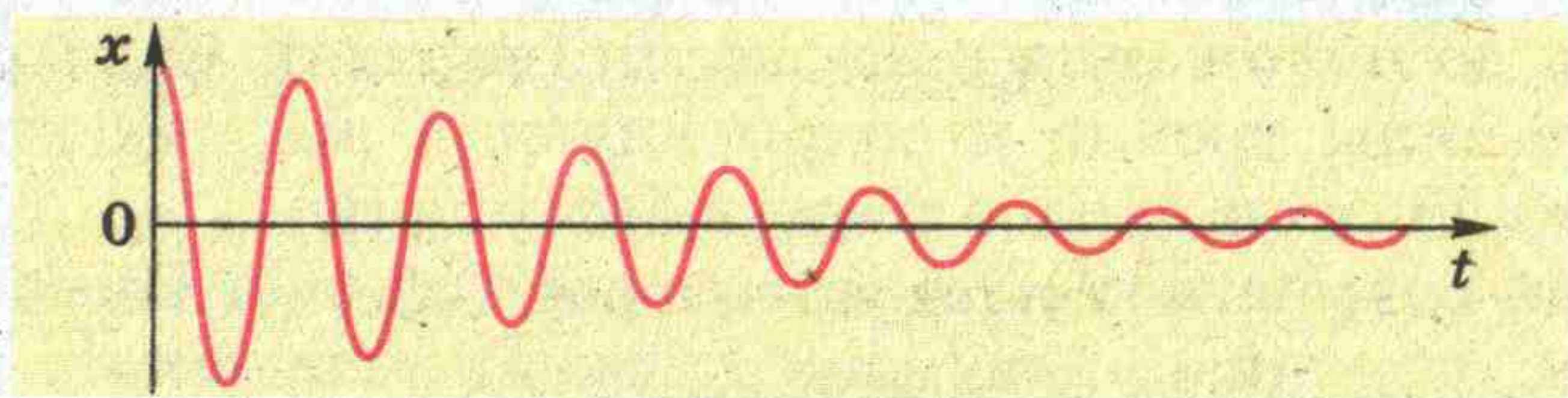


Рис. 3.4. График свободных колебаний

Свободные колебания в реальных условиях всегда затухающие, поскольку в каждой колебательной системе действуют силы трения. Поэтому каждая следующая амплитуда колебаний будет меньше предыдущей. Если бы удалось создать идеальную систему, в которой не действуют силы трения, то колебания в этой системе были бы незатухающими. Поскольку такие идеализации применяются в физике для исследования колебаний, то частоту незатухающих колебаний в идеальной системе называли **собственной частотой**.



**Частоту колебаний в идеальной системе, в которой отсутствуют силы трения, называют собственной частотой.**



**Задача.** Определить период колебаний груза, который имеет массу 100 г и подвешен к пружине, коэффициент упругости которой 10 Н/м.

**Дано:**

$$m = 100 \text{ г},$$

$$k = 10 \text{ Н/м}.$$

$T = ?$

**Решение**

Для расчета периода колебаний пружинного маятника применяют формулу

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Подставив в эту формулу значения физических величин, получим

$$T = 2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{\frac{0,1 \text{ кг}}{10 \text{ Н/м}}} = 0,628 \text{ с}.$$

**Ответ:** период колебаний пружинного маятника равен 0,628 с.

1. Какой процесс называется колебанием?
2. Какое отличие между периодическими и непериодическими колебаниями?
3. Какие колебания называются гармоническими?
4. Какие колебания называются свободными?
5. Чем пренебрегают рассматривая свободные колебания в реальных колебательных системах?
6. Что является причиной возникновения колебаний пружинного маятника?
7. Как записывается общее уравнение колебаний пружинного маятника?

## Упражнение 20

1. На рисунке 3.5 изображена ненагруженная пружина, линейка с сантиметровыми делениями, а также пружина, к которой подвешен груз массой 1 кг. Рассчитать период и частоту колебаний груза на пружине.

2. Написать уравнение гармонического колебания тела, если амплитуда колебаний 0,2 м, а частота 2 Гц.

3. Колебание груза на пружине описывается уравнением

$$x = 0,1 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

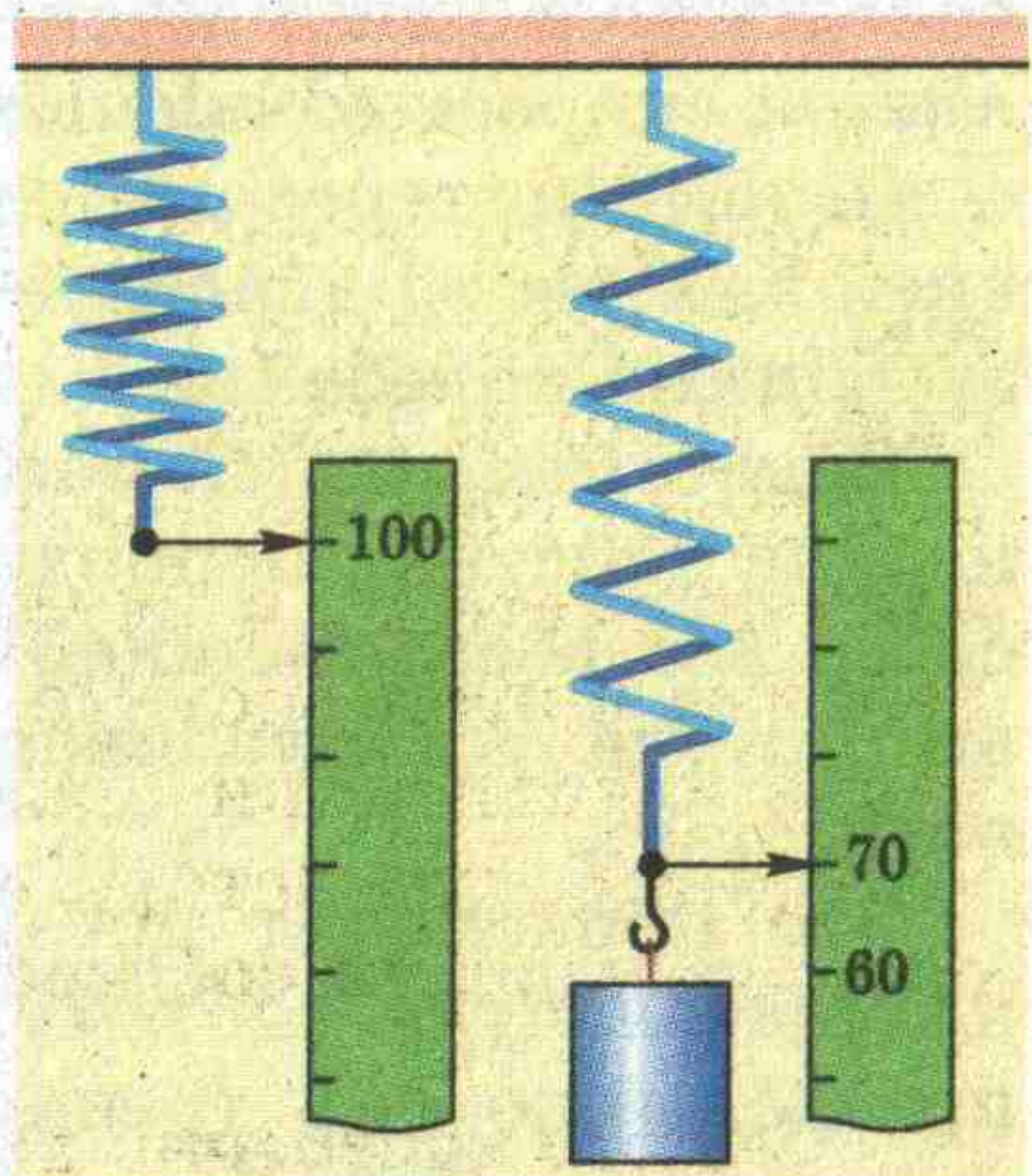


Рис. 3.5. К задаче 1



Определить:

- а) амплитуду колебаний;
- б) частоту колебаний;
- в) период;
- г) начальную фазу.

4. Грузик массой 100 г колеблется на пружине с частотой 2 Гц. Найти жесткость пружины.

5. Какова частота колебаний груза массой 200 г, происходящих в горизонтальной плоскости на пружине жесткостью 16 Н/м?

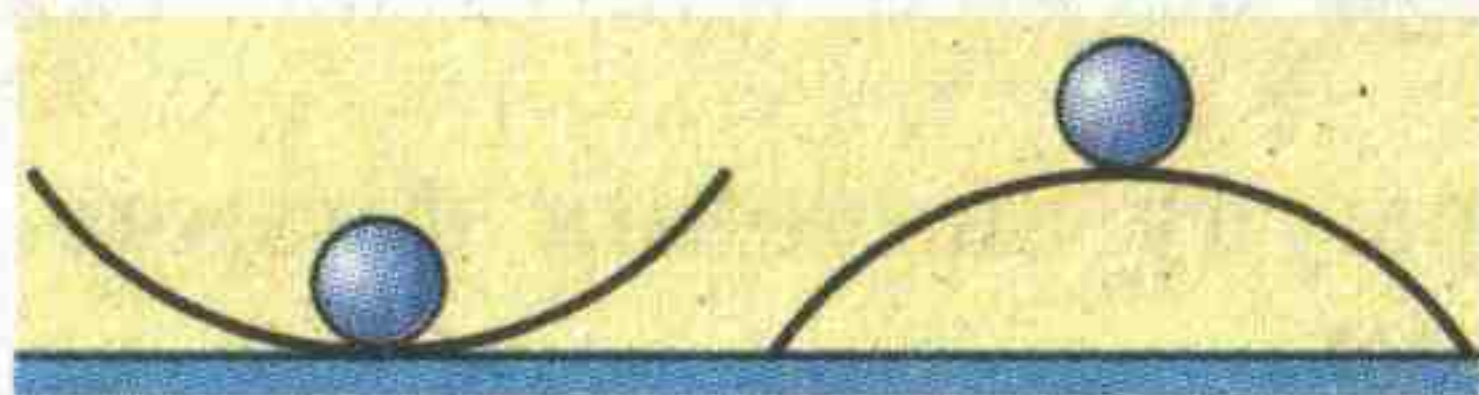


Рис. 3.6. К задаче 6

6. Какой из шариков, изображенных на рисунке 3.6, может совершать колебания?

## § 43. Вынужденные колебания

134

Во многих технологических процессах происходят колебания, которые должны быть долговременными. Поэтому создают условия для получения незатухающих колебаний. С этой целью в технических установках применяют вынужденные колебания. Это колебания, происходящие под действием внешней силы, которая периодически изменяется. Такими, например, являются колебания поршней в автомобильном двигателе, происходящие вследствие периодического действия газа во время рабочего хода поршня.

Вынужденными колебаниями является и переменный ток, который возникает в рамке, вращающейся в магнитном поле.

Частота вынужденных колебаний определяется частотой действия вынуждающей силы.

Регулируя подачу горючего в цилиндр, можно изменять частоту колебаний поршней. Частота переменного тока определяется скоростью вращения ротора турбины.

Особый интерес представляет случай, когда периодическая внешняя сила, действует на тело, которое может совершать свободные колебания.

Если в начальный момент тело было неподвижным, то после начала действия периодической силы оно начинает колебаться со все возрастающей амплитудой. Через некоторое время амплитуда устанавливается постоянной и в дальнейшем не возрастает.

Это происходит потому, что вся энергия, приходящая в колебательную систему, идет на выполнение работы по преодолению сил трения в системе. Если изменять частоту вынуждающей силы, то можно обнаружить явление резонанса. При частоте, равной собственной частоте колебаний системы,



резко возрастает амплитуда. Сильно раскачать качели можно только в том случае, если подталкивать их будем «в такт» с частотой собственных колебаний качели. *Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний называют резонансом.*

**Резонанс наступает тогда, когда частота действия вынуждающей силы будет равна собственной частоте колебаний системы.**

$$f_{\text{вын}} = f_{\text{соб}}$$



После повышения частоты выше резонансной амплитуда начнет убывать. Для каждой колебательной системы существует определенная частота, при которой наступает резонанс.

На рисунке 3.7 показана графическая зависимость амплитуды колебаний от частоты вынуждающей силы. Высота резонансной кривой, изображенной на этом рисунке, зависит от значения сил трения в колебательных системах. Так, график показывает, что резонансные частоты в трех колебательных системах одинаковые, но силы трения будут различными. Выше кривая — меньше силы трения.

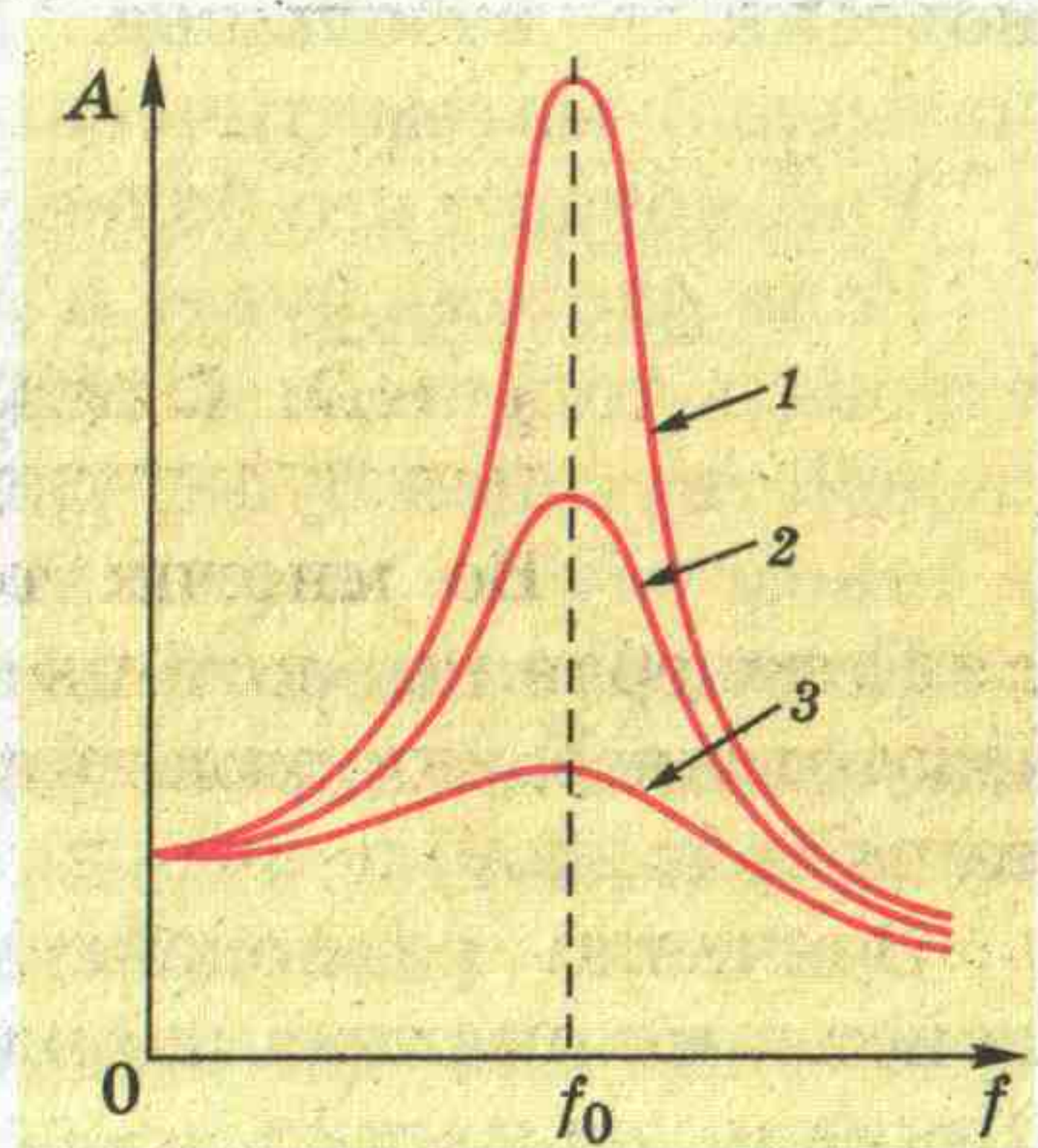


Рис. 3.7. Резонансные кривые для разных значений силы трения

С явлением резонанса мы встречаемся довольно часто и в быту, и в технике. Действие этого явления может быть как полезным, так и вредным. Так, чтобы выехать из лужи или песка, водитель с определенной частотой включает и выключает сцепление, раскачивая автомобиль. Увеличение амплитуды колебаний автомобиля содействует его выезду из выбоины.

Достоянием истории стала катастрофа с Бруклинским мостом в Нью-Йорке, который разрушился вследствие резонанса.

1. Какие колебания называют вынужденными?
2. Чем определяется частота вынужденных колебаний?
3. От чего зависит амплитуда вынужденных колебаний?
4. При каких условиях наступает резонанс?
5. Какие данные о колебательной системе можно получить, анализируя резонансные кривые?
6. Какие факторы определяют высоту резонансной кривой?





## § 44. Математический маятник

Одной из систем, которые могут совершать колебания, является нитяной маятник. Это тело небольших размеров, подвешенное на длинной нерастяжной нити. Выведенная из положения равновесия, эта система может совершать колебания.

Рассмотрим причины, вызывающие колебания в этой системе. Для удобства расчетов будем считать, что тело имеет размеры, намного меньшие длины нити, а отклонение от равновесия — небольшое. Маятник с такими ограничениями называют математическим.

Рассмотрим его более подробно.

Если система будет в равновесии, то на маятник будут действовать только сила тяжести и сила упругости нити. Их равнодействующая будет равна нулю (рис. 3.8). Естественно, что в таком случае шарик не будет двигаться.

136

Если груз вывести из положения равновесия, то равнодействующая  $\vec{F}$  сил тяжести и упругости уже будет отличной от нуля (рис. 3.9).

Значение равнодействующей определим по рисунку на основании анализа параллелограмма сил:  $F = mgtg\varphi$ . При малом угле отклонения  $tg\varphi \approx \sin\varphi = \frac{x}{l}$ , где  $l$  — длина подвеса;  $x$  — смещение тела от положения равновесия.

Применим к описанию движения математического маятника второй закон Ньютона с учетом, что смещение груза на-

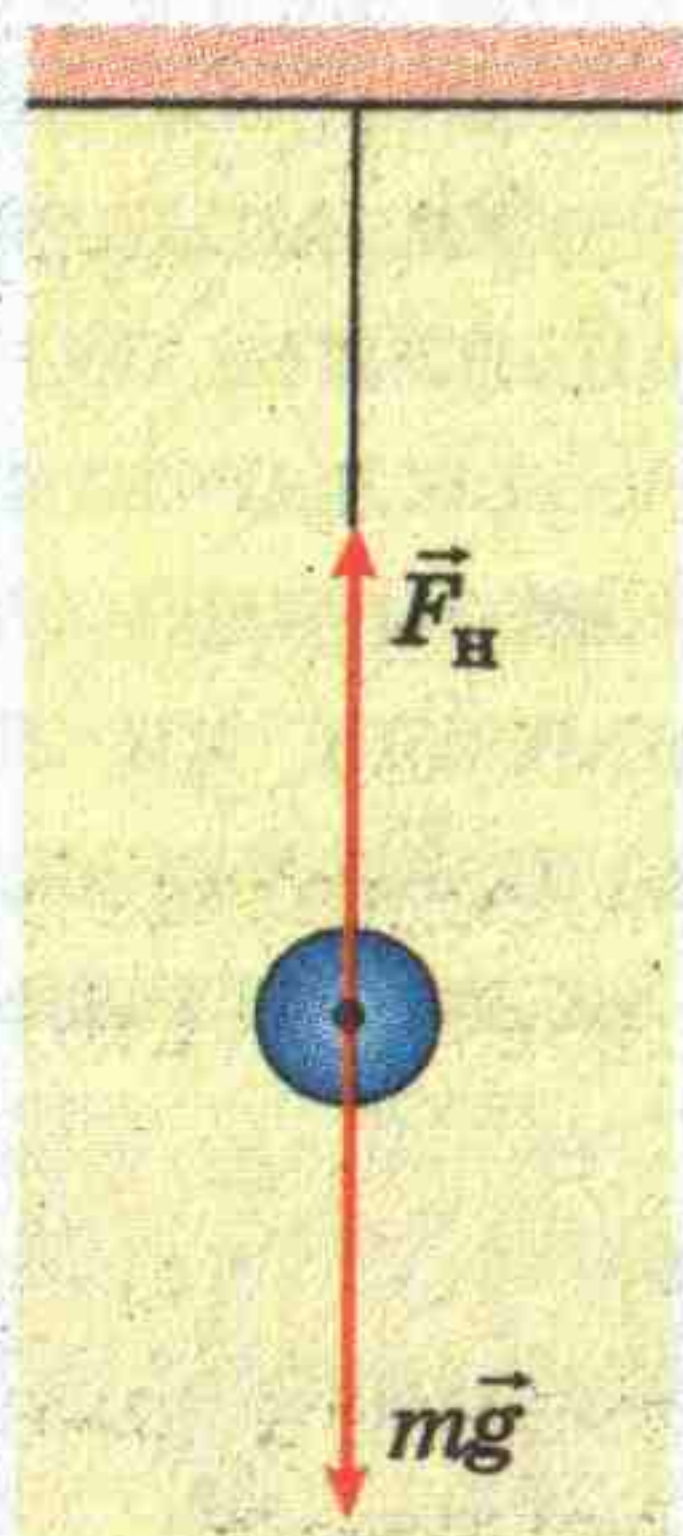


Рис. 3.8. Нитяной (математический) маятник в положении равновесия

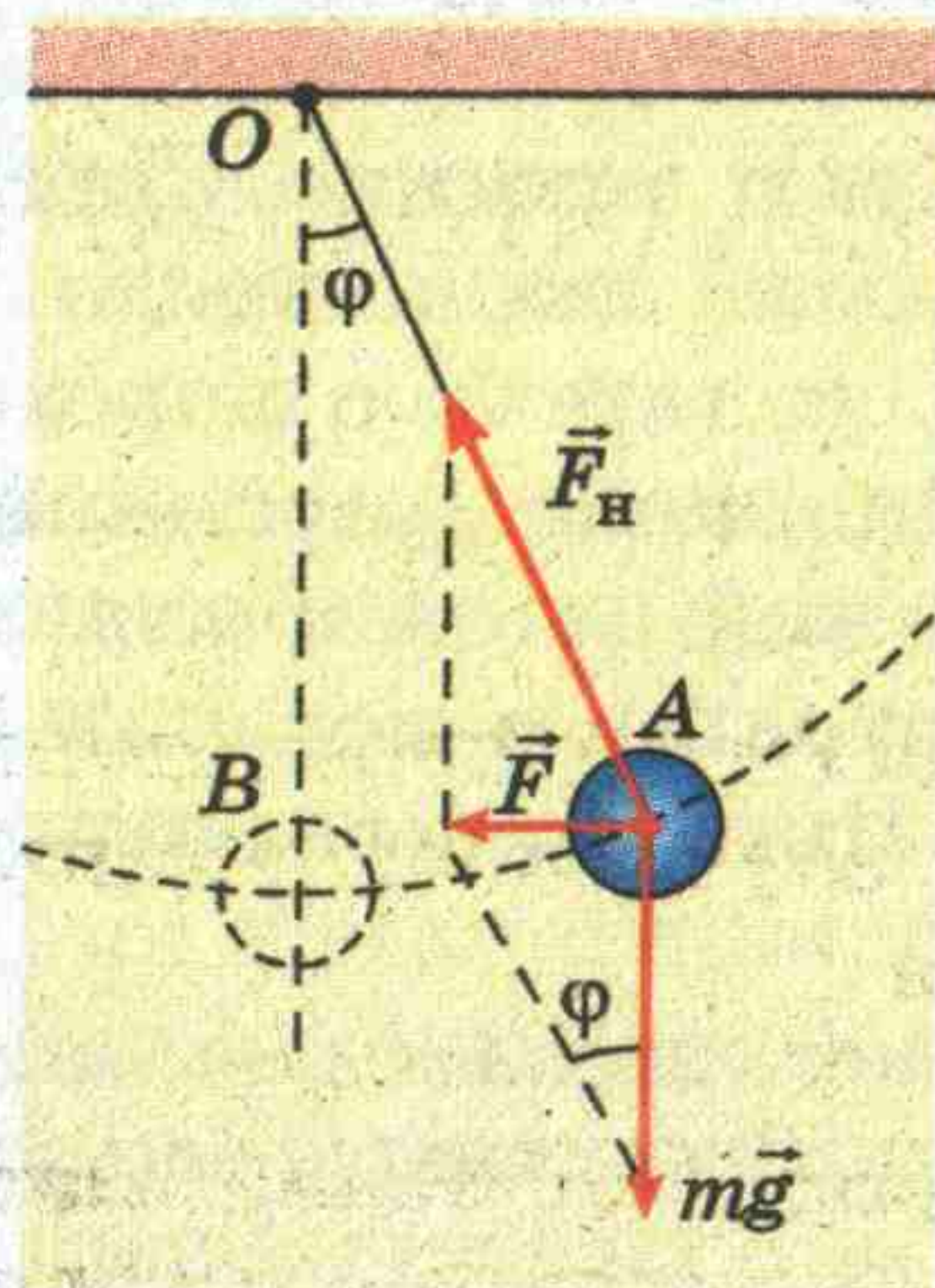


Рис. 3.9. Равнодействующая сил тяжести и упругости направлена к положению равновесия



правлено в сторону, противоположную равнодействующей:

$$ma = -mg \operatorname{tg} \varphi = -mg \frac{x}{l}.$$

Отсюда

$$a = -\left(\frac{g}{l}\right) \cdot x.$$

Величина  $\frac{g}{l}$  всегда положительная. Поэтому ее можно обозначить  $\omega_0^2$ . Тогда уравнение движения математического маятника будет иметь вид:  $a = -\omega_0^2 x$ .

**Математический маятник совершает гармонические колебания по уравнению, решением которого является функция:**

$$x = A \sin(\omega t + \alpha).$$



Из курса математики известно, что решением этого уравнения является функция  $x = A \sin(\omega t + \alpha)$ . Поскольку эта функция гармоническая, то и колебания математического маятника называют гармоническими.

137

По уравнению движения математического маятника можно найти формулу для расчета периода и частоты колебаний математического маятника. Для этого будем учитывать, что величина, обозначенная как  $\omega_0$ , является угловой частотой и

равна  $\omega_0 = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ . Здесь  $f$  – частота колебаний,  $T$  – период колебаний. Из уравнения движения получим  $\omega_0^2 = \frac{g}{l}$ . Или, подставив значение угловой частоты:  $\frac{g}{l} = \frac{4\pi^2}{T^2}$ . Отсюда

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

Таким образом, период колебаний математического маятника зависит от длины подвеса и ускорения свободного падения.

**Период колебаний математического маятника зависит от длины подвеса и ускорения свободного падения:**

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





Зависимость частоты колебаний математического маятника находят из соотношения

$$f = \frac{1}{T}, \text{ или } F = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}}.$$

**Задача.** Маятник длиной 150 см за 300 с совершает 122 колебания. Чему равно ускорение свободного падения?

Дано:

$$l = 150 \text{ см},$$

$$t = 300 \text{ с},$$

$$N = 122.$$

$$g = ?$$

Решение

При такой длине маятник можно считать математическим. Связь между параметрами математического маятника устанавливает формула для периода колебаний

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

Согласно этой формуле  $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ .

Если учесть, что  $T = \frac{1}{f}$ , а  $f = \frac{N}{t}$ , то получим

$$g = \frac{4\pi^2 l N^2}{t^2}.$$

Подставив значения физических величин, получим

$$g = \frac{4 \cdot 9,87 \cdot 1,5 \text{ м} \cdot 14884}{9 \cdot 10^4 \text{ с}^2} = 9,78 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

**Ответ:** ускорение свободного падения в этом случае составляет  $9,78 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

1. Какой маятник называется математическим?
2. Почему математический маятник совершает колебания?
3. Как направлена равнодействующая сил, действующих на маятник?
4. Связь между какими величинами устанавливает уравнение движения математического маятника?
5. От каких величин зависит период колебаний математического маятника?
6. Как зависит период колебаний математического маятника от длины подвеса?
7. Зависит ли период колебаний от амплитуды колебаний и массы груза?
8. Как зависит период колебаний математического маятника от его массы?



## Упражнение 21

1. Найти период колебаний маятника длиной 1 м.
2. Какой должна быть длина маятника, чтобы период его колебаний был равен 1 с? Какая частота этих колебаний?
- 3\*. Написать уравнение гармонических колебаний маятника с амплитудой 5 см, если за одну минуту совершается 150 колебаний, а начальная фаза  $45^\circ$ . В каком положении будет маятник через 0,2 с после начала движения?
4. Насколько «уйдут» часы с маятником вперед, если их перенести с экватора на полюс?
5. Маятник совершает 24 колебания за 30 с. Найдите период и частоту колебаний маятника? Найдите его амплитуду, если его отклонить на  $5^\circ$ .
- 6\*. Частота свободных колебаний маятника на Земле 0,5 Гц. Найти частоту его колебаний на Луне, где ускорение свободного падения в 6 раз меньше, чем на Земле.
- 7\*. Два маятника отклонены от положения равновесия и отпущены одновременно. Первый маятник длиной 4 м за некоторое время совершил 15 колебаний. Второй – за то же время совершил 10 колебаний. Какая длина второго маятника?
8. Координата колеблющегося тела изменяется по закону  $x = 3,5 \cos 4\pi t$ . Найти амплитуду и частоту колебаний.

## Лабораторная работа № 4

### Изготовление маятника и определение периода его колебаний

**Цель.** Исследовать зависимость периода колебаний нитяного маятника от амплитуды, массы и длины подвеса.

**Оборудование.** Небольшие грузики различной массы; штатив, линейка или мерная лента с миллиметровыми делениями; секундомер (рис. 3.10).

#### Выполнение работы

1. Подвесить один грузик на нитке к лапке штатива.
2. Отклонить грузик от положения равновесия на небольшой угол и отпустить.
3. Измерить время 10...50 полных колебаний, определить частоту и период этих колебаний.



Рис. 3.10. К лабораторной работе



4. Повторить опыт по п. 3, изменив начальное отклонение нити.

5. Повторить опыты по пп. 1–4 для грузиков различной массы.

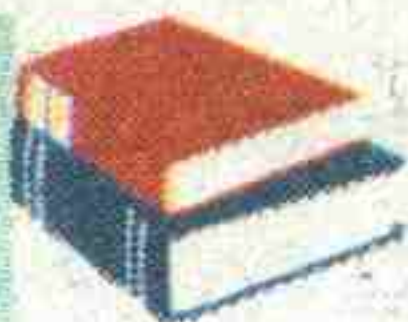
6. Изготовить маятник длиной 1 м и определить период его колебаний.

7. Повторить опыт по п. 6 для маятника длиной 0,25 м.

8. Сравнить результаты опытов по пп. 6 и 7, рассчитав отношение  $\frac{l_1}{l_2}$  и  $\frac{T_1^2}{T_2^2}$ . Сделать выводы.

Обобщить результаты своего исследования как ответ на вопрос: от каких величин зависит период колебаний нитяного маятника?

## § 45. Энергия колебательного движения



140

В механике различают кинетическую и потенциальную энергии. Кинетическая энергия определяется массой тела и его скоростью.

Потенциальную энергию тела в поле земного тяготения определяют по формуле  $E_{\text{п}} = mgh$ , потенциальную энергию упруго деформированного тела (например, пружины) по формуле  $E = \frac{kx^2}{2}$ .

Если внимательно рассмотреть движение грузика на пружине (см. рис. 3.1 и 3.2), то здесь периодически будут изменяться как скорость тела, так и сила упругости пружины. Таким образом, периодически будут изменяться как кинетическая, так и потенциальная энергии. Кинетическая энергия будет максимальной в момент прохождения телом положения равновесия, когда его скорость будет максимальной. Потенциальная энергия приобретет максимальное значение через четверть периода, когда будет максимальным отклонение от положения равновесия.

До сих пор мы рассматривали случаи колебаний, пренебрегая потерями механической энергии. Для этого случая действует закон сохранения механической энергии:

$$E_{\text{п}} + E_{\text{к}} = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = \text{const.}$$

Соответственно этому закону максимальное значение потенциальной энергии будет при максимальном отклонении, когда кинетическая энергия (и скорость) равна нулю:



$$E_{п max} = \frac{kA^2}{2},$$

где  $A$  — максимальное отклонение тела от положения равновесия (амплитуда).

Если потери механической энергии в системе отсутствуют, то

$$\frac{kA^2}{2} = \frac{mv_{max}^2}{2} = \text{const.}$$

Из последнего уравнения можно рассчитать скорость, с которой тело проходит положение равновесия.

1. В каких точках траектории колеблющееся тело имеет только кинетическую энергию?
2. В какие моменты движения тело имеет только потенциальную энергию?
3. Как определяют потенциальную энергию колеблющегося тела? Какое максимальное значение этой энергии может иметь это тело?
4. Какое максимальное значение кинетической энергии может иметь колеблющееся тело? Какое значение скорости для этого случая?
5. Чему равна полная механическая энергия колеблющегося тела в произвольной точке траектории?



141

## § 46. Механические волны. Длина волны

Колебания как процесс могут распространяться в пространстве. Для подтверждения этого подвесим на нити, закрепленной в штативе, несколько маятников и один из них приведем в колебательное движение (рис. 3.11).

Спустя некоторое время все маятники будут совершать колебания. Таким образом, механические колебания могут передаваться от одного тела к другому через упругие связи. Подобное происходит и в природе.

Если бросить камень в воду озера, то можно увидеть, как от него во все стороны распространяются круги-волны, в которых частицы воды колеблются в вертикальном

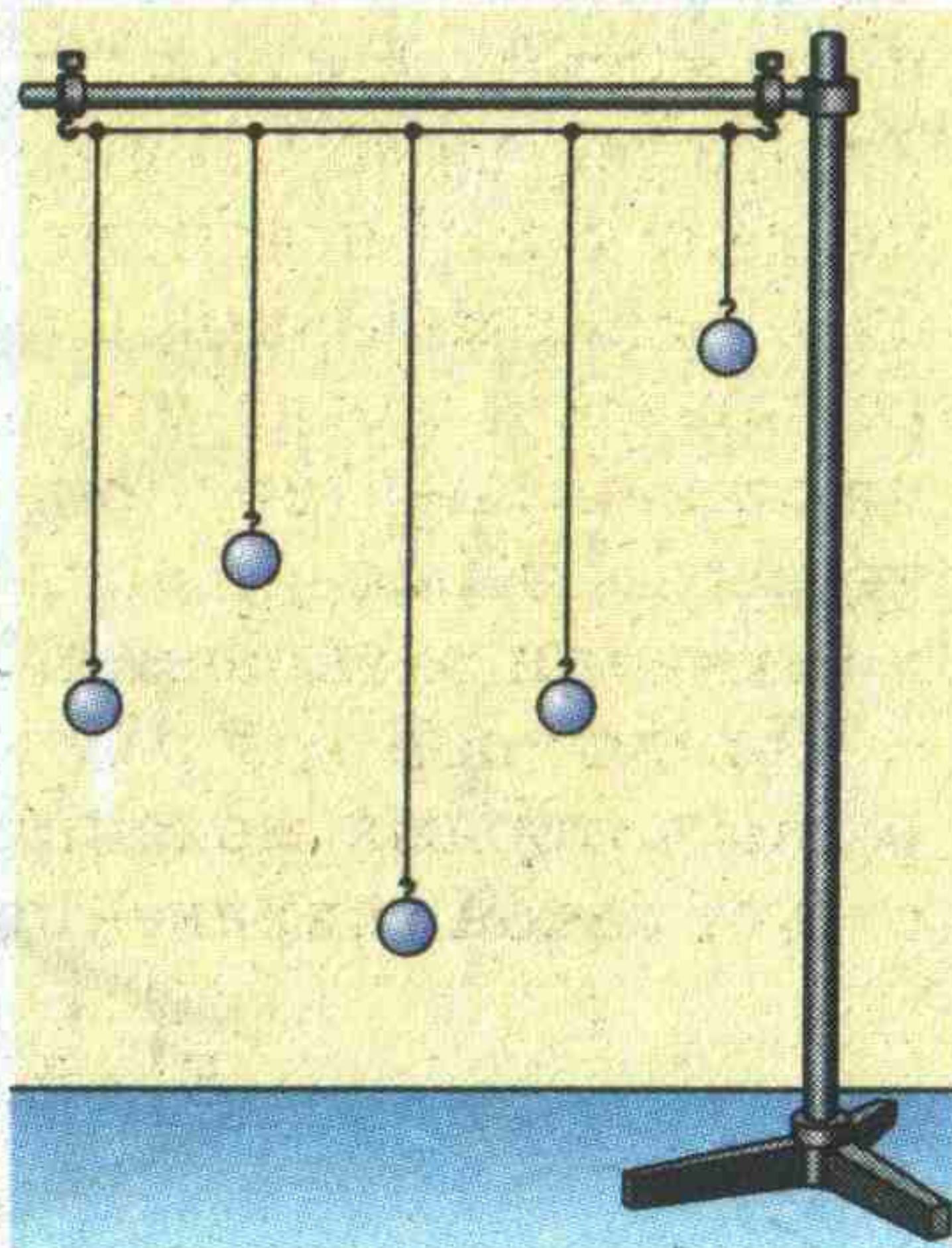


Рис. 3.11. Маятники на нити



направлении. Поплавок, плавающий рядом с точкой попадания камня, будет совершать только вертикальные колебания, не смещаясь в сторону. В данном случае происходит весьма сложный процесс. С одной стороны, частицы воды совершают колебания, перемещаясь в вертикальном направлении, а с другой – колебания распространяются в горизонтальном направлении. Но смещения частиц воды в горизонтальном направлении не происходит. Поэтому поплавок на воде хотя и колеблется, но к берегу не приближается.

Распространяются только колебания частиц воды – волны.

Процесс распространения колебаний в упругой среде называют *механической волной*.

Как и любое другое физическое явление, волна имеет свои определенные характеристики.

Одной из величин, характеризующих волну, является скорость волны. Все известные науке волны распространяются не мгновенно, а на протяжении определенного времени, с определенной скоростью.

Каков же механизм образования волн?

142



**Волна – процесс распространения колебаний.**

Проанализировав рассмотренные ранее примеры, можно отметить, что механическая волна распространяется в упругой среде. Для того чтобы представить процесс распространения волны в упругой среде, промоделируем его с помощью шариков некоторой массы, соединенных между собой пружинками (рис. 3.12-а). Если сообщить определенный импульс левому крайнему шарiku (рис. 3.12-б), то он начнет движение вверх,

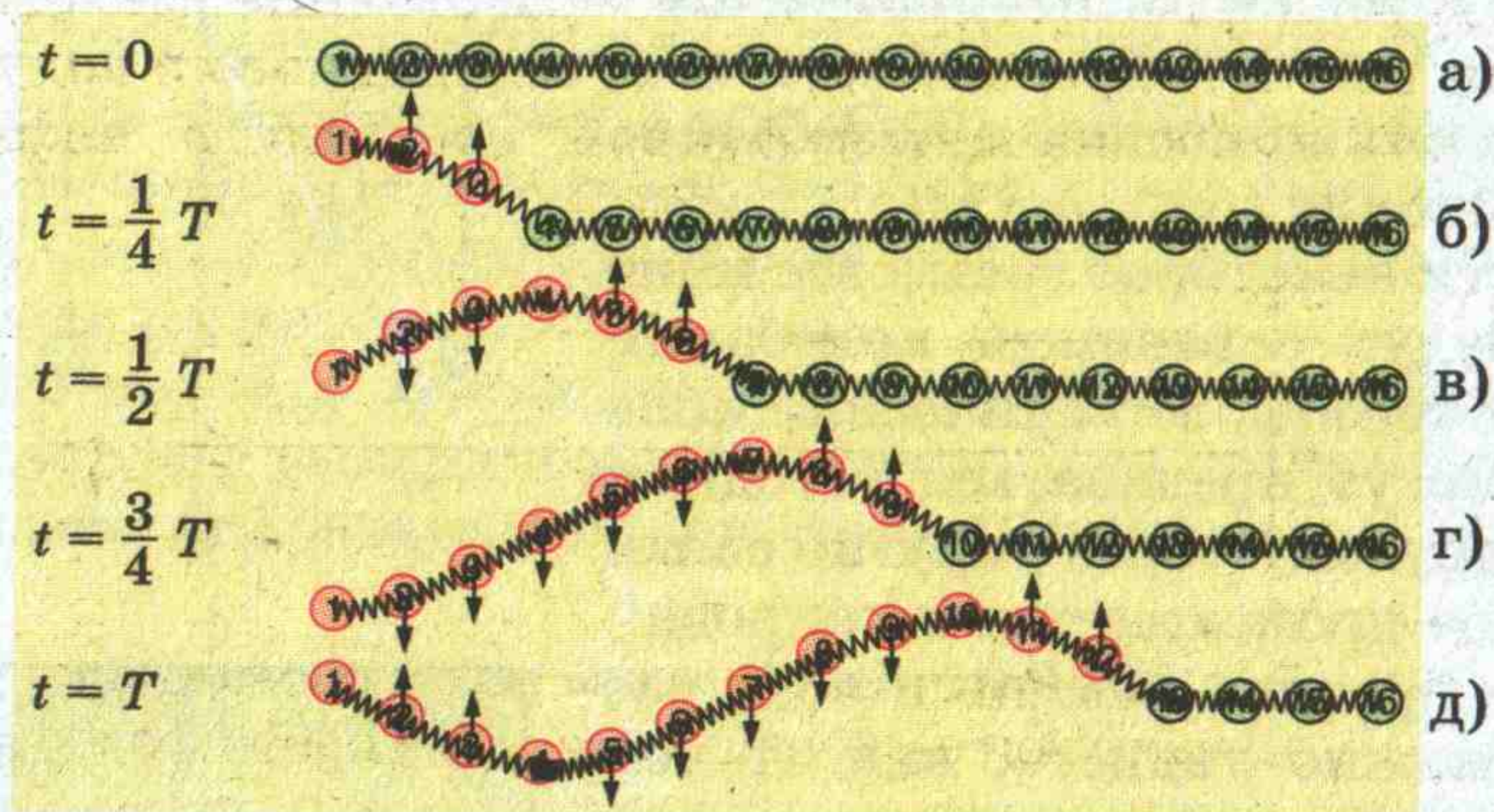


Рис. 3.12. Модель процесса образования поперечной волны



растягивая пружинку. Вследствие этого на второй шарик начнет действовать сила упругости растянутой пружинки, которая будет смещать шарик в том же направлении. Проявление инерции задержит движение второго шарика, который будет отставать от первого шарика (рис. 3.12-в).

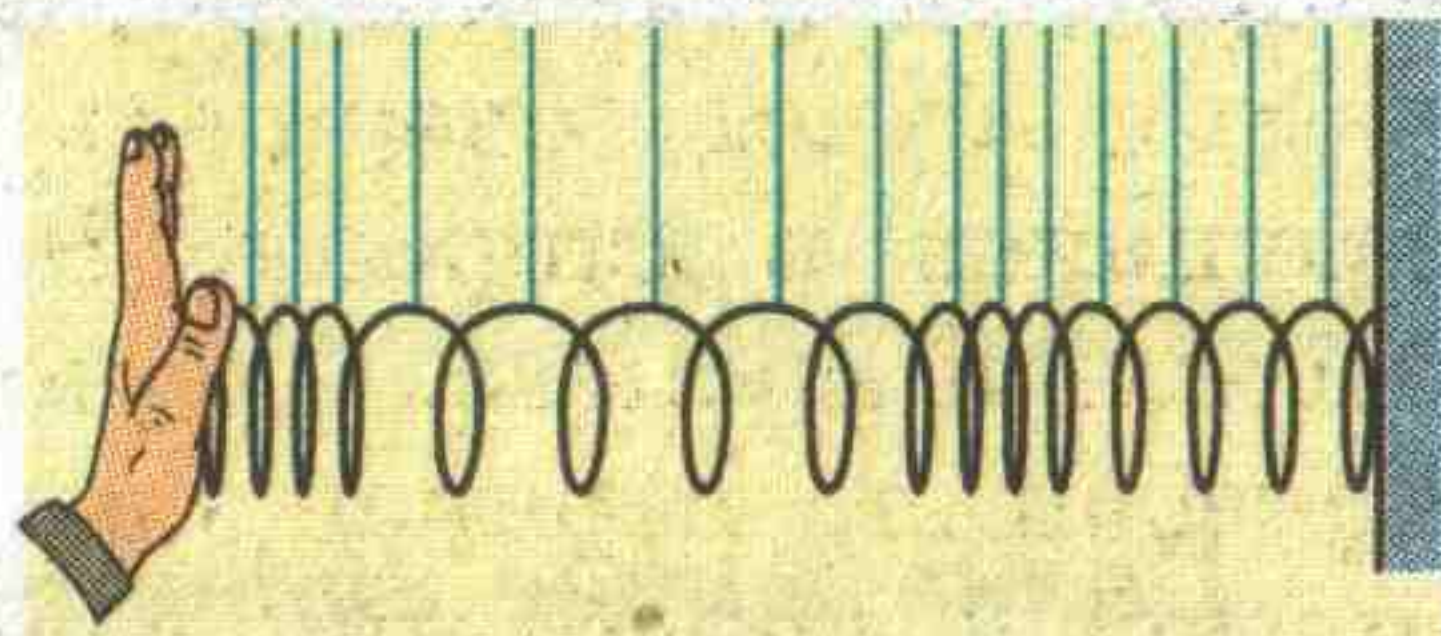


Рис. 3.13. Распространение продольной волны

Если первый шарик привести в колебательное движение, то второй также начнет колебаться, но с некоторым отставанием по фазе. Третий шарик под действием силы упругости второй пружинки также начнет колебаться, еще более отставая по фазе. В итоге все шарики будут колебаться с одинаковой частотой, но со сдвигом по фазе. При этом цепочкой побежит поперечная волна.

Если первому шарiku придать импульс, направленный вдоль прямой, соединяющей оси шариков, то цепочкой распространится продольная волна. Ее можно наблюдать на длинной горизонтальной пружине, одним концом закрепленной на стене (рис. 3.13): после удара по торцу пружины образуются сгустки и разрежения витков, которые будут двигаться вдоль пружины как продольная волна.

Если повторить модельный опыт образования волны в цепочке из пружинок и шариков (рис. 3.12), то можно заметить, что когда первый шарик проходит положение равновесия и движется вверх, то на определенном расстоянии от него существует шарик, который, проходя положение равновесия, также движется вверх, т. е. колебания совершаются в одной фазе.

Расстояние между двумя соседними точками волны, которые колеблются в одинаковой фазе, называют длиной волны (рис. 3.14). Например, это расстояние между двумя гребнями волны, образовавшейся от брошенного в воду камня. Длина волны обозначается буквой греческого алфавита  $\lambda$  (лямбда).

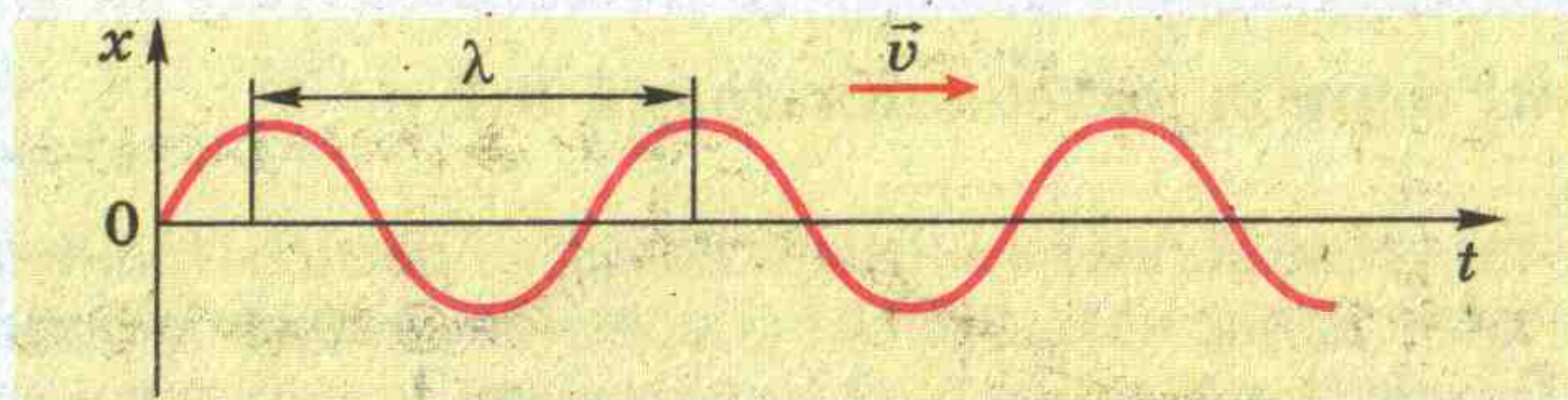


Рис. 3.14. Расстояние между двумя соседними точками волны, колеблющимися в одной фазе

За один период она распространяется на расстояние, равное длине волны. Поэтому скорость распространения волны можно определить через эти величины:



$$v = \frac{\lambda}{T}.$$

Отсюда  $\lambda = vT$ .



**Длина волны равна произведению скорости распространения на период:**

$$\lambda = vT.$$

Так как период связан с частотой формулой

$$T = \frac{1}{f}, \text{ то } \lambda = \frac{v}{f}.$$

Возможно иное определение длины волны: это расстояние, на которое распространяется волна за один период.

Длина волны является универсальной характеристикой для волновых процессов различной природы.

144

**Задача.** Лодка качается на волнах, распространяющихся со скоростью 2,5 м/с. Расстояние между гребнями волн 2,5 м. Найти период колебаний лодки.

**Д а н о :**

$$v = 2,5 \text{ м/с},$$

$$l = 8 \text{ м}.$$

$$T - ?$$

**Р е ш е н и е**

По определению, расстояние между двумя ближайшими гребнями – длина волны. Поэтому можно записать связь между скоростью и периодом колебаний в виде

$$l = vT.$$

Отсюда

$$T = \frac{l}{v}.$$

Подставив значения физических величин, получим

$$T = \frac{8 \text{ м}}{2,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}} = 3,2 \text{ с}.$$

**Ответ:** период колебания лодки 3,2 с.

1. Что такое волна? Каковы условия ее распространения?
2. Какая волна называется поперечной, а какая – продольной?
3. Почему в механической волне между колебаниями отдельных частиц существует разность фаз?
4. От чего зависит скорость волны?
5. Какова зависимость между длиной волны и частотой?
6. Почему волну называют универсальной характеристикой волнового процесса?





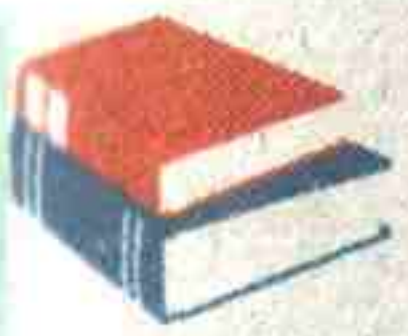
## Упражнение 22

1. Вдоль упругого шнура распространяется поперечная волна со скоростью 20 м/с. Период колебания шнура 0,5 с. Чему равна длина волны?

2. В океанах длина волны составляет 300 м, а период колебаний 15 с. Какова скорость распространения этой волны?

3. За 30 с морская волна 15 раз ударяется о берег. Скорость распространения волны 4 м/с. Найти длину волны.

4. Волны набегают на берег озера, и каждые 12 с береговую линию пересекают три волны. Найти скорость волны, если расстояние между ее гребнями составляет 6 м.



## § 47. Звуковые волны

Звук сопровождает человека на протяжении всей жизни. Он является основным средством общения между людьми, его используют в различных технологических процессах. Как вы знаете, источником звука является колеблющееся тело. Колеблются ножки камертона, излучая звук определенного тона, диффузор громкоговорителя, воссоздавая голос человека или звучание музыкального инструмента. Распространение этих колебаний и воспринимается нами как звук.

Звук является продольной волной, которая распространяется только в упругой среде, в частности в воздухе, воде, металлах, дереве, пластмассе и т. п.

Роль воздуха в распространении звука впервые была раскрыта в 1660 г. английским физиком Р. Бойлем, который открыл, что под колпаком вакуумного насоса, если из-под него выкачан воздух, звук не распространяется.

Звук начали исследовать очень давно. Поэтому для его характеристики применяют специфические величины. Так, высота тона, о которой говорят музыканты, обозначает частоту колебаний: чем больше частота, тем выше тон. Громкость звука связана с амплитудой колебаний: чем больше амплитуда, тем громче звук.

Звуковые волны имеют свойство отражаться от препятствий. Если звуковая волна падает на сплошное препятствие (стену, гору), то она отражается, и мы слышим эхо. Свойство отражаться используют инженеры создавая приборы для определения глубины воды под днищем корабля. Его называли эхолотом, или эхолотатором (рис. 3.15).

Излучатель посылает узкий импульсный пучок звуковых волн в сторону дна, а специальный микрофон улавливает



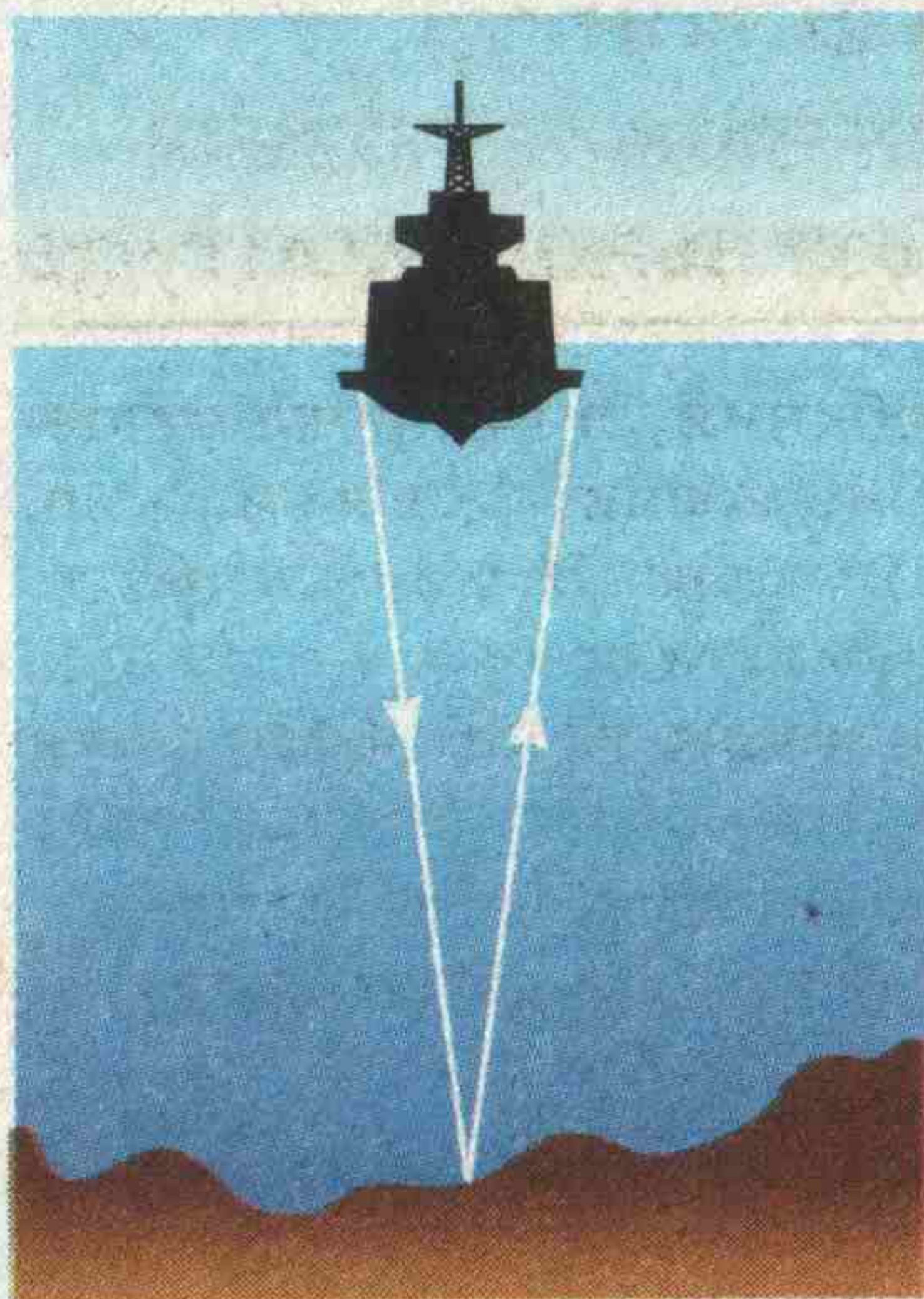


Рис. 3.15. Схема, объясняющая принцип действия эхолота

отраженный сигнал. Измеряя интервал времени между посылкой и приемом сигнала, специальная аппаратура определяет расстояние до дна.

Человек слышит звук только в определенном диапазоне частот. Считается, что человеческое ухо чувствительно к колебаниям частотой от 20 Гц до 20 кГц. Волны с частотой выше 20 кГц называют *ультразвуковыми*, а с частотой меньше 20 Гц – *инфразвуковыми*. Ни одни ни другие звуки человек не слышит. Но свойства этих волн используют в различных приборах и устройствах. Так, ультразвук применяют для стерилизации продуктов питания, очистки поверхности металлов и пластмасс от загрязне-

ний, медицинских инструментов и приборов, не выдерживающих высоких температур. В медицине используют ультразвуковые аппараты для исследований внутренних органов. Последнее время применяется ультразвуковой хирургический инструмент, позволяющий проводить бескровные операции.

Инфразвуки в целом отрицательно действуют на живой организм. Поэтому необходимо устранять их источники или применять профилактические меры безопасности. Так, на производствах, где производственные технологии связаны с применением мощных низкочастотных колебаний, используют различные средства изоляции рабочих от их воздействия. Например, известны случаи, когда установка нового мощного вентилятора не повысила производительности труда рабочих, а наоборот, повысила их утомляемость.

1. Как возникает звуковая волна?
2. Какие вещества имеют хорошую звукопроводимость?
3. Какие колебания слышит человек?
4. Какие волны называют ультразвуковыми и где они применяются?
5. Какие волны называют инфразвуковыми и как они воздействуют на человеческий организм?



## § 48. Колебательный контур. Возникновение электромагнитных колебаний в колебательном контуре

Кроме механических колебаний, в природе существуют электромагнитные колебания. Они возникают в системе, которая называется колебательным контуром. Это электрическая цепь, состоящая из катушки индуктивности и конденсатора, соединенных между собой параллельно (рис. 3.16).

**Колебательный контур – это электрическая цепь, состоящая из параллельно соединенных катушки индуктивности и конденсатора.**



Обычно сопротивление проводников в такой цепи незначительно. Для получения колебаний в колебательном контуре сначала заряжают конденсатор, сообщая ему заряд  $Q_0$ . Тогда в начальный момент времени между обкладками конденсатора возникает электрическое поле. Полная энергия контура в это время равна энергии заряженного конденсатора:

$$W = W_{\text{э}} = \frac{Q_0^2}{2C},$$

где  $Q_0$  – заряд конденсатора;  $C$  – его емкость.

При замыкании ключа конденсатор начинает разряжаться и в контуре возникает возрастающий по значению ток. Вследствие разряда конденсатора энергия электрического поля уменьшается; она превращается в энергию магнитного поля катушки, по которой проходит ток  $I$ :

$$W_{\text{м}} = \frac{LI^2}{2},$$

где  $I$  – сила тока;  $L$  – индуктивность катушки.

В идеальном колебательном контуре полная энергия сохраняется и остается равной энергии электрического поля конденсатора после его зарядки. В любой произвольный момент времени она равна сумме энергий электрического поля конденсатора и магнитного поля катушки:

$$W = \frac{Q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2}.$$

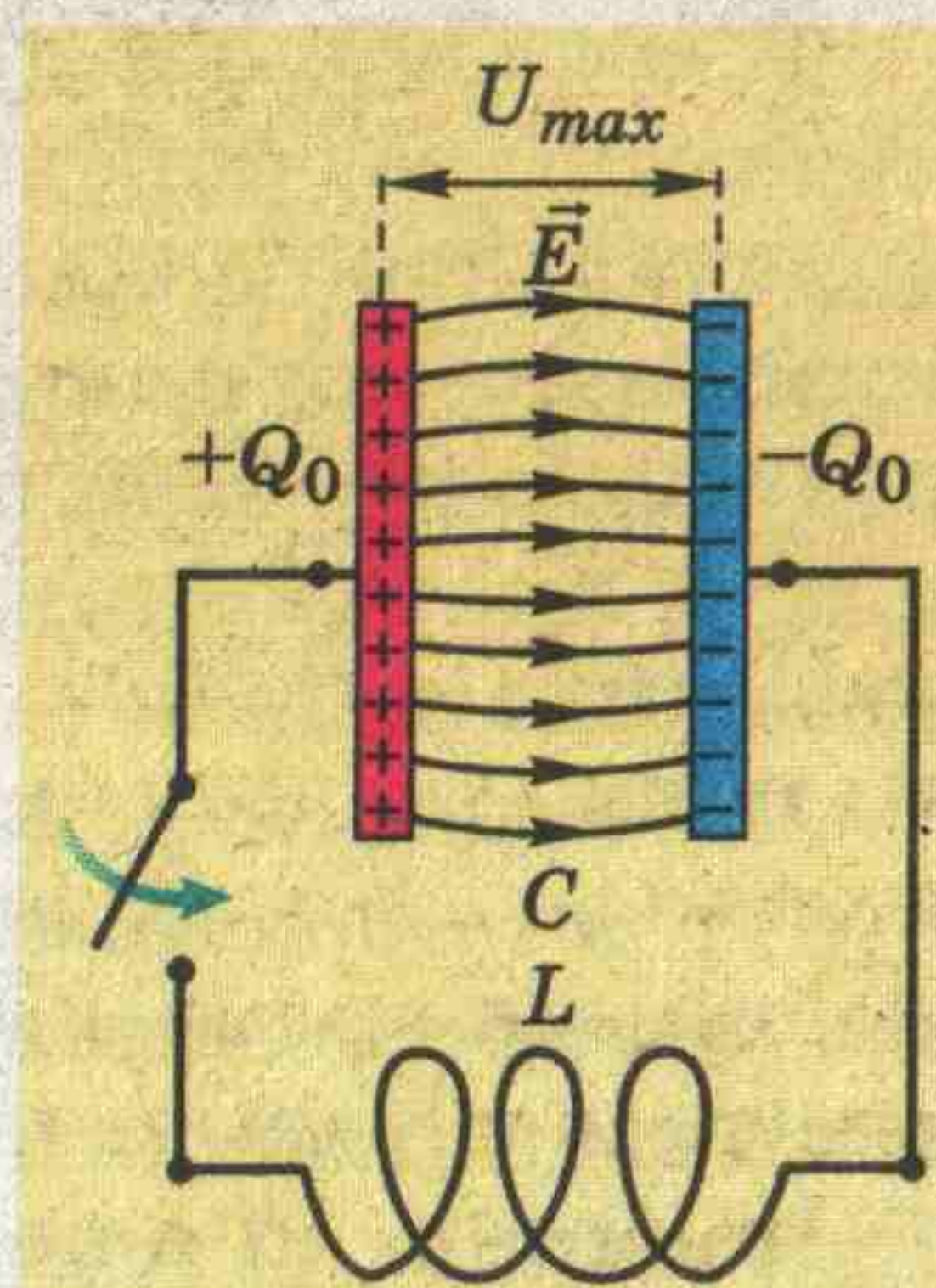


Рис. 3.16. Схема колебательного контура



$$W = \frac{Q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2}$$



В момент времени, когда конденсатор полностью разрядится, энергия электрического поля становится равной нулю, а энергия магнитного поля достигает максимального значения:

$$W = W_{\max} = \frac{LI_{\max}^2}{2}.$$

После этого сила тока в контуре начинает уменьшаться, уменьшается и магнитный поток. По закону электромагнитной индукции, изменению тока противодействует ЭДС самоиндукции, которая возникает при изменении магнитного потока. Поэтому конденсатор начинает перезаряжаться, и между его обкладками снова возникает электрическое поле.

Когда перезарядка прекратится, на обкладках конденсатора будет заряд, равен первоначальному, но с противоположным знаком.

В дальнейшем процесс повторяется, но в обратном направлении. Через определенное время система возвращается в первоначальное положение, и начинается самопроизвольный цикл периодической зарядки и перезарядки конденсатора через катушку. При отсутствии потерь на нагревание проводников и излучение колебания в колебательном контуре будут незатухающими.

В реальных условиях колебания в колебательном контуре будут затухающими. Поэтому их нужно считать свободными. Их период и частота зависят от параметров колебательного контура – емкости конденсатора и индуктивности катушки. Выдающийся английский физик В. Томсон установил, что



Формула Томсона  

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$



Уильям (Кельвин) Томсон (1824–1907) – выдающийся английский физик. Его научные труды касаются многих вопросов физики, математики и техники. Он широко применял термодинамический метод для объяснения физических явлений; продуктивно работал в области изучения электрических и магнитных явлений; известны его работы по теплопроводности.

Если колебательный контур включить в электрическую цепь переменного тока, то в нем возникнут вынужденные колебания, частота которых будет равна частоте переменного тока. Их амплитуда будет зависеть от сопротивления проводников контура и от соотношения между частотой переменного тока и собственной частотой контура. В случае совпадения



этих частот в контуре будут возникать колебания, амплитуда которых резко возрастает. Таким образом, в колебательном контуре будет появляться резонанс. Это явление используют в радиоприемниках, когда с помощью настройки контура на определенную частоту принимают сигналы определенной станции. Изменяя индуктивность катушки или емкость конденсатора, мы изменяем собственную частоту контура. Если собственная частота контура совпадает с частотой определенного сигнала, в контуре, благодаря резонансу, возникает значительный ток, который передается в специальное устройство для дальнейшего усиления и обработки.

1. Как устроен простейший колебательный контур?
2. Какие превращения энергии происходят в колебательном контуре?
3. Какое фазовое соотношение между превращениями электрического и магнитного полей в колебательном контуре?
4. Назовите параметры колебательного контура определяющие его собственную частоту.
5. Когда возникает резонанс в колебательном контуре?
6. С какой целью в колебательном контуре радиоприемника изменяют индуктивность или емкость контура?



149

### Упражнение 23

1. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью 2 пФ и катушки индуктивностью 0,5 мкГн. Найти частоту колебаний в контуре.

2. Конденсатор электроемкостью 1 мкФ, заряженный до напряжения 225 В, присоединили к катушке индуктивностью 10 мГн. Найти максимальную силу тока в цепи.

3\*. Колебательный контур состоит из двух последовательно соединенных конденсаторов и катушки. Период собственных колебаний 50 мкс. Найти период колебаний контура, если конденсаторы соединить параллельно.

4. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью 4 мГн и плоского воздушного конденсатора. Площадь пластин конденсатора равна 10 см<sup>2</sup>, расстояние между пластинами составляет 1 мм. Найти период колебаний контура.

## § 49. Образование электромагнитных волн

Электромагнитные колебания распространяются в пространстве в виде электромагнитных волн. В них проис-



ходят взаимные превращения электрического и магнитного полей, которые вместе образуют электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве.



**Процесс распространения электромагнитных колебаний называется электромагнитной волной.**

Для образования электромагнитных волн, как и волн любой природы, необходимо иметь систему, в которой возникают электромагнитные колебания. Для электромагнитных колебаний такой системой будет колебательный контур, состоящий из конденсатора и катушки индуктивности.

Современные электронные системы позволяют поддерживать в нем незатухающие колебания на протяжении длительного времени, что в свою очередь создает условия для длительного излучения электромагнитных волн. По этому принципу работают вещательные радиостанции, телевидение и другие средства связи.

150

Однако сам по себе колебательный контур не может излучать электромагнитные волны, поскольку электрическое поле сосредоточено между обкладками конденсатора и вне контура не проявляется.

Переменные магнитные поля сосредоточены в основном внутри катушки и не распространяются за пределы контура. Исследования показали, что электромагнитные волны могут излучаться в пространство только открытым колебательным контуром, который в простейшем виде состоит из двух линейных проводников, связанных друг с другом катушкой индуктивности (рис. 3.17).

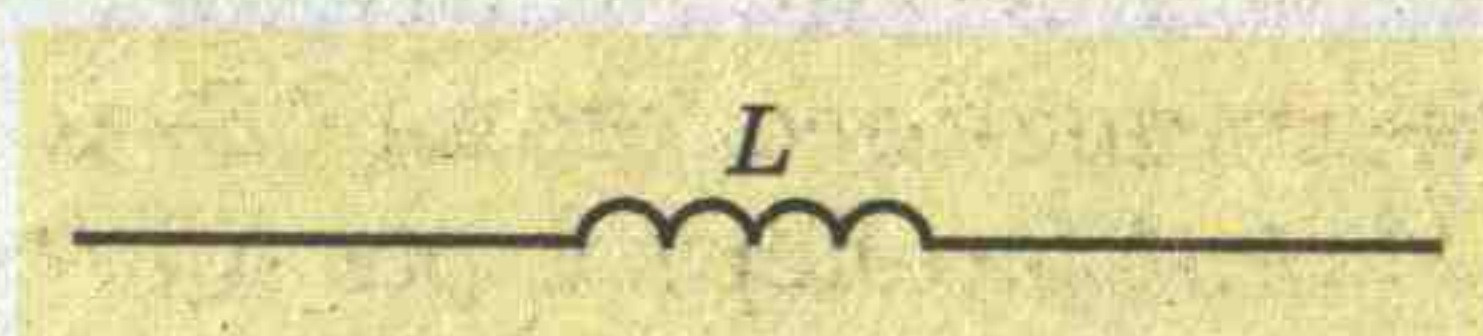


Рис. 3.17. Открытый колебательный контур

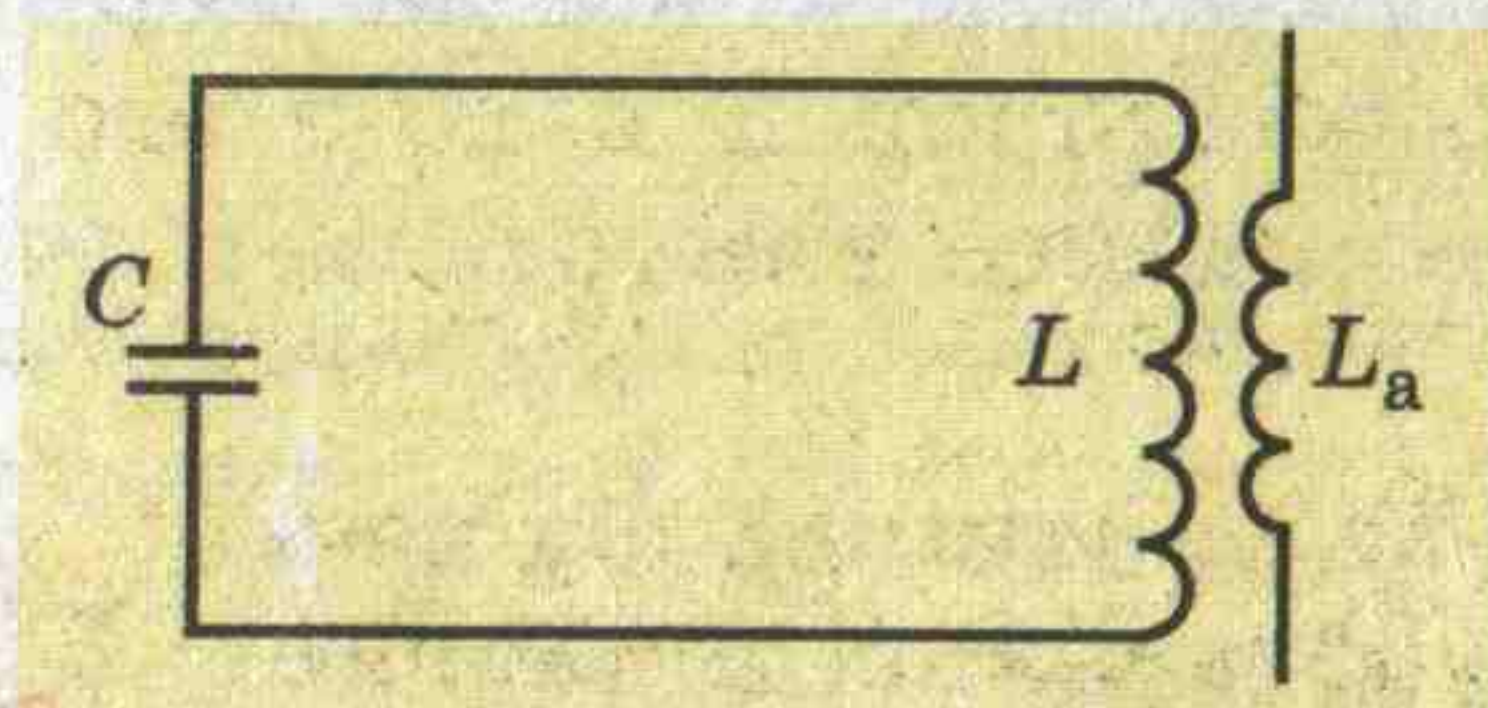


Рис. 3.18. Связь открытого контура с контуром генератора

Для возбуждения электромагнитных колебаний в открытом контуре существуют различные способы. Наиболее распространенный из них способ, когда катушка индуктивности открытого контура образует индуктивную связь с контуром генератора незатухающих колебаний (рис. 3.18).

Благодаря электромагнитной индукции в катушке открытого колебательного контура  $L_a$  появляется переменная ЭДС, возбуждающая в проводниках переменный ток. Поскольку электроны, образующие переменный ток в проводниках,



движутся ускоренно, то проводники открытого колебательно-го контура имеют переменное электромагнитное поле.

Открытый колебательный контур, в котором происходят электромагнитные колебания, имеет переменные магнитное и электрическое поля. Так, переменное электрическое поле открытого колебательного контура индуцирует «собственное» переменное магнитное поле.

Переменное электрическое поле открытого колебательного контура будет индуцировать «собственное» переменное магнитное поле.

Индуцированное переменное магнитное поле, в свою очередь, будет возбуждать индуцированное электрическое поле.

Таким образом, индукционные процессы будут охватывать все новые и новые точки, а образовавшееся электромагнитное поле будет распространяться в пространстве. На расстоянии нескольких длин волны от открытого колебательного контура в пространстве уже будет распространяться единая электромагнитная волна, в которой будут происходить взаимообусловленные одновременные изменения электрического и магнитного полей – составляющих электромагнитного поля.

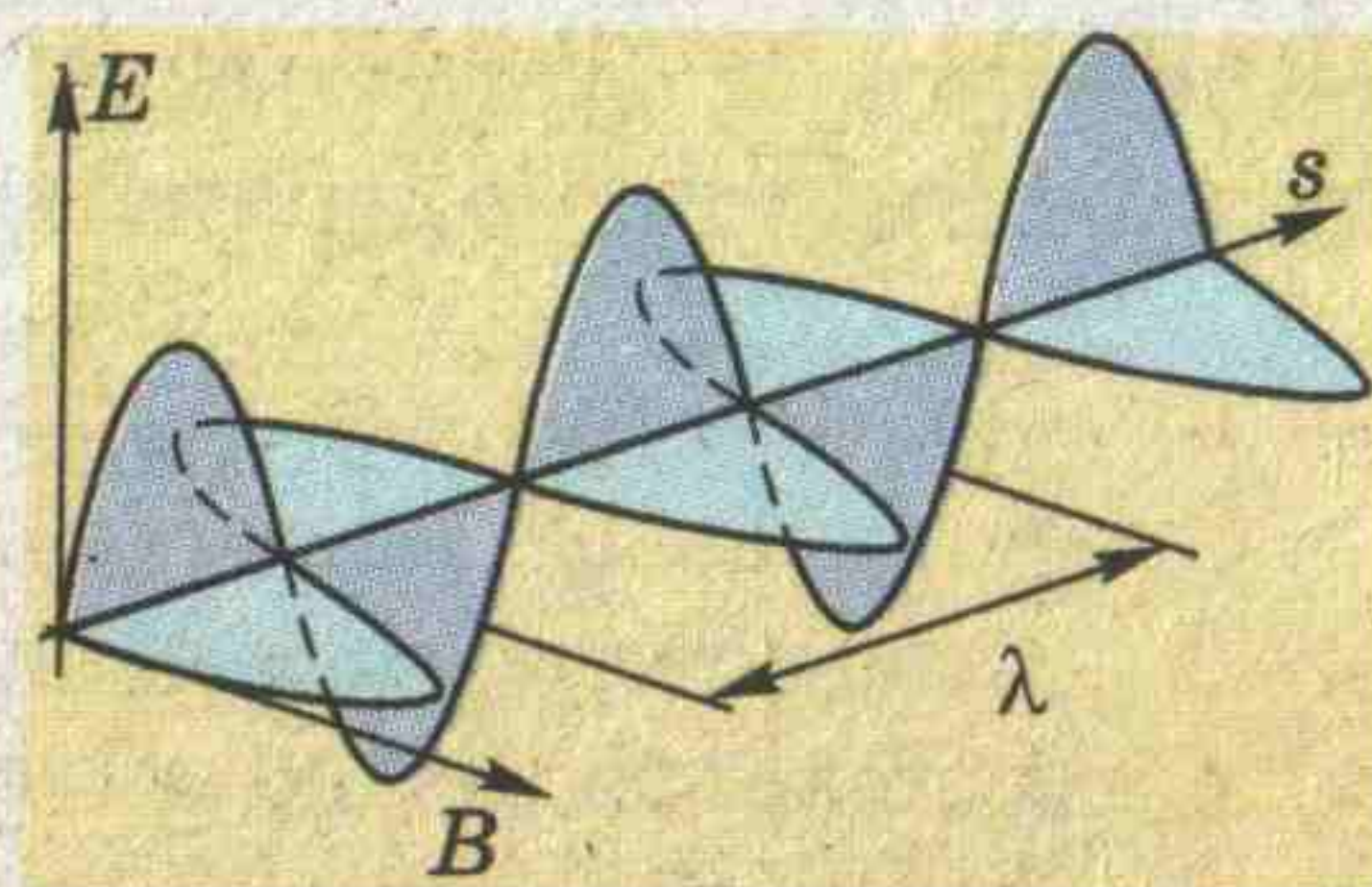


Рис. 3.19. Графическое изображение электромагнитной волны

Графически электромагнитную волну можно изобразить в виде двух синусоид, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 3.19).

Этот рисунок показывает существующую зависимость значений векторов напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и магнитной индукции  $\vec{B}$  от расстояния в направлении распространения волны. По направлению эти векторы органически связаны между собой и с вектором скорости распространения волны  $\vec{v}$ . Их колебания происходят во взаимно перпендикулярных плоскостях, причем вектор скорости  $\vec{v}$  всегда перпендикулярен к плоскости колебаний векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$ , а его направление определяется по правилу правого винта.

Если правый винт вращать в направлении от вектора  $\vec{E}$  к вектору  $\vec{B}$  кратчайшим путем, то его поступательное движение покажет направление вектора скорости  $\vec{v}$ .

Аналитически колебательный процесс, которым является электромагнитная волна, представляется двумя уравнениями



для модулей векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$ :

$$E = E_0 \sin \omega t,$$

$$B = B_0 \sin \omega t,$$

где  $B_0$  и  $E_0$  – амплитуды волны;  $t$  – время наблюдения;  $\omega$  – циклическая частота.

Таким образом, распространение электромагнитных волн происходит как возбуждение связанных между собой электрического и магнитного переменных полей в направлении, определяемом по правилу правого винта.

1. Что называется электромагнитной волной?
2. Почему закрытый колебательный контур не излучает электромагнитных волн?
3. С какой целью используют открытый колебательный контур?
4. Как излучается электромагнитная волна?
5. Как расположен вектор скорости относительно векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$ ?

## Упражнение 24

1. Во сколько раз и как изменится скорость распространения электромагнитной волны в случае перехода из вакуума в некоторую среду, если длина волны уменьшится в 9 раз?

2. Сколько колебаний происходит в электромагнитной волне, которая имеет длину 500 м, за время, которое равно периоду звуковых колебаний с частотой 3000 Гц?

3. Электромагнитные колебания распространяются в однородной среде со скоростью  $2 \cdot 10^8$  м/с. Найдите длину волны в этой среде, если их частота в вакууме 1 МГц.

4. Электромагнитные волны распространяются в среде со скоростью  $2 \cdot 10^8$  м/с. Найти длину волны, если в вакууме она равна 6 м.

5. Телевышка расположена на границе прямой видимости от приемной антенны телевизионного приемника. Найти расстояние между ними, если известно, что высота телевышки 300 м, а высота приемной антенны 10 м.

6. Емкость конденсатора переменной емкости в колебательном контуре радиоприемника может изменяться от 50 пФ до 450 пФ. Индуктивность катушки при этом не изменяется и равна 0,6 мГн. Какие длины волн может принимать этот радиоприемник?

7. На какую длину волны настроен колебательный контур, состоящий из катушки индуктивностью 1,6 мГн и конденсатора емкостью 400 пФ?

8. Какую индуктивность должна иметь катушка колебательного контура, чтобы вместе с конденсатором емкостью 0,005 мкФ



составить контур, резонирующий на электромагнитную волну длиной 500 м?

9. Радиостанция работает на длине волны 150 м. Какую емкость должен иметь конденсатор в контуре радиопередатчика, если индуктивность катушки в нем 0,2 мГн?

10. Волну какой длины будет принимать радиоприемник, колебательный контур которого состоит из конденсатора емкостью 75 пФ и катушки индуктивностью 1,34 мГн? Найти собственную частоту колебательного контура.

11\*. При изменении силы тока в катушке на 1 А за 0,6 с в ней индуцируется ЭДС 0,23 мВ. Какой длины волну будет излучать передатчик, если в его колебательный контур будет входить эта катушка и конденсатор емкостью 14,1 пФ?

12\*. Основная частота сигналов телепередатчика 50 МГц. На протяжении 0,04 с передается 500 000 элементов изображения. Определить количество длин волн, приходящихся на один элемент изображения.

13\*. На какую длину волны настроен колебательный контур, состоящий из катушки индуктивностью 2 мГн и плоского конденсатора? Пространство между пластинами конденсатора заполнено веществом с диэлектрической проницаемостью 11. Площадь пластин конденсатора 800 см<sup>2</sup>, а расстояние между ними 1 см.

## § 50. Шкала электромагнитных излучений

Во время исследований, длительное время проводившихся учеными, не обнаружили каких-либо ограничений относительно частоты или длины электромагнитного излучения. Т. е. нет смысла вести речь о самой короткой или самой длинной волне, ограничивая диапазон электромагнитных волн. Речь может быть лишь об определенном диапазоне волн, открытых и исследованных современной наукой.

Для наглядного представления о разнообразии электромагнитных излучений и зависимости их свойств от длины волны составлена шкала, один из вариантов которой представлен на форзаце. Они расположены по определенным условным диапазонам, не имеющим четких границ: низкочастотные волны, радиоволны, инфракрасное излучение, видимый свет, ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение. Такое деление произведено с учетом природы их возникновения и особенностей взаимодействия с веществом. Например, если радиоволны образуются электромагнитными колебаниями, возбуждаемыми в колебательном контуре определенной емкости и индуктив-



ности, чем и определяется длина волны, то гамма-излучение возникает как следствие ядерных процессов, связанных с радиоактивным распадом.

Существуют также отличия и во взаимодействии электромагнитных волн с веществом и в особенностях распространения в пространстве. Если видимый свет полностью поглощается тонким слоем бумаги, то рентгеновское и гамма-излучения могут проникать не только через человеческое тело, но и через металлы.

Рассмотрим шкалу электромагнитного излучения подробнее.

**Низкочастотное излучение** возникает в результате работы различных электротехнических устройств и приборов, в которых используется переменный ток низкой частоты. Оно имеет низкую энергию и до сих пор не нашло практического применения ни в информационных, ни в энергетических технологиях.

**Радиоволны** разделены на диапазоны длинных, средних, коротких и ультракоротких волн. Поводом для такого деления послужили особенности их распространения.

154

В широком диапазоне радиоволны делятся на длинные, средние, короткие и ультракороткие.

Инфракрасное излучение называют также тепловым, так как оно наблюдается у всех нагретых тел.

В широком понимании оптический диапазон охватывает инфракрасное излучение, видимый свет и ультрафиолетовое излучение. Инфракрасное излучение лежит за пределами восприятия глазом волн, длина которых больше 760 нм и простирается к 0,1 мм. Их излучают все нагретые тела, благодаря чему мы ощущаем теплоту. При повышении температуры длина волны, на которую приходится максимум излучения, смещается в область более коротких волн. Инфракрасное излучение слабо поглощается воздухом и хорошо отражается от поверхности твердых тел. Это их свойство применяют в приборах «ночного видения».

**Видимый свет** – это тот диапазон волн, который воспринимается человеческим глазом. Установлено, что он довольно узкий, от 380 нм до 760 нм. Волны различной длины этого диапазона воспринимаются как свет различных цветов. Свойства света очень разнообразны, многие из них станут вам понятны только после изучения последующих параграфов.

Со стороны коротковолновой части диапазона видимых волн находится диапазон ультрафиолетового излучения, кото-



рое не воспринимается человеческим глазом. Вместе с тем, взаимодействуя с веществом, это излучение может вызывать излучение видимого света. На этом основан метод неразрушающего анализа вещества, когда по цвету излучения определяют наличие тех или иных веществ в смеси. Широко известен способ применения ультрафиолетового излучения для выявления фальшивых денежных купюр.

**Ультрафиолетовое излучение практически полностью поглощается обычным оконным стеклом.**



Ультрафиолетовое излучение имеет сильное бактерицидное действие, его широко применяют для стерилизации медицинских инструментов, различных медицинских материалов. Невозможно представить больничную палату без ламп, излучающих ультрафиолетовый свет.

Вместе с тем ультрафиолетовое излучение может отрицательно воздействовать на человеческий организм, попадая на кожу или слизистую оболочку. Оно вызывает ожоги, которые плохо поддаются лечению.

**Рентгеновское излучение** известно многим из нас как средство медицинского исследования организма. Впервые его получил и исследовал известный физик, украинец по происхождению И. Пулюй (1845–1918). Но случилось так, что первым сообщил об открытии немецкий физик В. Рентген (1845–1923). За это открытие ему позднее была присуждена Нобелевская премия в области физики.

Рентгеновское излучение имеет высокую проникающую способность, оно может проникать сквозь толстые слои вещества и даже металлов. Его используют в промышленности для выявления внутренних дефектов металлических изделий, в медицине для исследования внутренних органов человека, в научных исследованиях строения вещества.

Следующий диапазон — гамма-излучение — относится к ядерным процессам и связан с процессами, происходящими в атомных ядрах.

1. Какова структура шкалы электромагнитных волн? Существует ли верхний или нижний предел частот электромагнитного излучения?
2. На какие диапазоны разделяют шкалу электромагнитных излучений?
3. Каковы особенности излучения в каждом диапазоне?
4. В чем состоит драматизм истории открытия рентгеновских лучей?





## § 51. Радиоволны

Радиоволны принадлежат к диапазону электромагнитных волн длиной от нескольких километров до нескольких десятков километров. В высокочастотной области диапазона радиоволны плавно переходят в инфракрасное излучение, хотя четкая граница не установлена. В своей низкочастотной части диапазона радиоволны граничат с низкочастотным излучением, которое образуется при работе электротехнических устройств, использующих переменный ток низкой частоты.

Радиоволны имеют четыре диапазона: длинные ( $\lambda = 10^4 \dots 10^3$  м), средние ( $\lambda = 10^3 \dots 10^2$  м), короткие ( $\lambda = 10^2 \dots 10$  м) и ультракороткие ( $\lambda < 10$  м).



**В науке и радиотехнике радиоволны делятся на четыре диапазона: длинные ( $10^4 \dots 10^3$  м), средние ( $10^3 \dots 10^2$  м), короткие ( $10^2 \dots 10$  м) и ультракороткие ( $< 10$  м).**

156

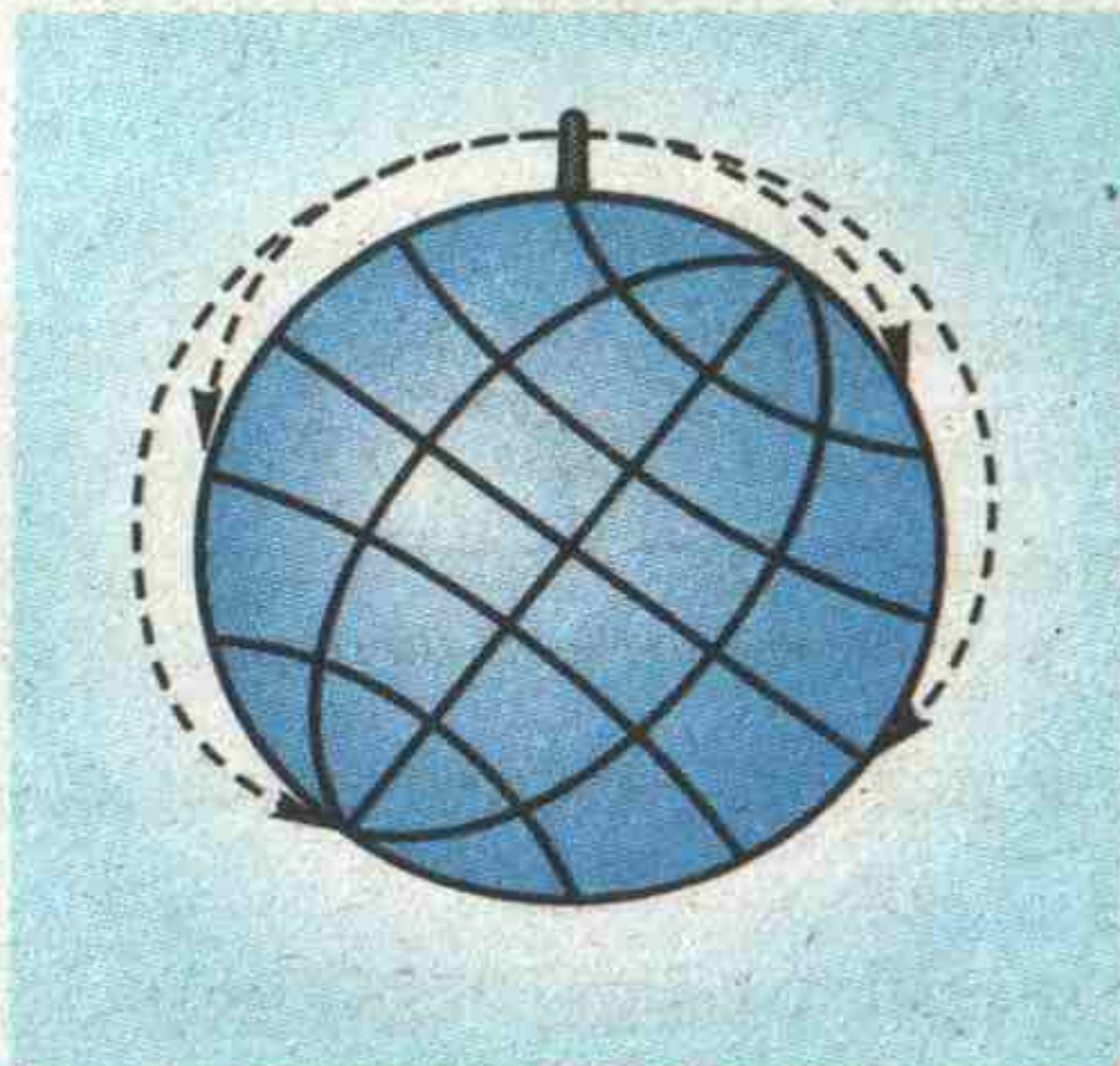


Рис. 3.20. Длинные и средние волны огибают земную поверхность

Волны каждой части диапазона имеют свои особенности. Так, длинные и средние волны преломляются и дифрагируют в атмосфере, вследствие чего они огибают поверхность земного шара (рис. 3.20). Но для этого радиопередатчики должны иметь очень большую мощность, а передающие антенны — большие размеры. Да и количество станций, работающих в этом диапазоне без взаимных помех, не может быть очень большим. Поэтому для дальней связи длинные волны практически не применяются.

Для дальней связи чаще всего применяются короткие волны, они хотя и не огибают земной шар, но отражаются от ионизированного слоя атмосферы (ионосферы), как от зеркала. После многократного отражения от этого слоя и от поверхности Земли короткие волны могут распространяться по всему земному шару (рис. 3.21). Но высота и плотность ионизированного слоя на протяжении года ощутимо изменяются, поэтому связь на коротких волнах неустойчива и в последнее время применяется редко.

Ультракороткие волны в земных условиях распространяются в пределах «прямой видимости», практически не преломляясь. Высокая частота этих радиоволн позволяет применять частотную модуляцию, которая обеспечивает высокое



качество связи. Кроме того, в этом диапазоне можно использовать много радиопередатчиков, поскольку их частотный диапазон довольно плотный.

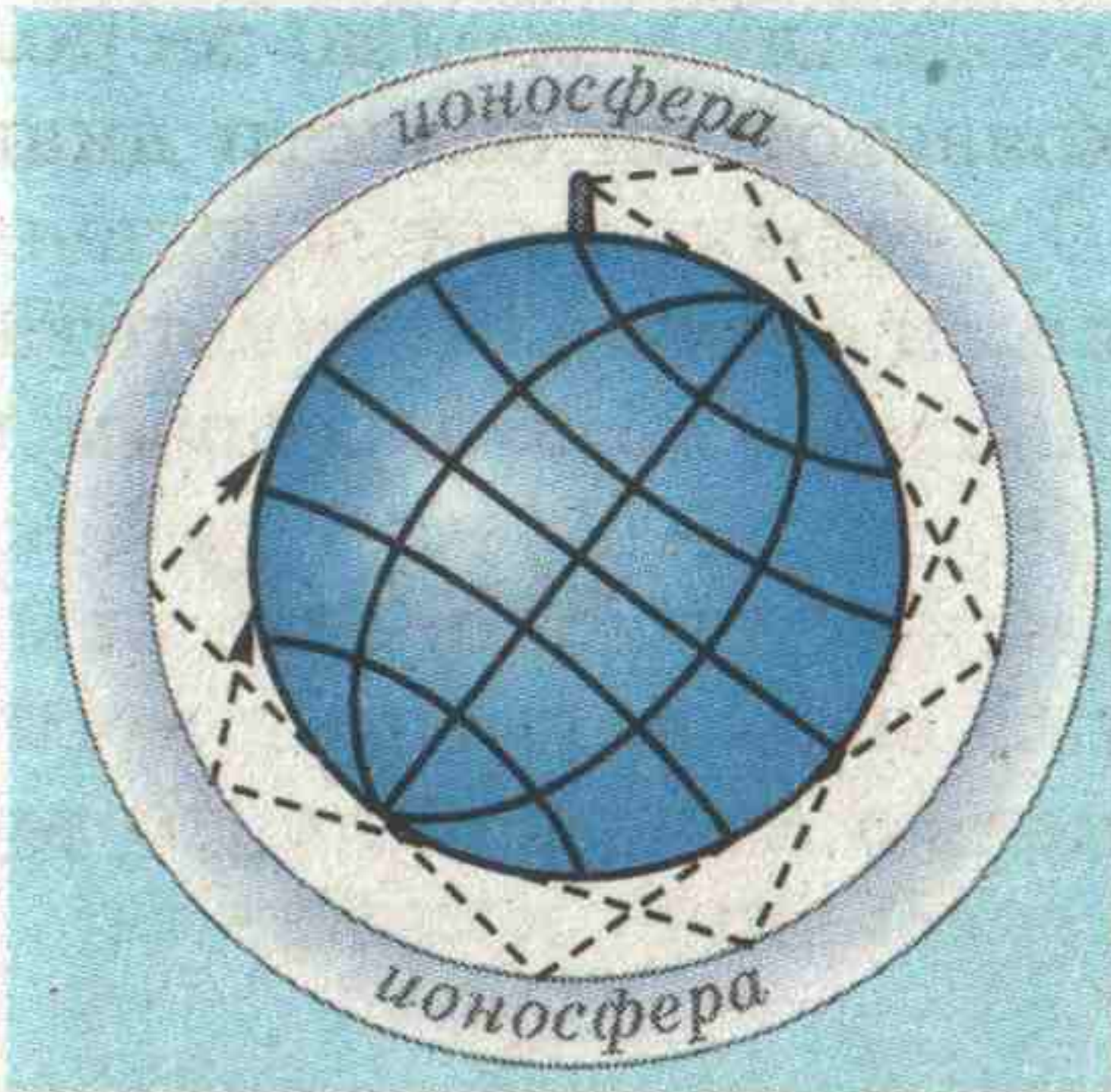


Рис. 3.21. Короткие радиоволны отражаются от ионизированного слоя воздуха

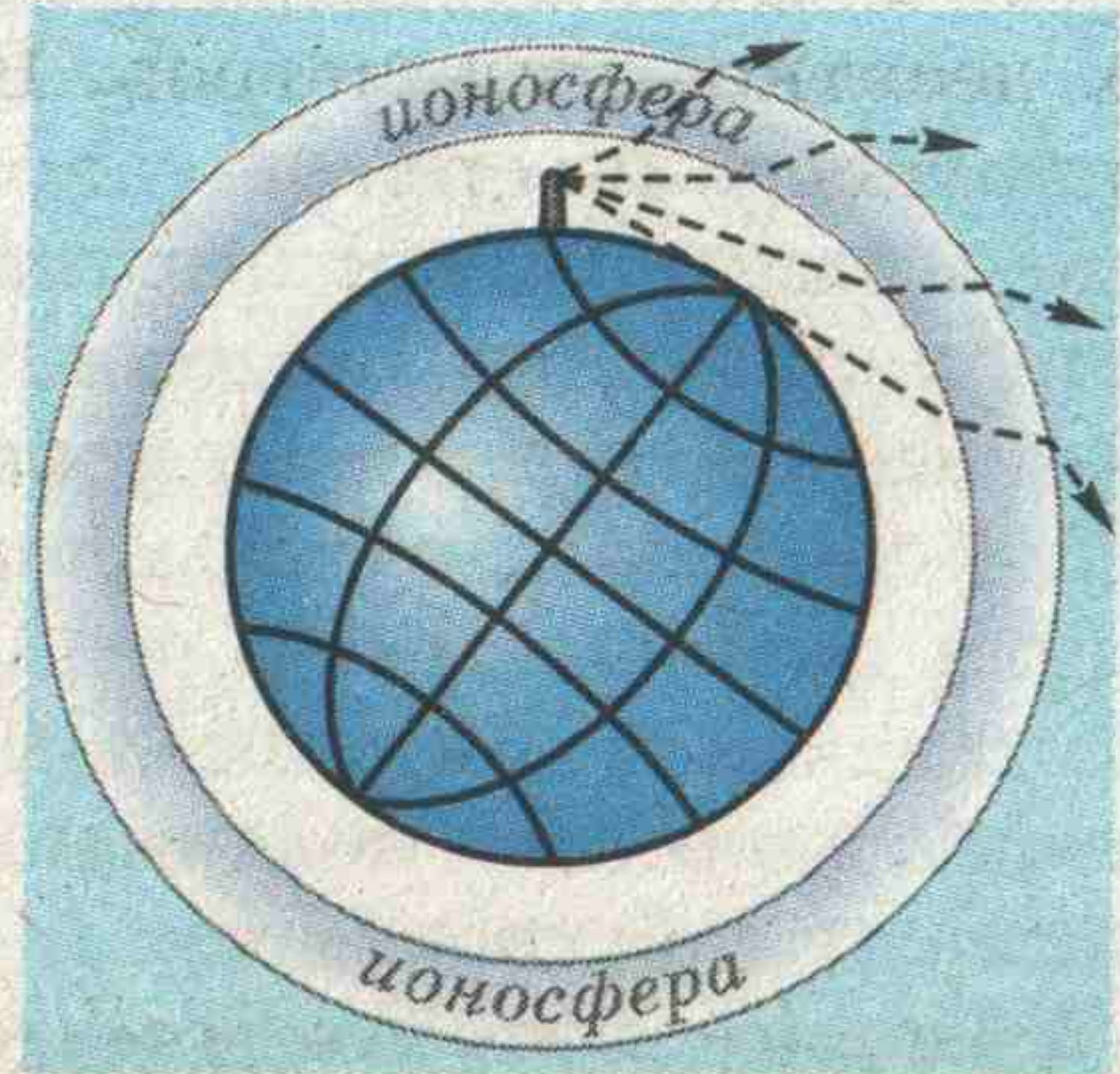


Рис. 3.22. Ультракороткие волны выходят за пределы атмосферы

Ультракороткие волны оказались весьма удобными для связи с космическими аппаратами (рис. 3.22), поскольку они свободно проходят сквозь ионосферу.

В земных условиях для обеспечения дальней связи с использованием ультракоротких волн применяют специальные ретрансляционные станции (рис. 3.23). Находясь на расстоянии прямой видимости, они принимают сигналы от одной станции и передают их другой. По этому принципу работает, в частности, система мобильной связи.



Рис. 3.23. В системах радиосвязи на ультракоротких волнах применяют линии с ретрансляторами

Ультракороткие волны используются и в системах космической связи, работающей с использованием ретрансляторов на специальных космических аппаратах.

1. Из каких частей состоит диапазон радиоволн?
2. Почему возможна дальняя связь на коротких волнах?
3. Почему в различное время года и суток распространение коротких радиоволн изменяется?
4. Каковы свойства ультракоротких радиоволн?
5. Почему ультракороткие волны широко применяются в последнее время?





## Главное в разделе 3

1. Колебания – это наиболее распространенная форма движения в природе. Главным условием их возникновения является возникновение внешнего фактора, благодаря которому движение повторяется.

Колебания бывают периодическими и непериодическими. В периодических колебаниях движение повторяется через одинаковые интервалы времени.

2. Колебания, возникающие в замкнутых системах, называются свободными. В реальных условиях свободные колебания затухают. В идеальных системах, в которых отсутствуют потери энергии, возникают незатухающие колебания. Их называют **собственными**.

3. Период колебаний математического маятника зависит от его длины и ускорения свободного падения:

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

158

Период колебаний пружинного маятника зависит от массы груза и жесткости пружины:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Период колебаний математического маятника не зависит от массы и амплитуды.

4. Свободные колебания происходят по закону синуса или косинуса. Такие колебания называются гармоническими. Например:  $x = A \sin(\omega t + \alpha)$ , где  $A$  – амплитуда колебаний,  $\omega$  – циклическая частота,  $\alpha$  – начальная фаза,  $t$  – время.

5. Если на колебательную систему действует периодическая вынуждающая сила, то в системе возникают **вынужденные колебания**. Частота вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы. Если частота вынуждающей силы равна собственной частоте колебательной системы, то возникает **резонанс** – резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний. Примером вынужденных колебаний является раскачивание качелей.

6. Распространение колебаний в упругой среде называют **волновым процессом**, или механической волной. Волна переносит энергию. Волны бывают **продольными** и **поперечными**.

Универсальной характеристикой волнового процесса любой природы является длина волны. Это расстояние между двумя соседними точками волны, которые колеблются в одной фазе.

За один период волна распространяется на расстояние, равное длине волны.



Скорость распространения волны равна:

$$v = \frac{\lambda}{T}.$$

7. Свободные электромагнитные колебания возникают в колебательном контуре, состоящем из катушки индуктивности и конденсатора. Они затухают вследствие потерь энергии на нагревание проводников и излучение электромагнитных волн. При отсутствии этих потерь колебания в колебательном контуре будут происходить бесконечно долго. Эти колебания будут собственными колебаниями. Период собственных колебаний в колебательном контуре определяется по формуле Томсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

8. В электрической цепи может возникать переменный ток как вынужденные колебания. Простейшим способом получения переменного тока является вращение рамки в магнитном поле или изменение магнитной индукции (вращение электромагнита) возле определенным способом расположенных катушек.

9. Электромагнитная волна – это переменное электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве со скоростью света. Электромагнитная волна имеет энергию. Во всех процессах, которые происходят в электромагнитной волне, выполняется закон сохранения энергии.

10. Все известные электромагнитные волны по длине волны или по частоте условно распределены по отдельным диапазонам: низкочастотное излучение (длина волны свыше 10<sup>3</sup> м), радиоволны, которые также разделяются на поддиапазоны, с длиной волны от нескольких сантиметров (ультракороткие волны) до 10<sup>4</sup> м (длинные волны); инфракрасное излучение, длина волны которого лежит в пределах от 0,1 мм до 760 нм; видимый свет с длиной волны от 380 до 760 нм; ультрафиолетовое излучение, длина волны которого лежит в пределах от фиолетовой части видимого света до нескольких нанометров; рентгеновское излучение в диапазоне длин волн от 10<sup>-8</sup> до 10<sup>-11</sup> м; гамма-излучение, имеющее длину волны меньше 10<sup>-11</sup> м.



# Раздел 4

Усвоив материал данного раздела, ты будешь **знать**:

- ♦ основные этапы развития представлений о природе света, имена ученых, внесших значительный вклад в становление и развитие оптики как теории света;
- ♦ значение скорости распространения света в вакууме и других оптических средах, размер постоянной Планка как фундаментальной константы;
- ♦ законы отражения и преломления света, уравнение А. Эйнштейна для фотоэффекта;
- ♦ физические величины, характеризующие основные световые явления (показатель преломления, энергия и импульс фотона, длина волны света и др.);
- ♦ сущность корпускулярно-волнового дуализма;
- ♦ примеры проявления оптических явлений в природе и их применение в науке и технике, на производстве.

Ты сможешь **объяснить**:

- ♦ квантовые и волновые свойства света, его корпускулярно-волновую природу;
- ♦ сущность интерференции и дифракции световых волн, поляризации и дисперсии света, фотоэффекта, люминесценции;
- ♦ природу непрерывного спектра света.

Ты будешь **уметь**:

- ♦ решать задачи, применяя законы отражения и преломления света, формулу Планка и уравнение А. Эйнштейна для фотоэффекта;
- ♦ различать волновые и квантовые свойства света;
- ♦ исследовать световые явления, пользуясь простейшими оптическими приборами;
- ♦ обосновывать роль современных представлений о природе света в интерпретации физической картины мира.



# ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА

161

## § 52. Свет как электромагнитная волна. Развитие представлений о природе света

Представления о природе света как одного из основных источников восприятия человеком окружающего мира развивались на протяжении многих веков. В древнейшие времена они были наивными, вроде того, что наши глаза обладают невидимыми «щупальцами», благодаря которым возникают зрительные образы наблюдаемых предметов. Понятно, что такой примитивный взгляд был не в состоянии объяснить истинную природу света. Значительно позже она была раскрыта как с точки зрения волновой теории света, так и на основе квантовой физики.

В классической физике существовало два взгляда на природу света – волновая и корпускулярная теории света.



Между этими двумя теориями происходила длительная дискуссия, у истоков которой стояли известные ученые: И. Ньютон (1643–1727), который считал свет потоком частиц, названных им корпускулами, и Х. Гюйгенс (1629–1695), по убеждению которого свет – это волны, заполняющие собой окружающее пространство и проникающие внутрь тел. Обе



теории благодаря авторитету этих ученых и способности объяснить простейшие световые явления длительное время существовали параллельно. Например, И. Ньютон, опираясь на закон инерции, сумел на основании корпускулярных представлений объяснить прямолинейное распространение света и дисперсию. Х. Гюйгенс, исходя из волновых представлений, обосновал законы отражения и преломления света.

Однако со временем преимущество стали отдавать волновой теории света, поскольку были открыты световые явления, которые можно было объяснить лишь с позиций распространения света как волнового движения. В частности, в начале XIX в. английский физик Т. Юнг (1773–1829) наблюдал так называемую интерференцию света (усиление и ослабление световых пучков, исходящих от одного источника света, при их наложении) и дифракцию (огибание световым лучом преград), которые нельзя было объяснить с позиций корпускулярной гипотезы света И. Ньютона. Позже О.Ж. Френель (1788–1827), повторяя опыты Т. Юнга, убедился, что в данном случае проявляется волновая природа света. В этой связи он сформулировал принцип распространения света как волны (принцип Гюйгенса–Френеля), благодаря которому стало возможным объяснение всех известных в то время световых явлений. Таким образом, волновая теория стала доминирующей в толковании природы света. Триумф волновой теории света подтвердил Дж. Максвелл (1831–1879), теоретически доказав, что свет – это распространение в пространстве электромагнитных волн определенной частоты (длины волны).

Учитывая, что основными характеристиками электромагнитного излучения являются частота  $\nu$  и длина волны  $\lambda$ , установлено, что они находятся в обратно пропорциональной зависимости между собой и связаны со скоростью света соотношением:  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ .

В первой половине XX в., когда начала стремительно развиваться квантовая теория, представления о природе света также претерпели изменения. Когда А. Эйнштейн (1879–1955) высказал предположение о квантовых свойствах света, это было воспринято неоднозначно. Он утверждал, что свет является потоком микрочастиц, названных им фотонами, которые несут наименьшую порцию световой энергии. Со временем выяснилось, что корпускулярная теория света, в равной степени как и волновая, также имеет право на существование, особенно при толковании явлений излучения и поглощения света.

**Фотон – это корпускула света, которая обладает минимальной порцией световой энергии, названной квантом света.**



Ограниченный характер волновой теории подтвердили опыты по фотоэффекту, проведенные А.Г. Столетовым (1839–1896). Их результаты указывали на то, что свет проявляет себя подобно потоку частиц, которые обладают определенной энергией и импульсом и подчиняются законам квантовой физики.

Таким образом, многочисленные исследования световых явлений продемонстрировали неоднозначность проявления свойств света: в одних случаях (интерференция, дифракция) они подтверждают волновую природу света, в иных (излучение и поглощение) – отчетливее проявляется его корпускулярная природа. Поэтому можно утверждать, что свету присущ корпускулярно-волновой дуализм – он обладает как непрерывными, волновыми свойствами, так и дискретными, корпускулярными.

**Гипотезу о двойственной природе света – так называемом корпускулярно-волновом дуализме – впервые высказал А. Эйнштейн.**



Как известно, свет излучают различные тела – Солнце, звезды, свеча, вольфрамовая спираль электрической лампочки, молния, раскаленные предметы и т. д. Все они являются источниками видимого света, потому что излучают электромагнитные волны, воспринимаемые глазом. Человеческий глаз является самым совершенным приемником электромагнитного излучения оптического диапазона. Видимый свет, который он в состоянии воспринимать, имеет длину волны от 380 нм (фиолетовый цвет) до 760 нм (красный цвет). Наибольшую чувствительность глаз имеет в диапазоне зеленого света (около 550 нм), на который приходится максимум спектра солнечного излучения. Кроме того, приемниками светового излучения могут быть фотометры, фотоэлементы и другие приборы, способные фиксировать энергию светового потока. Кроме видимого света к оптическому диапазону относятся инфракрасное и ультрафиолетовое излучения (см. форзац).

Для того чтобы тело стало источником света, ему необходимо сообщить определенную энергию, благодаря которой атомы начнут излучать свет. Самым простым и распространенным способом является нагревание тел. Например, солнечный свет – это излучение, возникшее вследствие разогрева поверхности Солнца (так называемой фотосферы) до температуры выше 6000 К в результате термоядерных реакций, происходящих внутри Солнца. Свет от электрической лампы накаливания образуется в результате нагревания вольфрамовой нити до высокой температуры (около 3000 К). Чем сильнее нагрето тело, тем



больше частота излучения, на которую приходится максимум. При определенной температуре тепловое излучение становится видимым сначала в красном диапазоне волн, а с повышением температуры начинает смещаться к желтому и далее.



**Источники света делят на естественные и искусственные, т. е. те, которые создает человек для своих жизненных потребностей.**

Свет могут излучать газы при электрическом разряде. Примером такого источника света является молния. В результате некоторых химических реакций, которые проходят с выделением энергии, часть ее может идти на излучение света. Это так называемое холодное свечение. Его можно наблюдать у некоторых живых организмов (светлячков, бактерий). Существуют и другие способы возбуждения атомов, которые излучают свет, избавляясь таким образом от излишней энергии.

164

В зависимости от характера распространения световых лучей различают точечные источники света и источники направленного излучения. Точечными называют такие источники света, размерами которых можно пренебречь по сравнению с расстояниями, проходимыми светом. От них свет равномерно распространяется во всех направлениях, однако в расчетах освещенности поверхности следует учитывать направление падающего луча. У источников направленного излучения световые лучи считаются параллельными, поэтому освещенность поверхности от такого источника света будет одинаковой на всей площади, куда падает свет. Данное условие выполнимо, если точечный источник света бесконечно удален от освещаемой поверхности. Классическим примером такого источника является Солнце.



**Естественный солнечный свет неполяризован. Однако отраженные световые лучи всегда частично или полностью поляризованы.**

Свету как электромагнитному излучению в определенных условиях свойственна поляризация, т. е. ориентация колебаний векторов напряженности электрического поля  $\vec{E}$  или индукции магнитного поля  $\vec{B}$  в определенном направлении. Впервые это явление наблюдал в 1669 г. датский ученый Э. Бартолин во время двойного преломления луча света в кристалле исландского шпата. При прохождении света сквозь кристалл образуется два луча, один из которых имеет особые свойства.



Человеческий глаз не отличает поляризованный свет от обычного. Однако некоторые насекомые, например пчелы, обладают такой способностью.



Выяснилось, что существуют кристаллические вещества, имеющие *оптическую анизотропию* – неоднородность оптических свойств в зависимости от направления распространения света. Когда свет проходит сквозь такие кристаллы, он поляризуется, т. е. векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  электромагнитного поля длительное время остаются в одной плоскости. Например, кристалл турмалина имеет разные значения показателя преломления в зависимости от направления ориентации граней кристаллической решетки. Поэтому он является естественным поляризатором света.

Для того чтобы определить, поляризован ли свет, применяют устройства, называемые анализаторами. Это те же поляризаторы, которые имеют иную плоскость поляризации и поэтому влияют на интенсивность проходящего сквозь них света; существенное ее уменьшение указывает на наличие поляризации света. На данном принципе, в частности, основывается действие сахарометров – приборов, с помощью которых определяют концентрацию сахара в сахарном растворе, например в патоке.

165

1. Какие подходы к объяснению природы света исторически сложились в физике?
2. Каковы современные взгляды на природу света?
3. Благодаря каким физическим процессам тела могут стать источниками света?
4. Какие виды излучения принадлежат оптическому диапазону?
5. В чем состоит сущность поляризации света? Где используют данное явление в практических целях?



## § 53. Поглощение и рассеивание света. Отражение света

Распространение светового излучения в оптической среде, как правило, сопровождается поглощением, рассеиванием или отражением света. Все эти процессы происходят вследствие взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, в результате которого часть световой энергии преобразуется в другие виды энергии. Например, нам известно, что благодаря солнечному излучению, которое поглощается земной поверхностью, Земля нагревается, т. е. световая энергия преобразуется в тепловую.



С точки зрения квантовых представлений поглощение света – это процесс захвата фотонов атомами вещества, в котором распространяется свет, вследствие чего они отдают им свою энергию.



**Поглощательную способность оптической среды характеризует коэффициент поглощения, который определяет, как изменяется интенсивность излучения с глубиной проникновения света в вещество.**

Прохождение света сквозь среду сопровождается также рассеиванием светового потока на частичках вещества или иных микрообъектах, размеры которых меньше длины волны света. Оно может происходить без изменения частоты излучения (так называемое релеевское рассеивание) либо комбинационным способом, когда в спектре света при прохождении сквозь среду возникают спектральные линии, частота которых отличается от первоначального (возбуждающего) света. Частота и положение дополнительных спектральных линий зависят от молекулярного строения вещества. Поэтому комбинационное рассеивание широко используется в спектральном анализе для исследования особенностей молекулярной структуры вещества.

На границе двух сред может происходить также отражение светового излучения, т. е. достигая границы раздела, оно может изменить направление и вернуться в среду, откуда вышло. Отражение бывает зеркальным, для которого справедлив закон отражения света, и рассеивающим (диффузным), когда световые лучи, отражаясь от неровностей поверхности, на которую они падают, расходятся в разные стороны. Это происходит при условии, когда размер таких неровностей соизмерен с длиной волны света. Поэтому поверхность, которая является зеркальной для ультрафиолетового излучения, может не быть таковой для инфракрасного излучения, поскольку длина его волны больше и может быть близкой по размерам к неровностям отражающей поверхности.



**Рассеивающее (диффузное) отражение света происходит при падении света на шероховатые матовые поверхности.**

При зеркальном отражении света выполняется закон, известный нам из курса физики 7-го класса: *падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с перпендикуляром к отражающей поверхности в точке падения светового луча; перпендикуляр делит угол между падающим и отраженным лучами на две равные части.*



Данный закон получил обоснование как с точки зрения корпускулярной, так и со стороны волновой теории света. Первая в своем толковании опиралась на законы механики при упругом соударении корпускул света (фотонов) с отражающей поверхностью. В основу объяснения закона отражения света волновой теорией положены принципы Ферма и Гюйгенса–Френеля.

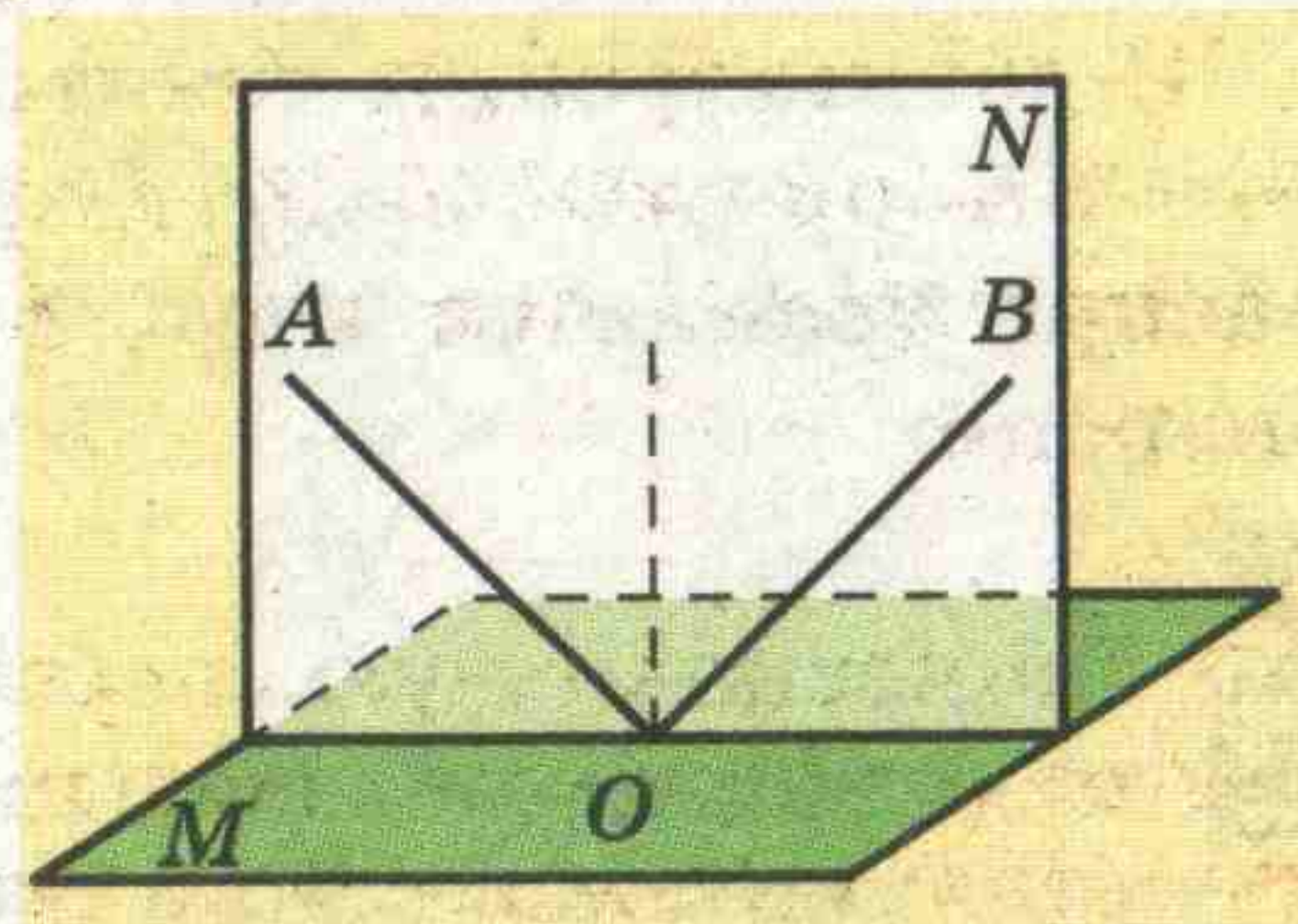


Рис. 4.1. Закон отражения света

Согласно **принципу Ферма** свет распространяется из начальной в конечную точку таким образом, чтобы время прохождения световой волны было минимальным. **Принцип Гюйгенса–Френеля** определяет, что каждая точка пространства, в которую приходит фронт световой волны, становится источником вторичных световых волн.

Объясним теперь закон отражения света на основе представлений о волновой природе света. Первая часть закона указывает на то, что направление отраженного светового луча не может быть произвольным. Как известно, через две прямые, отрезками которых являются падающий  $AO$  и отраженный  $OB$  лучи (рис. 4.1), можно провести только одну плоскость  $N$ , перпендикулярную к плоскости отражающей поверхности  $M$ .

Пусть на поверхность  $MN$  падает световая волна, фронт которой распространяется вдоль прямой  $AB$  (рис. 4.2). Когда световой луч достигает точки  $A$ , то согласно принципу Гюйгенса–Френеля данная точка становится источником новой сферической волны. За время, пока фронт падающей волны достигнет точки  $C$ , фронт отраженной в точке  $A$  волны образует полусферу радиуса  $r$ , где  $r = AD$ . За это время такие же волны будут распространяться и от других точек поверхности  $MN$ , образуя новый фронт волны  $CD$  отраженного света. Чтобы определить направление, в котором он будет перемещаться, рассмотрим треугольники  $ACD$  и  $ABC$ . Поскольку их стороны  $AD = BC$  и  $AB = CD$ , а  $AC$  – общая, то данные треугольники равны.

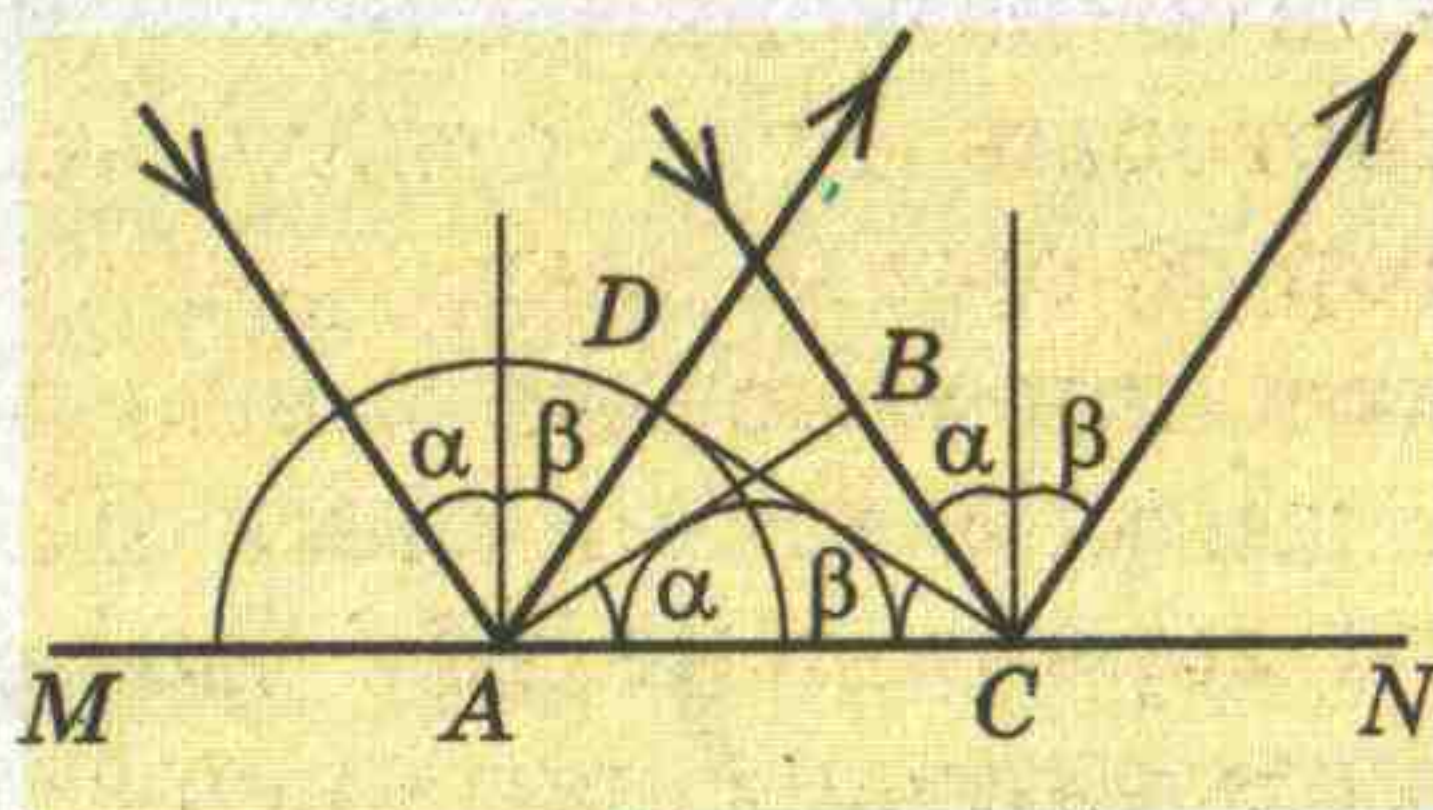


Рис. 4.2. Отражение световой волны от поверхности

Как известно, равные треугольники имеют одинаковые углы. Учитывая это, можно утверждать, что углы  $\alpha$  и  $\beta$  между лучом и перпендикуляром в точке падения, как дополняющие для равных углов, также будут равны:  $\angle \alpha = \angle \beta$ . На основании



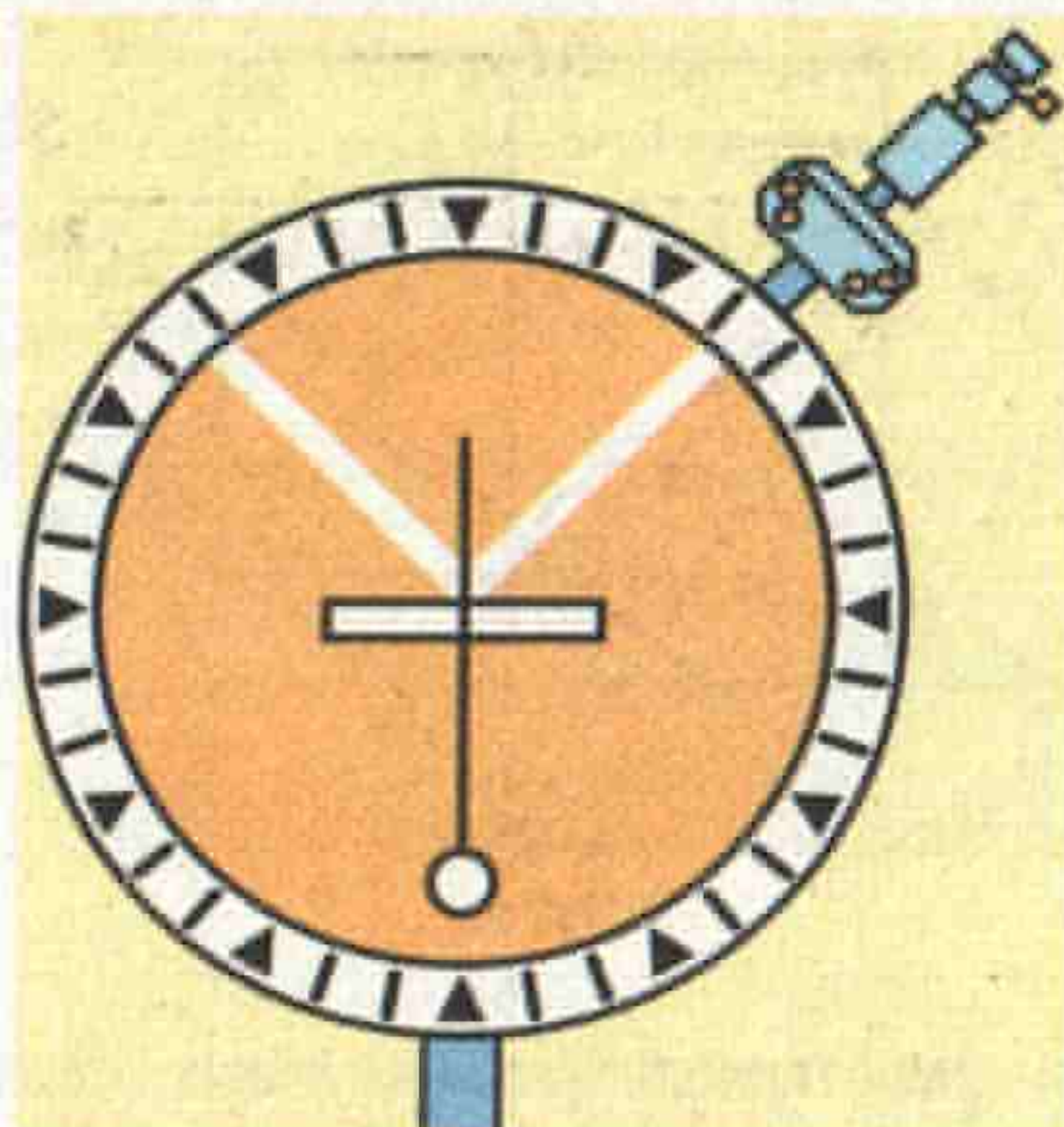


Рис. 4.3. Оптический диск

этого можно заключить, что *угол отражения светового луча от поверхности равен углу его падения*.

Таким образом, на основе волновых представлений о природе света доказана и вторая часть закона отражения света, которую можно подтвердить также экспериментальным путем. Установим на оптическом диске плоское зеркало и направим на него узкий пучок света (рис. 4.3). С помощью меток на диске можно легко убедиться, что угол между падающим лучом и

перпендикуляром (угол падения) равен углу между перпендикуляром и отраженным лучом (угол отражения).

Подводя итоги, можно сделать вывод, что свет взаимодействует с оптической средой, в которой распространяется, в результате чего может происходить его поглощение, рассеивание или отражение. Все эти явления объясняют и волновая, и корпускулярная теории света.

168

1. Какие явления происходят в процессе распространения света в среде?
2. Чем объясняется поглощение света веществом?
3. Какова природа рассеивания света?
4. В чем состоит сущность закона отражения света с позиций волновой теории?
5. Каким образом можно экспериментально подтвердить справедливость закона отражения света?

## § 54. Зеркала. Получение изображений при помощи зеркал

Явление отражения света широко используется в технике и повседневной жизни, в частности когда необходимо изменить направление распространения световых пучков на противоположное. С этой целью применяют зеркала, которые в зависимости от формы отражающей поверхности могут быть плоскими, сферическими, параболическими и т. п.

Плоское зеркало — самое распространенное оптическое приспособление, использующее законы отражения света. Возможность видеть изображения предметов в зеркале является результатом совместного действия зеркала и глаза человека. Для подтверждения этого построим изображение точки, полу-



ченное при помощи плоского зеркала (рис. 4.4).

Пусть на плоское зеркало  $MN$  падает пучок световых лучей из точки  $S$ . Изобразим два луча, падающих на зеркало под разными углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Согласно закону отражения углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$  отраженных световых лучей будут равны соответствующим углам падения. Вследствие этого от зеркала будет распространяться расходящийся пучок света. Если продлить отраженные лучи за плоскость зеркала, то они пересекутся в точке  $S'$ . Соединив прямой точки  $S$  и  $S'$ , получим два равных треугольника  $\triangle SAO$  и  $\triangle S'AO$ . Из условия равенства данных треугольников следует, что отрезки  $SO$  и  $S'O$  также равны. Следовательно, можно сделать вывод, что предмет и изображение, полученное в плоском зеркале, симметричны относительно плоскости зеркала; оно всегда мнимое, поскольку находится на пересечении продленных отрезков расходящихся лучей.

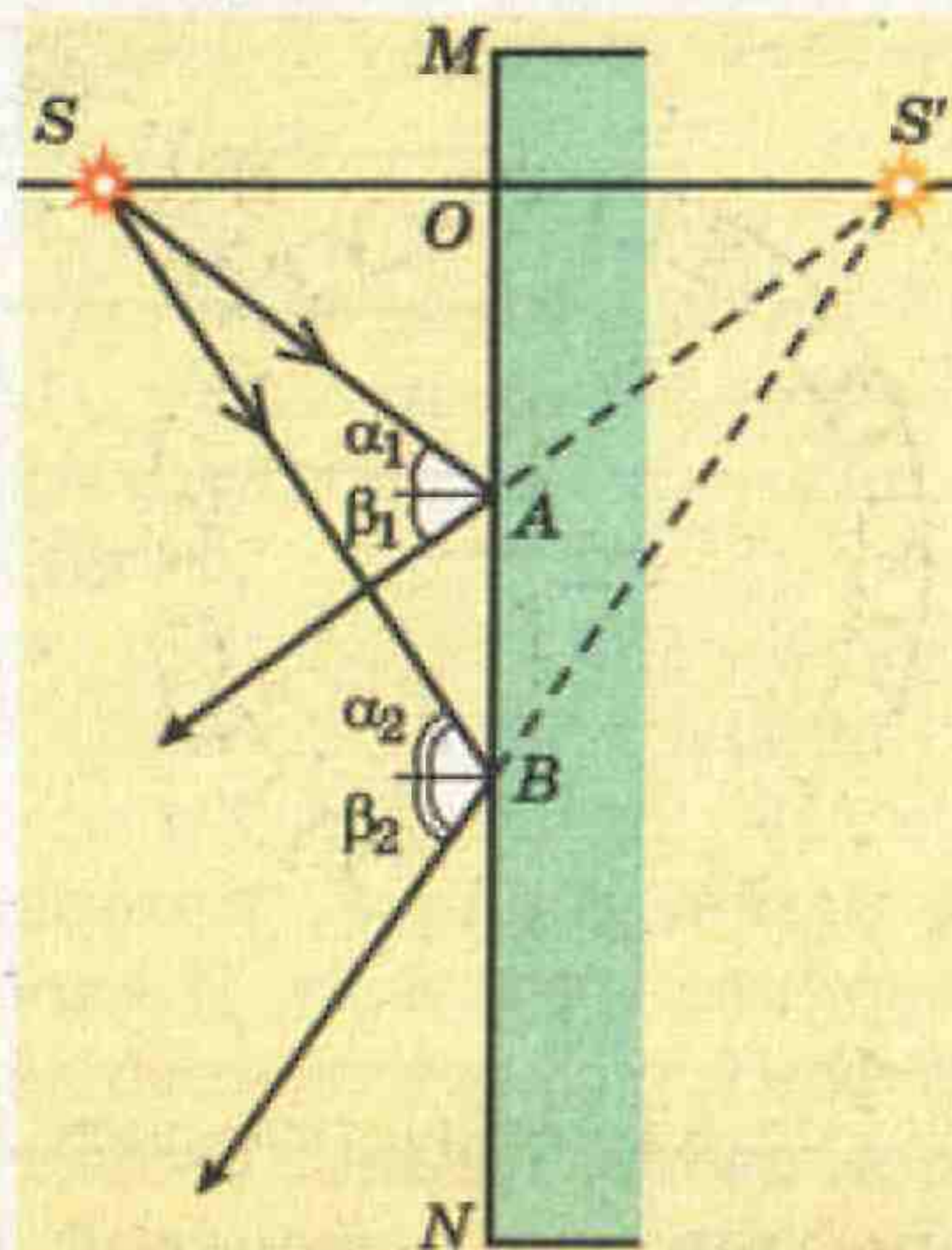


Рис. 4.4. Построение изображения точки, полученного при помощи зеркала

Рассуждениями относительно построения изображения точки, полученного при помощи зеркала, можно воспользоваться и для построения изображения предмета, представляя его как совокупность точек.



Чтобы построить изображение предмета, полученное в плоском зеркале, можно воспользоваться простыми правилами:

- от точечного источника света следует опустить перпендикуляр на поверхность зеркала и продлить его за его плоскость;
- измерить расстояние от источника света до зеркала и отложить его на продолжении перпендикуляра за зеркалом;
- метка на данном отрезке определяет положение мнимого изображения точечного источника света, полученного при помощи зеркала.



Построение изображений, полученных при помощи сферических зеркал, основывается на тех же законах отражения света, что и для плоского зеркала. Однако сферическая поверхность таких зеркал не только изменяет направление распространения света, но и влияет на конфигурацию пучков света. Например, параллельный пучок света, падая на вогнутую зеркальную поверхность, может собираться



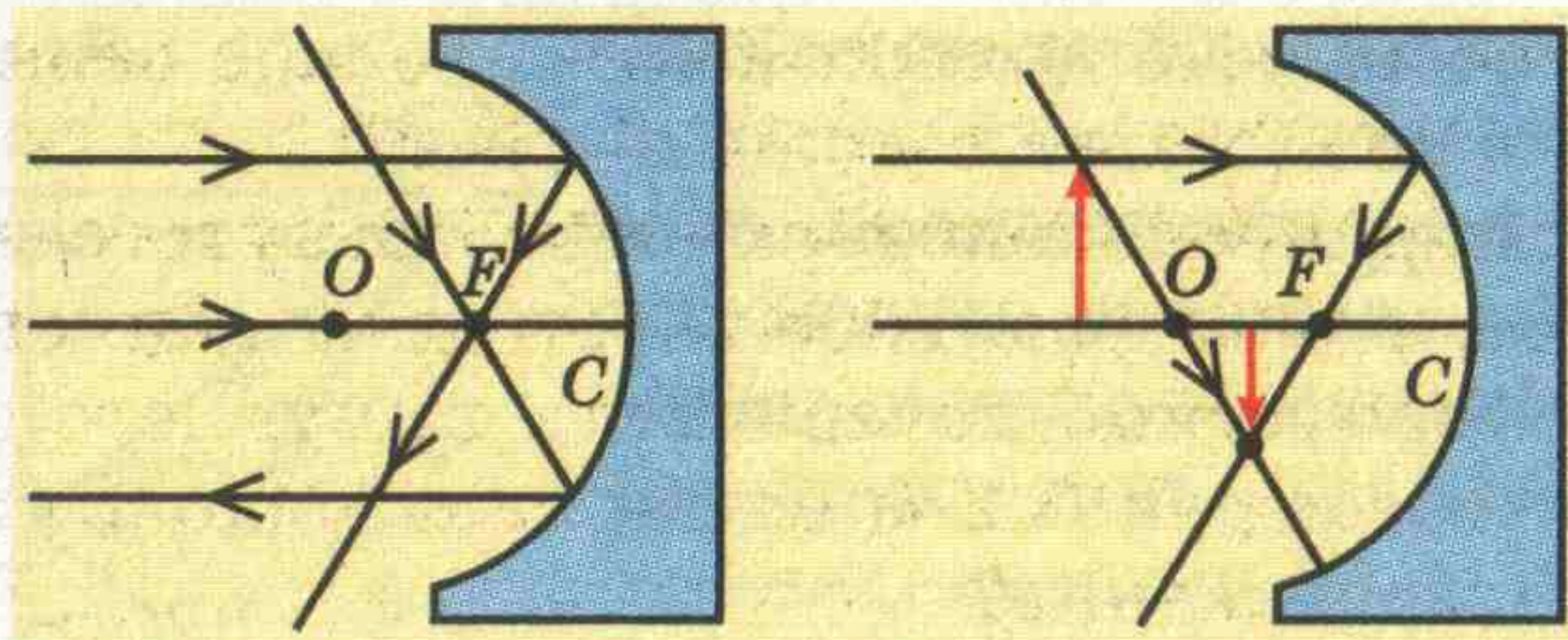


Рис. 4.5. Отражение света в сферическом зеркале

в одной точке  $F$ , которая называется фокусом сферического зеркала (рис. 4.5). И наоборот, если источник света поместить в фокусе сферического зеркала, то получим параллельный пучок света. Данное свойство используется в отражателях света (рефлекторах) фонарей и мощных прожекторов, имеющих сферическую или параболическую форму.

Построение изображений, полученных при помощи сферических зеркал, подчиняется формуле сферического зеркала:

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

где  $F$  – фокусное расстояние сферического зеркала;  $d$  – расстояние от зеркала до предмета;  $f$  – расстояние от зеркала до изображения.

Установлено, что фокусное расстояние сферического зеркала равно половине радиуса сферической поверхности, образующей данное зеркало:  $F = \frac{R}{2}$ . У вогнутых зеркал оно имеет положительное значение, а в выпуклых – отрицательное, что следует учитывать при решении задач по формуле сферического зеркала.

1. Какие по форме поверхности бывают зеркала?
2. Зависит ли закон отражения света от формы отражающей поверхности?
3. Какими правилами можно воспользоваться, чтобы построить изображение точки, полученное при помощи плоского зеркала?
4. Каким образом можно найти фокусное расстояние сферического зеркала?
5. Какое значение фокусного расстояния имеет плоское зеркало?

## Упражнение 25

1. Каким образом можно осветить дно колодца при помощи плоского зеркала солнечными лучами, падающими на землю под углом  $25^\circ$ ?



2\*. Каким по высоте должно быть плоское зеркало, чтобы человек увидел себя в нем в полный рост?

3. Радиус сферической поверхности вогнутого зеркала равен 48 см. Чему равно фокусное расстояние данного зеркала?

4. Радиус сферической поверхности выпуклого зеркала равен 1 м. На расстоянии 0,2 м от зеркала находится предмет. Где будет его изображение?

5. На каком расстоянии будет находиться изображение предмета в выпуклом зеркале, радиус сферической поверхности которого 40 см, если предмет разместили на расстоянии 30 см от зеркала?

## § 55. Преломление света. Законы преломления света

Как известно, на границе двух сред свет может как отражаться, так и преломляться, если вторая среда оптически прозрачна. Проведем такой опыт. Нальем в стеклянный сосуд воду, подкрашенную специальным веществом, светящимся под действием света. Над поверхностью воды создадим легкую дымовую завесу, которая также даст нам возможность наблюдать за ходом световых лучей. Если теперь направить узкий пучок света на поверхность воды под некоторым углом, то можно увидеть, что на ее поверхности он разделится на два пучка (рис. 4.6). Один из них будет отраженным от поверхности воды в соответствии с законом отражения света, а другой проникнет в воду, отклонившись при этом от прямолинейной траектории, т. е. произойдет его преломление.

Такую особенность прохождения луча в оптической среде можно объяснить лишь тем, что скорость распространения света в различных средах неодинакова и отличается от скорости света в вакууме. Их соотношение характеризует показатель преломления вещества  $n$ , определяющий, во сколько раз скорость света в вакууме  $c$  больше скорости распространения световых волн  $v$  в данной среде:

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

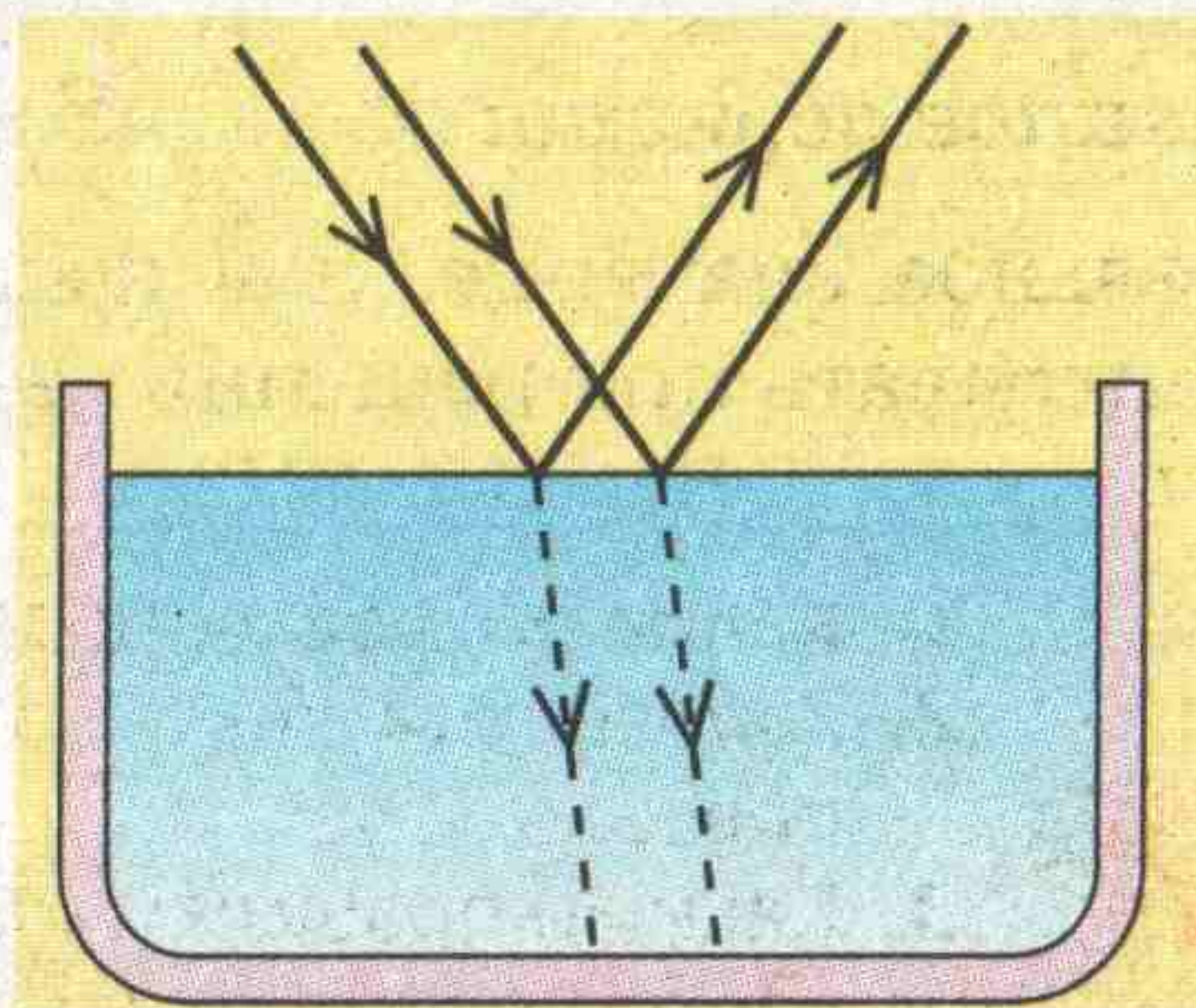


Рис. 4.6. Отражение и преломление света на границе двух сред



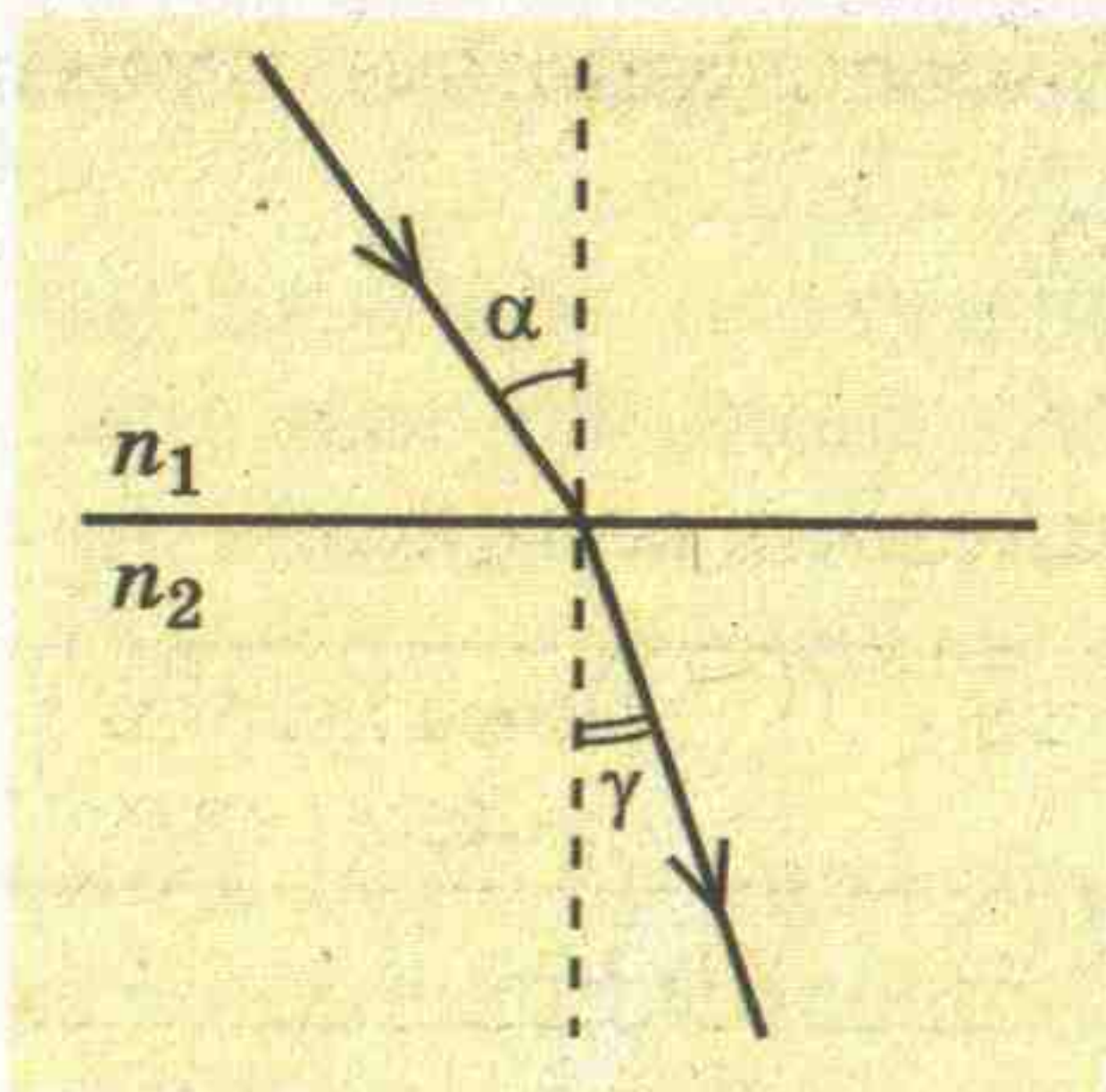


Рис. 4.7. Закон преломления света

В XVII в. голландский физик В. Снелл открыл закон преломления света: *падающий и преломленный лучи лежат в одной плоскости с перпендикуляром, опущенным на границу двух сред в точке падения луча; угол падения  $\alpha$  светового луча на поверхность раздела двух сред связан с углом преломления  $\gamma$  соотношением* (рис. 4.7):

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \gamma,$$

или

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma},$$

где  $n_1$  — показатель преломления среды, из которой идет луч;  $n_2$  — показатель преломления среды, в которой свет распространяется после прохождения границы раздела.

172

Часто отношение  $\frac{n_2}{n_1}$  называют *относительным показателем преломления* второй среды относительно первой и обозначают  $n_{21}$ . Если учесть формулу показателя преломления  $n = \frac{c}{v}$ , то можно сделать вывод, что относительный показатель преломления характеризует отношение скоростей света в средах, в которых он распространяется:

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Таким образом, закон преломления света позволяет найти значение угла преломления, который зависит от соотношения скоростей света в каждой из сред. Отсюда следует, что не всегда угол преломления меньше угла падения. К примеру, если световой луч выходит из среды с большим по значению показателем преломления и попадает в среду с меньшим показателем преломления (например, из воды в воздух), то угол преломления будет больше угла падения (рис. 4.8).

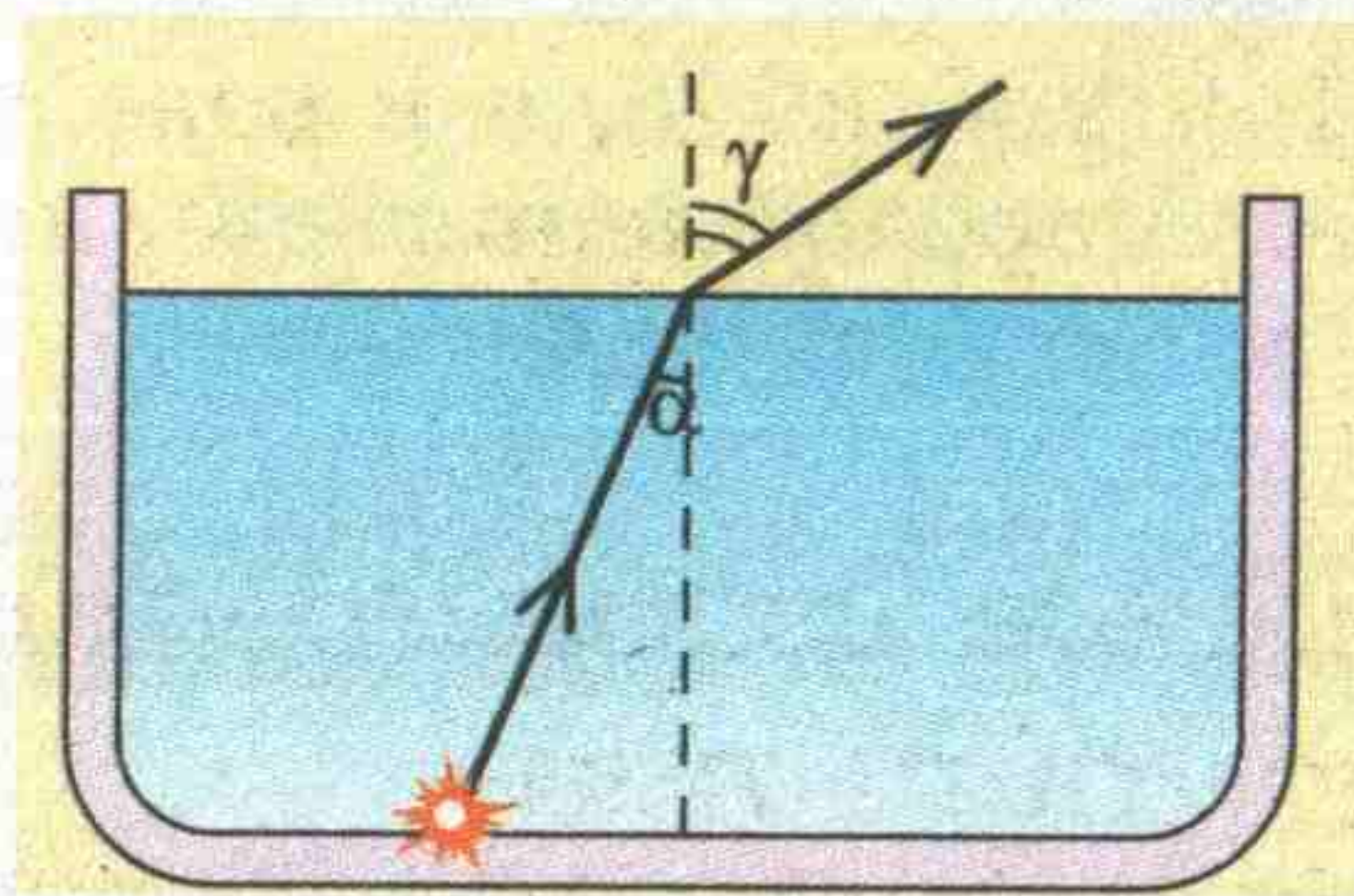


Рис. 4.8. Ход светового луча из воды в воздух

Показатель преломления света относительно вакуума называется *абсолютным показателем преломления*. Как правило, в таблицах приводят именно его, а относительные



показатели преломления находят экспериментальным путем

или вычисляют по формуле  $n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}$ .

### Абсолютные показатели преломления веществ

Вещество	Показатель преломления	Вещество	Показатель преломления
Воздух	1,0003	Полиэтилен	1,52
Вода	1,33	Алмаз	2,42
Стекло (разное)	1,52–1,89	Кварц	1,46

1. Почему на границе двух сред происходит преломление светового луча?
2. В чем состоит сущность закона преломления света?
3. Какой физический смысл абсолютного и относительного показателей преломления?



### Упражнение 26

173

1. Определить показатель преломления стекла, если скорость распространения света в нем равна 200 000 км/с.

2. На поверхность жидкости падает луч под углом 25°. Определить угол преломления луча, если скорость света в данном веществе равна  $2,4 \cdot 10^5$  км/с.

3. Показатель преломления вещества равен 1,63. Чему равен угол преломления светового луча в данном веществе, если угол падения луча 45°?

4. Световой луч падает из воздуха на поверхность жидкости под углом 45° и преломляется под углом 24°. Чему будет равен угол преломления луча в данной жидкости, если свет будет падать под углом 80°?

5\*. Чему равен угол падения светового луча на поверхность кварцевого стекла, если угол между падающим и преломленным лучами равен 120°?

6\*. Какова скорость света в льдине, если угол падения луча равен 61°, а угол преломления 42°?

7. Скорость света в стекле равна 198 200 км/с, а в воде – 225 000 км/с. Определить показатель преломления стекла относительно воды.

## § 56. Линзы. Построение изображений, получаемых при помощи линз

Преломление света на границе двух сред нашло широкое практическое применение в оптических устройствах, называ-



емых линзами. Основная их особенность состоит в том, что они способны изменять конфигурацию световых пучков и направление их распространения, в частности собирать их в точку (собирающие линзы) либо делать их расходящимися (рассеивающие линзы). Благодаря этому их свойству можно получать увеличенные или уменьшенные изображения предметов на экране либо на сетчатке глаза.

Для построения изображений при помощи линз учитывают характерные точки и линии этих оптических устройств, а также особенности прохождения в них световых лучей. Вспомним их из курса физики 7-го класса.

Прямая, соединяющая центры сферических поверхностей, образующих линзу, называется главной оптической осью линзы. На ней находится фокус линзы, т. е. точка, в которой сходятся все световые лучи, идущие параллельно главной оптической оси, либо продолжения таких лучей, если линза образует расходящиеся пучки (рис. 4.9). В последнем случае говорят, что фокус мнимый (им обладают все рассеивающие линзы). Поэтому при помощи рассеивающих линз нельзя получить изображение предмета на экране. Мы его видим лишь благодаря действию хрусталика глаза, который вместе с рассеивающей линзой образует своеобразную оптическую систему, собирающую расходящиеся лучи на сетчатке глаза. Для простоты изложения материала в дальнейшем будем рассматривать только собирающие линзы.

174

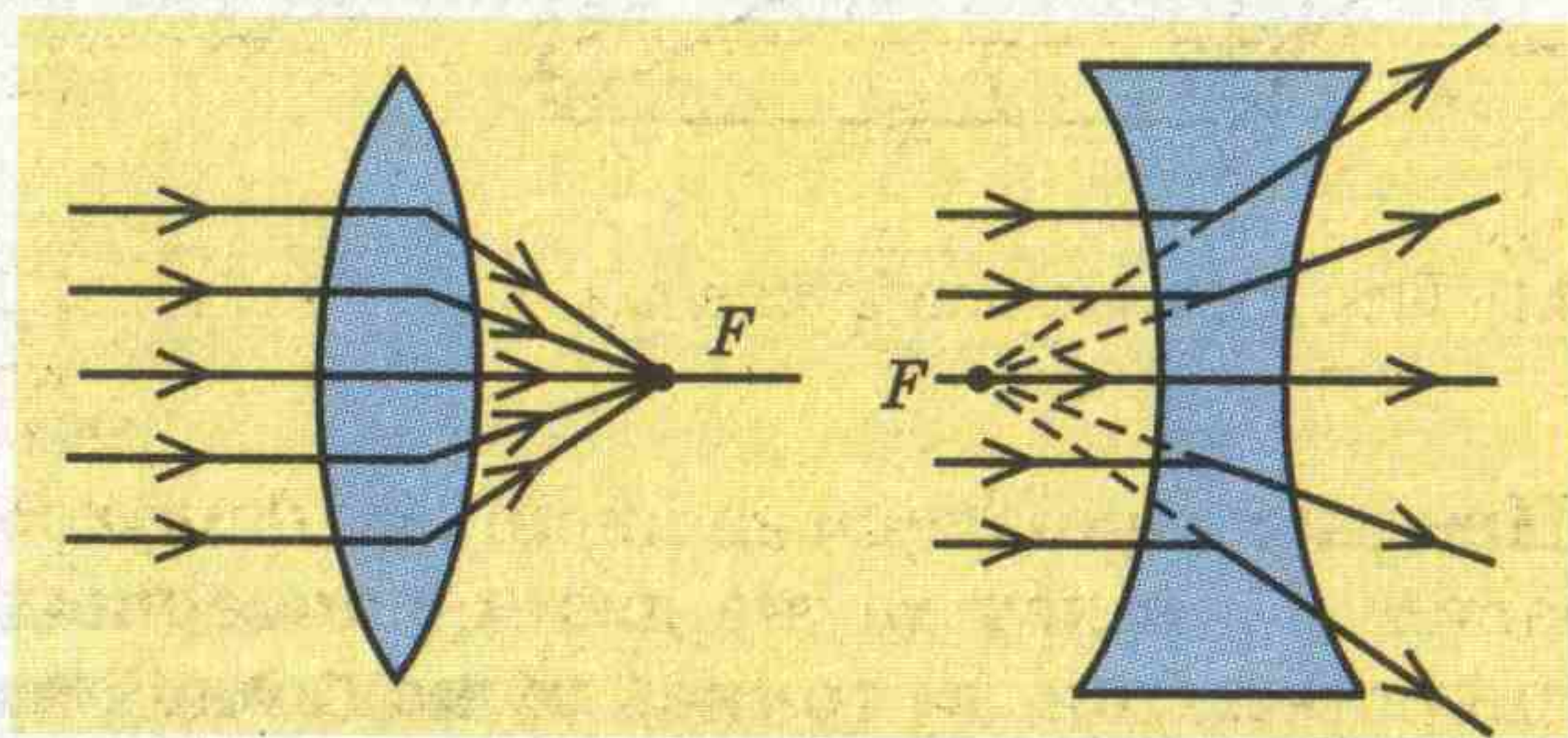


Рис. 4.9. Характерные точки и линии линз

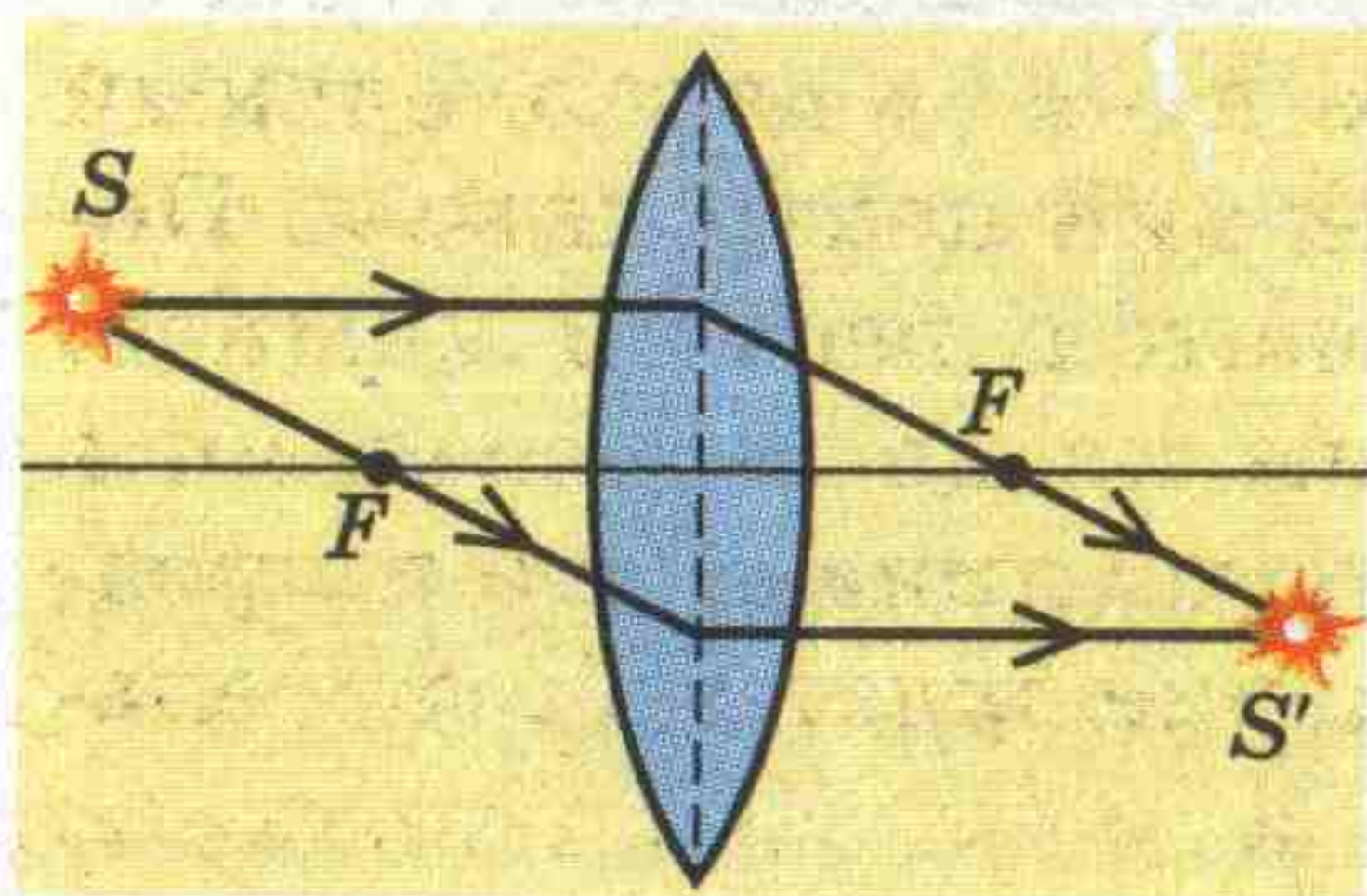


Рис. 4.10. Ход лучей в собирающей линзе

Для построения изображения предмета, как правило, пользуются двумя-тремя лучами, которые выходят из произвольной точки предмета и имеют направления, характерные для линз. Один из таких лучей направлен параллельно главной оптической оси; после преломления он пересекает ось в фокусе линзы (рис. 4.10). Вторым луч, который проходит через фокус, после преломления в линзе направлен параллельно главной оптической оси. Третьим может быть луч, про-



ходящий через оптический центр линзы, поскольку он не преломляется. Все они пересекутся в точке  $S'$ , которая является изображением выбранной точки предмета.

Существуют правила построения изображений, получаемых при помощи линзы, когда предмет расположен в определенных точках относительно нее. Рассмотрим их на примере собирающей линзы.

**1. Предмет находится между фокусом и двойным фокусом линзы (рис. 4.11).** Направим два характерных луча (один – параллельно главной оптической оси, второй – через фокус), при помощи которых получим изображение предмета, находящееся справа от линзы за двойным фокусом. Оно будет действительным, перевернутым и увеличенным.

**2. Предмет находится в двойном фокусе линзы (рис. 4.12).** Направим те же два характерных луча – параллельный главной оптической оси и через фокус – и получим справа от линзы симметричное относительно нее изображение предмета, расположенное в точке двойного фокуса. Оно будет действительным, перевернутым и по размеру равным предмету.

175

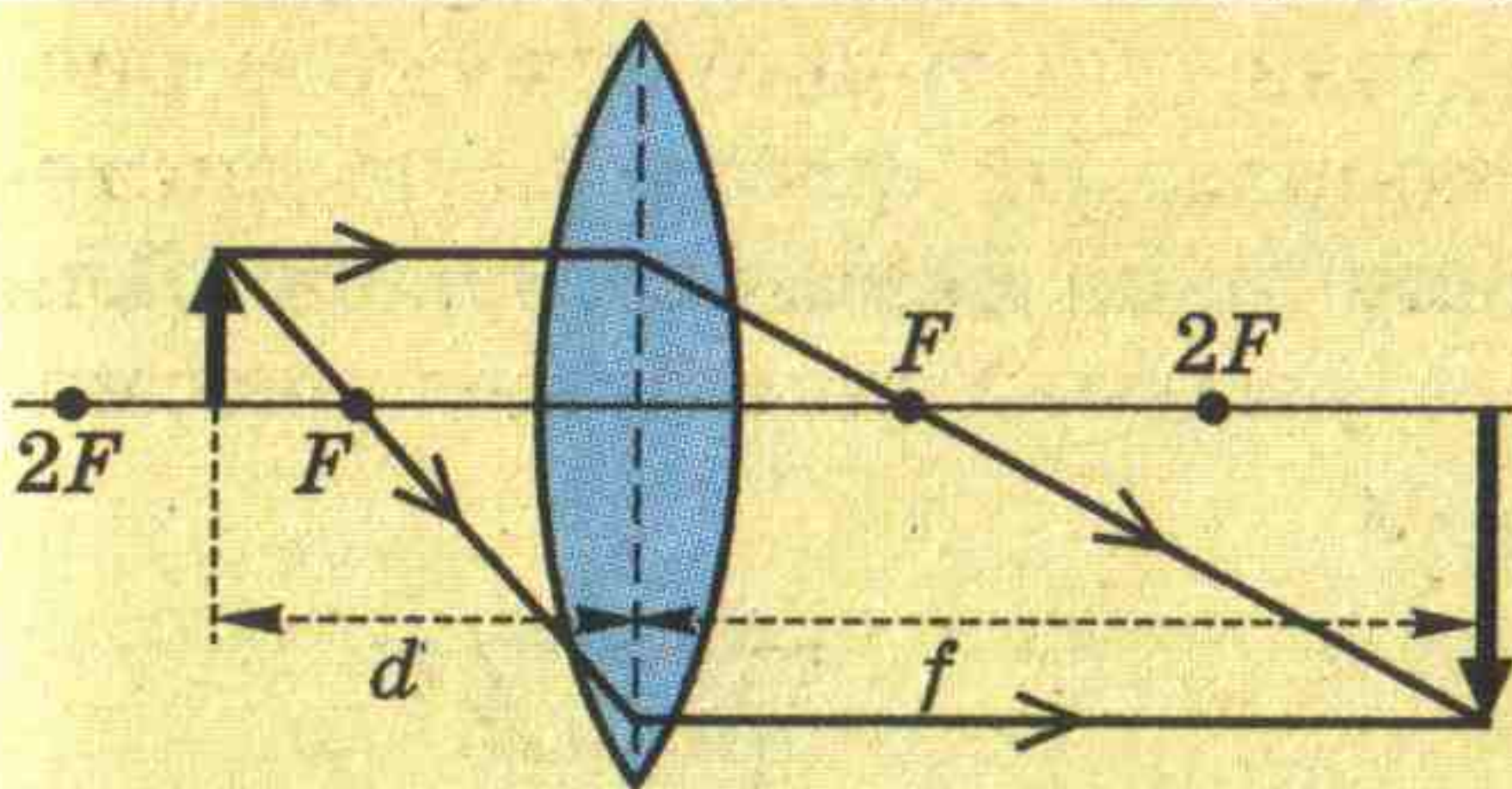


Рис. 4.11. Построение изображения, если  $F < d < 2F$

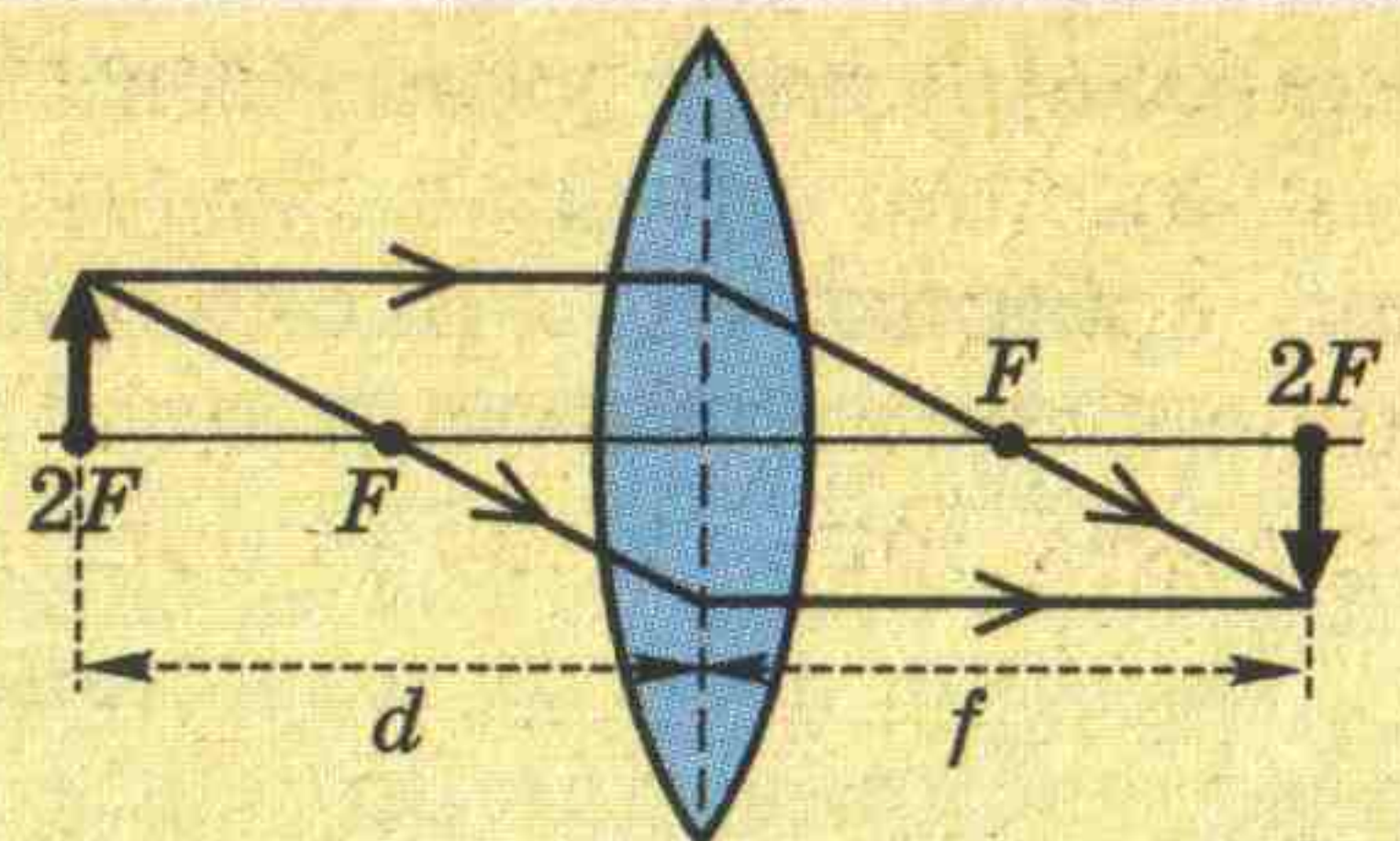


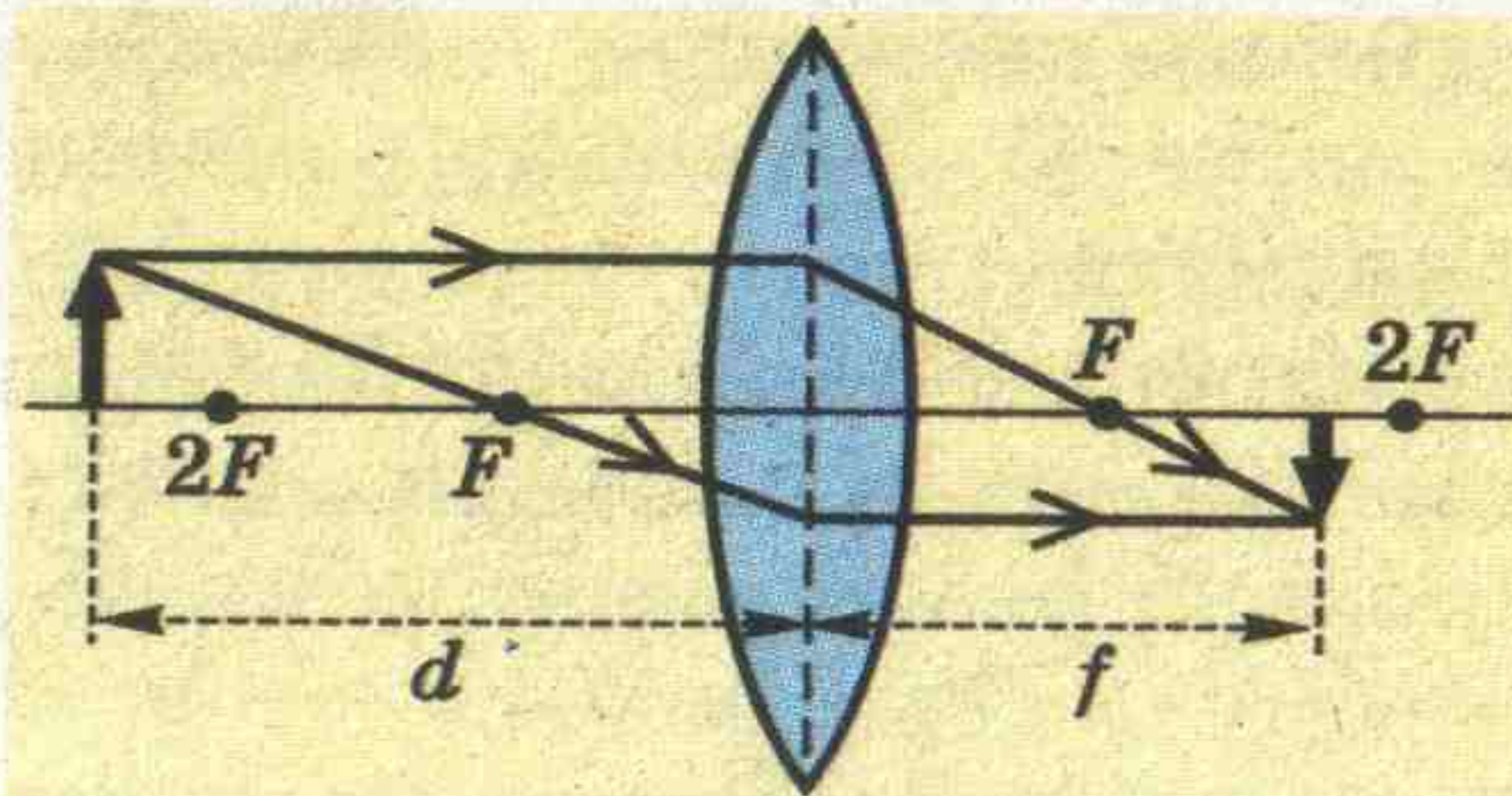
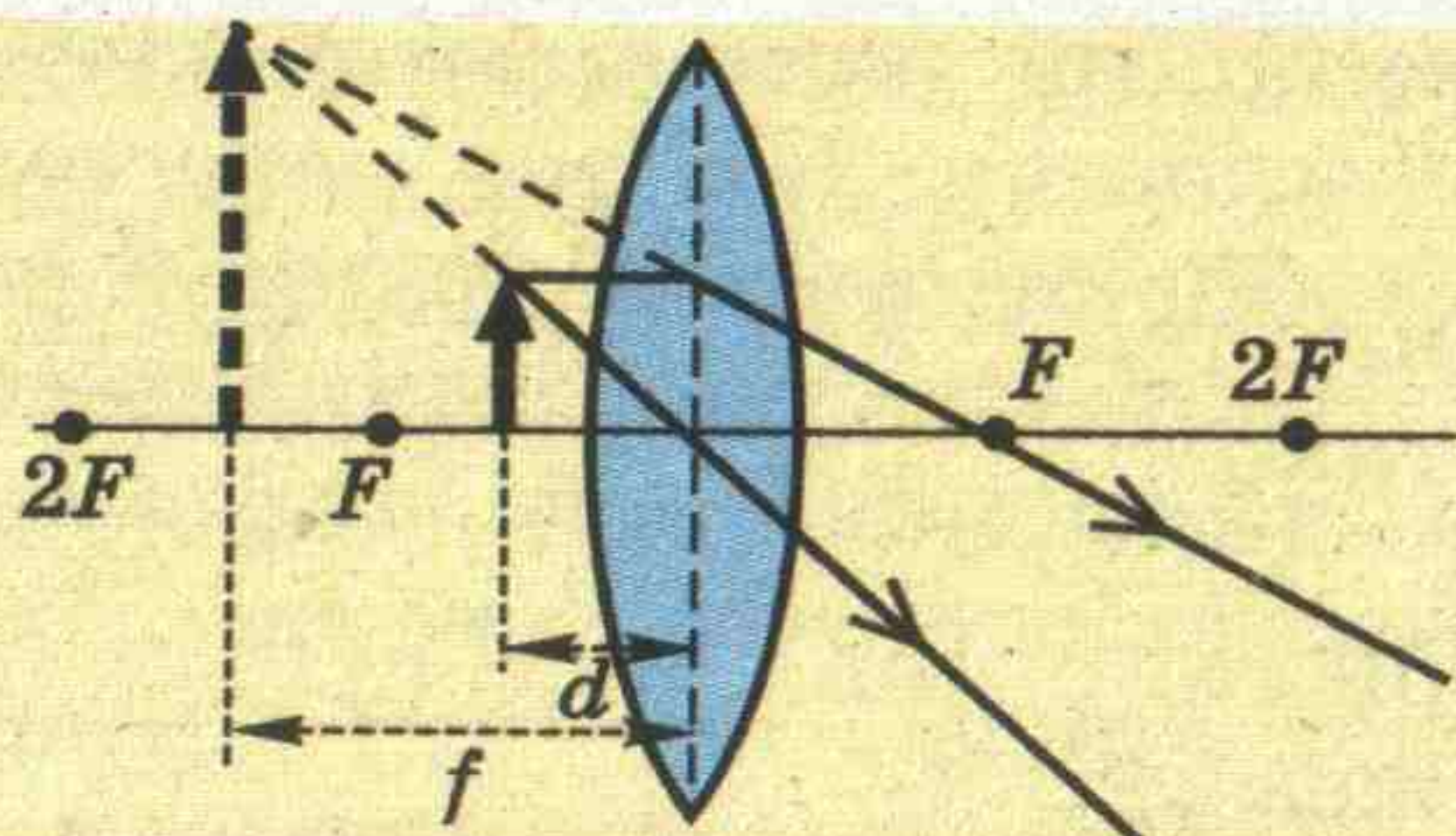
Рис. 4.12. Построение изображения, если  $d = 2F$

**3. Предмет находится за двойным фокусом линзы (рис. 4.13).** Направим на линзу те же два характерных луча, которые теперь пересекутся в точке, находящейся справа от линзы между фокусом и двойным фокусом. Изображение предмета будет действительным, перевернутым и уменьшенным.

**4. Предмет находится перед фокусом линзы (рис. 4.14).** Направим на линзу два характерных луча – параллельный главной оптической оси и через оптический центр линзы. После преломления в ней лучи становятся расходящимися. Чтобы получить изображение, продлим их до пересечения в точке, расположенной с той же стороны от линзы, что и предмет, – слева. В данном случае изображение будет действительным, прямым и увеличенным.

Чтоб найти положение изображения предмета относительно линзы, применяют формулу линзы, которая связывает между



Рис. 4.13. Построение изображения, если  $d > 2F$ Рис. 4.14. Построение изображения, если  $d < F$ 

собой фокусное расстояние линзы  $F$ , расположение предмета и его изображения относительно нее:

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

где  $d$  – расстояние от предмета до линзы;  $f$  – расстояние от линзы до изображения.

Припомним также, что величину, обратную фокусному

176

расстоянию линзы, называют *оптической силой линзы*:  $D = \frac{1}{F}$ . Ее измеряют в диоптриях (дптр).



**1 диоптрия – это оптическая сила такой линзы, фокусное расстояние которой равно 1 м.**

**Задача.** Найти положение изображения предмета, которое дает собирающая линза с фокусным расстоянием 5 см, если предмет расположен на расстоянии 3 см от линзы.

**Дано:**

$$F = 5 \text{ см},$$

$$d = 3 \text{ см}.$$

$$f = ?$$

**Решение**

Для решения задачи воспользуемся формулой линзы:  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$ .

$$\text{Отсюда } F = \frac{df}{d+f}, \quad f = \frac{Fd}{d-F}.$$

$$f = \frac{5 \text{ см} \cdot 3 \text{ см}}{3 \text{ см} - 5 \text{ см}} = -7,5 \text{ см}.$$

Знак «-» означает, что изображение является мнимым, оно находится с той же стороны, что и предмет.

1. Какими бывают линзы?
2. Какие характерные линии и точки используют для построения изображений, получаемых при помощи линз?
3. Каково свойство фокуса линзы? В каких линзах он мнимый?
4. Какие изображения может давать линза?





## Упражнение 27

1. Чему равно фокусное расстояние линзы, если изображение предмета, расположенного в 25 см от линзы, находится на таком же расстоянии?

2. На расстоянии 60 см от линзы с фокусным расстоянием 50 см расположен предмет. Где будет находиться его изображение?

3. Предмет расположен на расстоянии 80 см от линзы. Его изображение находится на расстоянии 30 см от нее. Чему равно фокусное расстояние линзы?

4\*. Расстояние между предметом и экраном 90 см. Где надо поместить собирающую линзу с фокусным расстоянием 20 см, чтобы на экране получить четкое изображение предмета?

5\*. Свеча расположена на расстоянии 120 см от экрана. Если между свечой и экраном (ближе к свече) поместить собирающую линзу, то на экране появится четкое увеличенное изображение свечи. Если линзу переместить на 90 см ближе к экрану, то получим четкое уменьшенное изображение свечи. Найти фокусное расстояние линзы.

177

## § 57. Интерференция света

Как известно, если направить пучок на любую поверхность, то ее освещенность увеличится. Иную картину можно наблюдать, когда на поверхность падают два пучка света от одного источника, накладываясь один на другой (рис. 4.15). В случае попадания их на один и тот же участок поверхности наблюдается чередование максимумов и минимумов освещенности. Такую картину от двух щелей впервые наблюдал в 1801 г. английский ученый Т. Юнг, давший впоследствии объяснение данному явлению на основании волновой теории света.

Явление перераспределения интенсивности падающего света он назвал *интерференцией* (от лат. — *наложение*). Оно является результатом взаимного усиления или ослабления амплитуды электромагнитных волн, которые исходят от одного источника. Интерференционную картину, полученную вследствие наложения световых волн, можно наблюдать лишь при соблюдении определенных

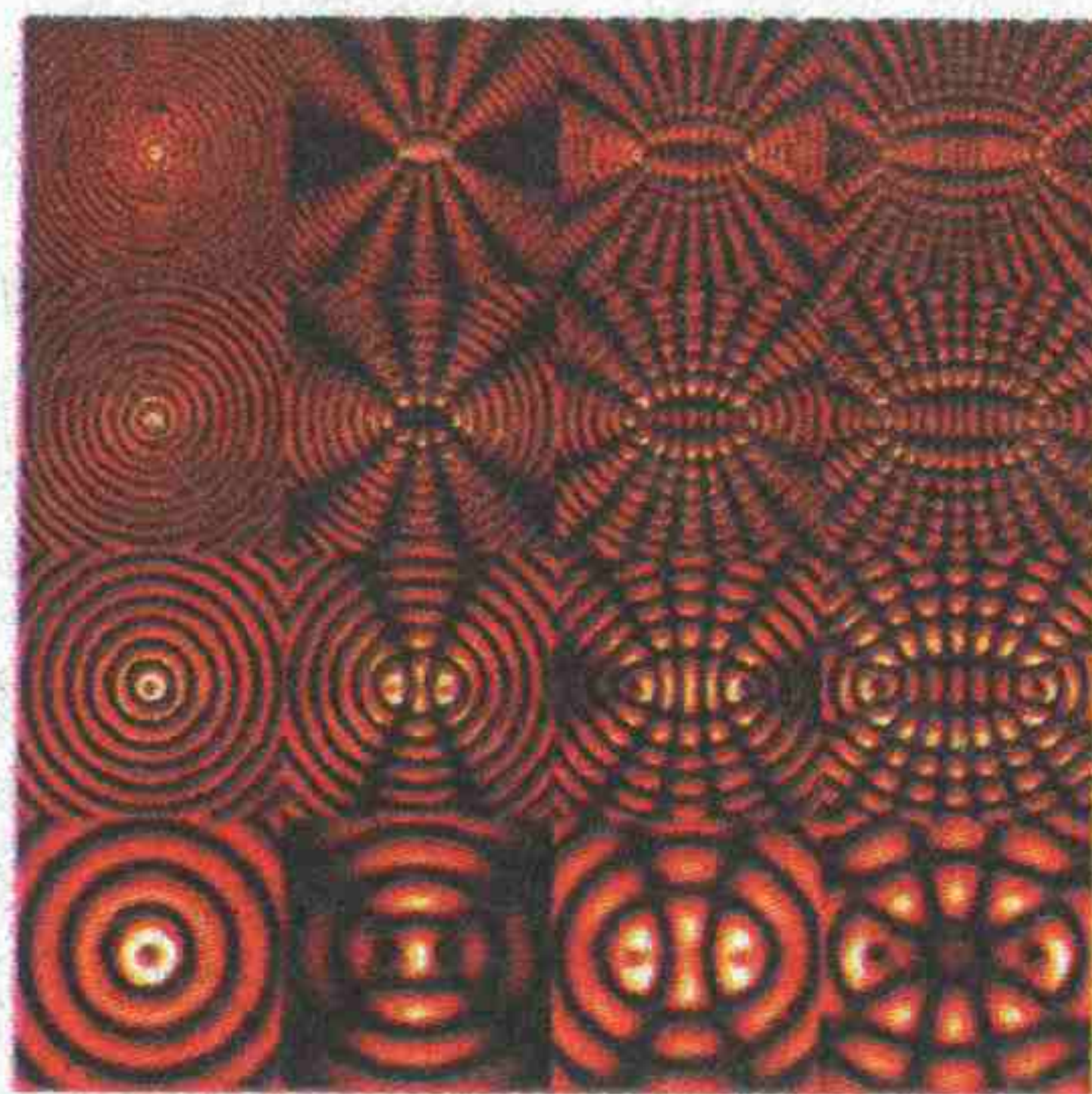


Рис. 4.15. Интерференционные картины света от двух щелей разного размера



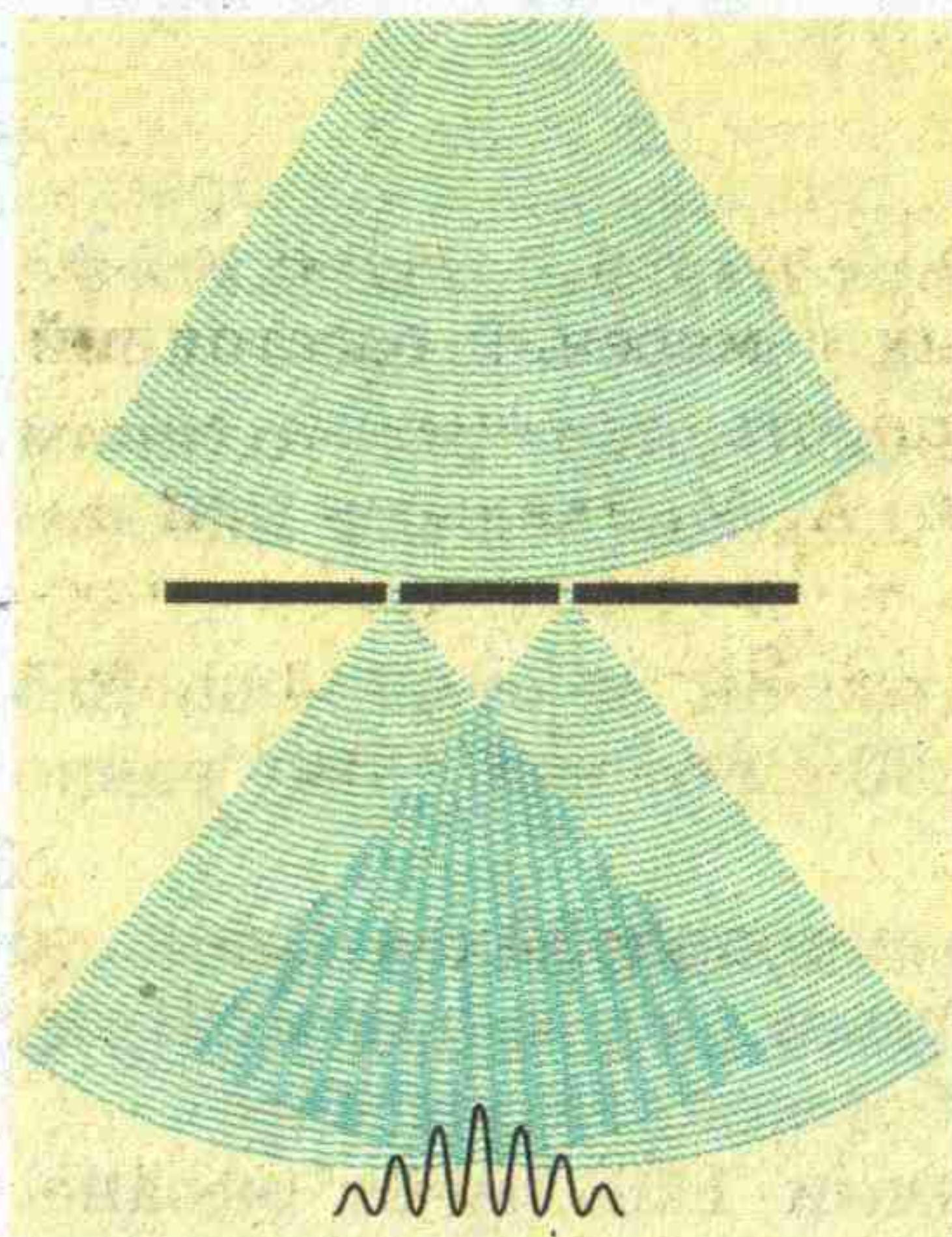


Рис. 4.16. Интерференция света от двух щелей

178

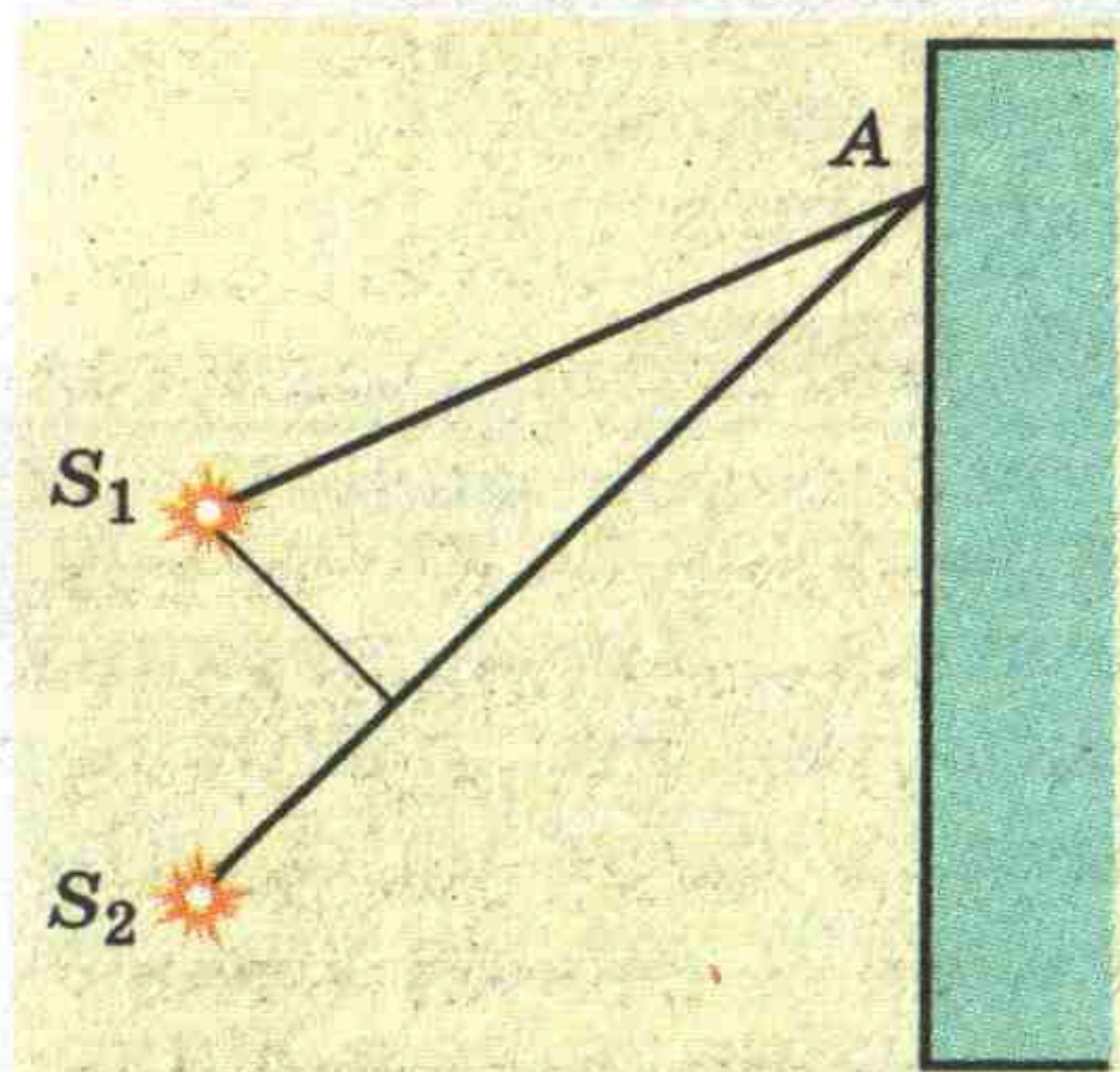


Рис. 4.17. Разность хода световых лучей

рентных источников  $S_1$  и  $S_2$  с некоторым смещением фаз, учитывая разные расстояния, проходимые фронтами этих волн (рис. 4.17). На рисунке видно, что  $S_1A < S_2A$ . Следовательно, в данном случае говорят, что существует разность хода световых лучей, равная  $\Delta l = S_2A - S_1A$ . Если в эту разность хода вкладывается четное число полуволен, тогда в данной точке пространства наблюдается максимум освещенности:

$$\Delta l = 2k \frac{\lambda}{2},$$

где  $\lambda$  — длина волны;  $k = 1, 2, 3, \dots n$ .

Если же разность хода равна нечетному числу полуволен, то в данной точке наблюдается минимум освещенности:

условий: электромагнитные волны должны быть когерентными, т. е. иметь одинаковую частоту и разность фаз. Практически это достигается путем расщепления светового пучка от одного источника света на два и более. Рассмотрим данное явление детальнее (рис. 4.16).

Согласно принципу Гюйгенса-Френеля всякий световой пучок от щели представляет собой самостоятельную электромагнитную волну, которая, попадая на экран, взаимодействует с другой, когерентной ей волной. Если в некоторую точку экрана приходят две волны одной частоты и фазы, то в результате их наложения освещенность экрана в данной точке возрастает (максимумы интерференционной картины). Если же они приходят в данную точку в противофазе, то в результате наложения их интенсивности взаимно компенсируются (минимумы интерференционной картины).

Положения максимумов (светлых полос) и минимумов (темных полос) в интерференционной картине можно определить, воспользовавшись формулами условий максимума и минимума. Пусть в произвольную точку A на экране попадает свет от коге-



$$\Delta l = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

Явление интерференции широко используется в науке и технике, в частности для проведения точных измерений расстояний при помощи интерферометров (погрешность измерений менее 100 нм). Например, американский физик А. Майкельсон при помощи сконструированного им интерферометра с высокой точностью измерил скорость света в вакууме, а в 1892–1893 гг. произвел сравнение эталонного метра с длиной волны видимого света.

**Метод просветления оптики впервые был предложен украинским физиком А.Т. Смакулой (1900–1983).**



Явление интерференции нашло практическую реализацию в оптических приборах, когда необходимо было уменьшить в несколько раз интенсивность прохождения света (так называемое просветление оптики, используемое, например, в очках). С этой целью поверхность линз покрывают тонкой прозрачной пленкой. Проходя сквозь нее, свет дважды испытывает отражение: сначала от верхней поверхности пленки, повторно – от нижней. Отраженные пучки света когерентны и имеют определенную разность хода, на значение которой влияет толщина пленки и материал, из которого она произведена. Наложение этих двух пучков света приводит к интерференции. Когда разность их хода равна нечетному числу полуволен, происходит уменьшение интенсивности отраженного света. Полное «погашение» отраженного света для определенного значения длины волны зависит от толщины пленки. Поэтому ее рассчитывают, как правило, для зеленого света, поскольку человеческий глаз к нему наиболее чувствителен.

179

### **Лабораторная работа № 5**

#### **Наблюдение интерференции света**

**Цель.** Визуальное наблюдение явления интерференции при помощи метода колец Ньютона.

**Оборудование.** Стеклянная пластина, плоско-выпуклая линза, источник света.

#### **Теоретические сведения**

Интерференционную картину можно наблюдать от двух когерентных источников света либо на тонких пленках. Например, если взять плоскую стеклянную пластинку и положить на нее плоско-выпуклую линзу большого радиуса ее ограничивающей сферической поверхности (рис. 4.18), то можно на-



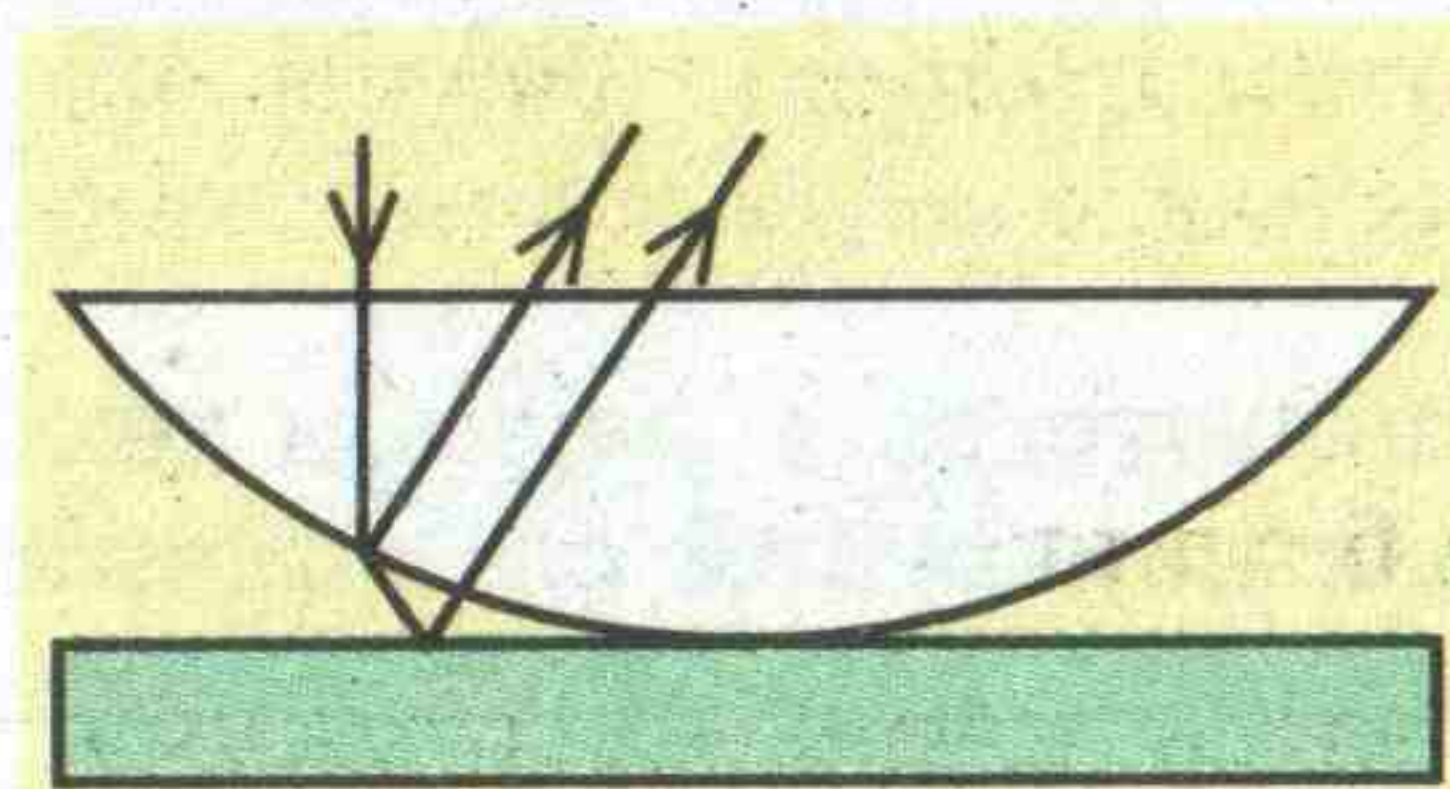


Рис. 4.18. Образование колец Ньютона

частично проходит сквозь нее, затем отражается от нижней, сферической поверхности линзы, а также от поверхности стеклянной пластинки, на которой лежит линза. Вследствие такого многократного отражения образуются два когерентных пучка, создающих устойчивую интерференционную картину. Если параллельный пучок света довольно широкий и падает на всю плоскую поверхность линзы, то в ней образуются чередующиеся темные и светлые концентрические кольца. В соответствии с условием максимумов светлые полосы покрывают те участки, для которых разность хода отраженных лучей равна четному числу полуволен:

$$\Delta l = 2k \frac{\lambda}{2}.$$

Таким же образом темным полосам соответствуют участки интерференционной картины, для которых разность хода отраженных лучей равна нечетному числу полуволен:

$$\Delta l = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

Экспериментальным путем установлено, что радиусы колец Ньютона зависят от длины волны падающего света (4.19).

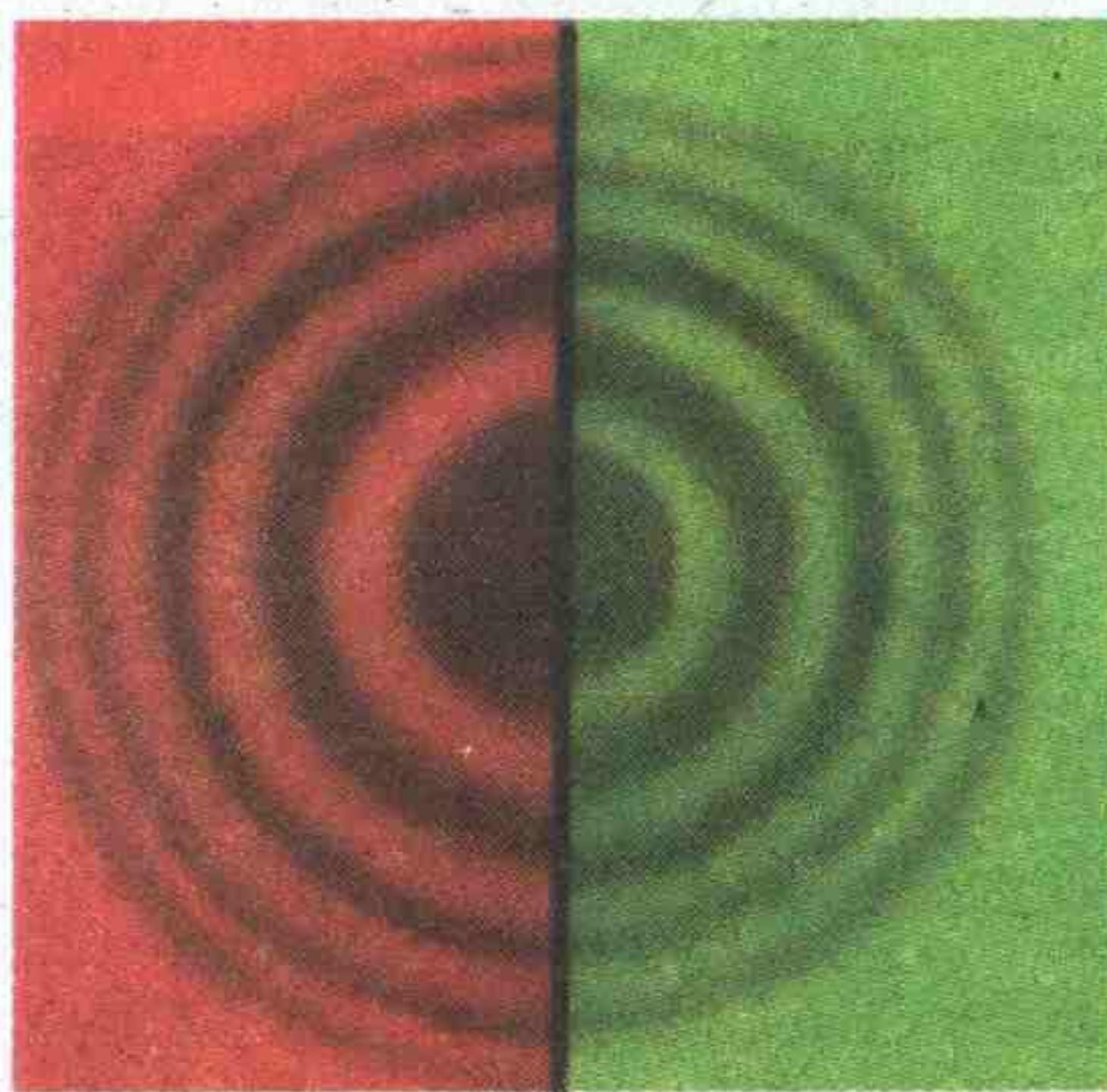


Рис. 4.19. Кольца Ньютона для красного и зеленого света

блюдают интерференционную картину в виде колец. Их называют кольцами Ньютона, в честь ученого, впервые выполнившего такой опыт. Кольца Ньютона являются проявлением интерференции света в системе «линза — пластинка». Когда пучок света падает на плоскую поверхность линзы, то он час-

тично проходит сквозь нее, затем отражается от нижней, сферической поверхности линзы, а также от поверхности стеклянной пластинки, на которой лежит линза. Вследствие такого многократного отражения образуются два когерентных пучка, создающих устойчивую интерференционную картину. Если параллельный пучок света довольно широкий и падает на всю плоскую поверхность линзы, то в ней образуются чередующиеся темные и светлые концентрические кольца. В соответствии с условием максимумов светлые полосы покрывают те участки, для которых разность хода отраженных лучей равна четному числу полуволен:

$$\Delta l = 2k \frac{\lambda}{2}.$$

Таким же образом темным полосам соответствуют участки интерференционной картины, для которых разность хода отраженных лучей равна нечетному числу полуволен:

$$\Delta l = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

Экспериментальным путем установлено, что радиусы колец Ньютона зависят от длины волны падающего света (4.19).

Поэтому, измерив радиус колец Ньютона, можно определить длину волны падающего света, если известен радиус сферической поверхности линзы.

Метод колец Ньютона применяют при высокоточном контроле качества обработки поверхностей. С этой целью на контролируемую поверхность кладут плоскую прозрачную пластинку, качество которой известно. Если пластинку освещать светом известной длины волны, то в тех местах, где поверхности не соприкасаются, вследствие интер-



ференции отраженных лучей образуются полосы. Таким образом, размеры неровностей можно определить с точностью до половины длины волны света.

### Выполнение работы

1. На стеклянную пластинку положить плоско-выпуклую линзу.

2. Направить параллельный пучок света на плоскую грань линзы и убедиться, что в линзе образовались интерференционные полосы в виде колец.

3. Зарисовать интерференционную картину в тетради.

4. Сделать выводы.

1. В чем состоит сущность явления интерференции света?
2. Какую интерференционную картину наблюдают от двух щелей?
3. При каких условиях происходит интерференция волн?
4. В каких случаях наблюдаются максимумы и минимумы интерференционной картины?
5. Где используется явление интерференции?
6. Чем объясняется образование колец Ньютона?



181

## § 58. Дифракция света

Как известно, прямолинейность распространения света является одним из основных положений геометрической оптики. Оно является основополагающим при построении изображений в оптических системах, объяснении образования тени и полутени, солнечного и лунного затмений. Доказано, что если на пути пучка света поместить непрозрачный предмет, то на экране за ним образуется четкая тень; если пучок света проходит сквозь отверстие, то на экране наблюдается четкое светлое пятно, т. е. прямолинейность распространения света подтверждена многочисленными экспериментами и нашим собственным жизненным опытом.

Если на пути света встречаются небольшие по размерам предметы или отверстия, четкость изображения тени или светового пятна теряется, их края становятся размытыми. Когда преграда будет соизмерима длине волны падающего света (десятые доли миллиметра и меньше), то на экране наблюдается

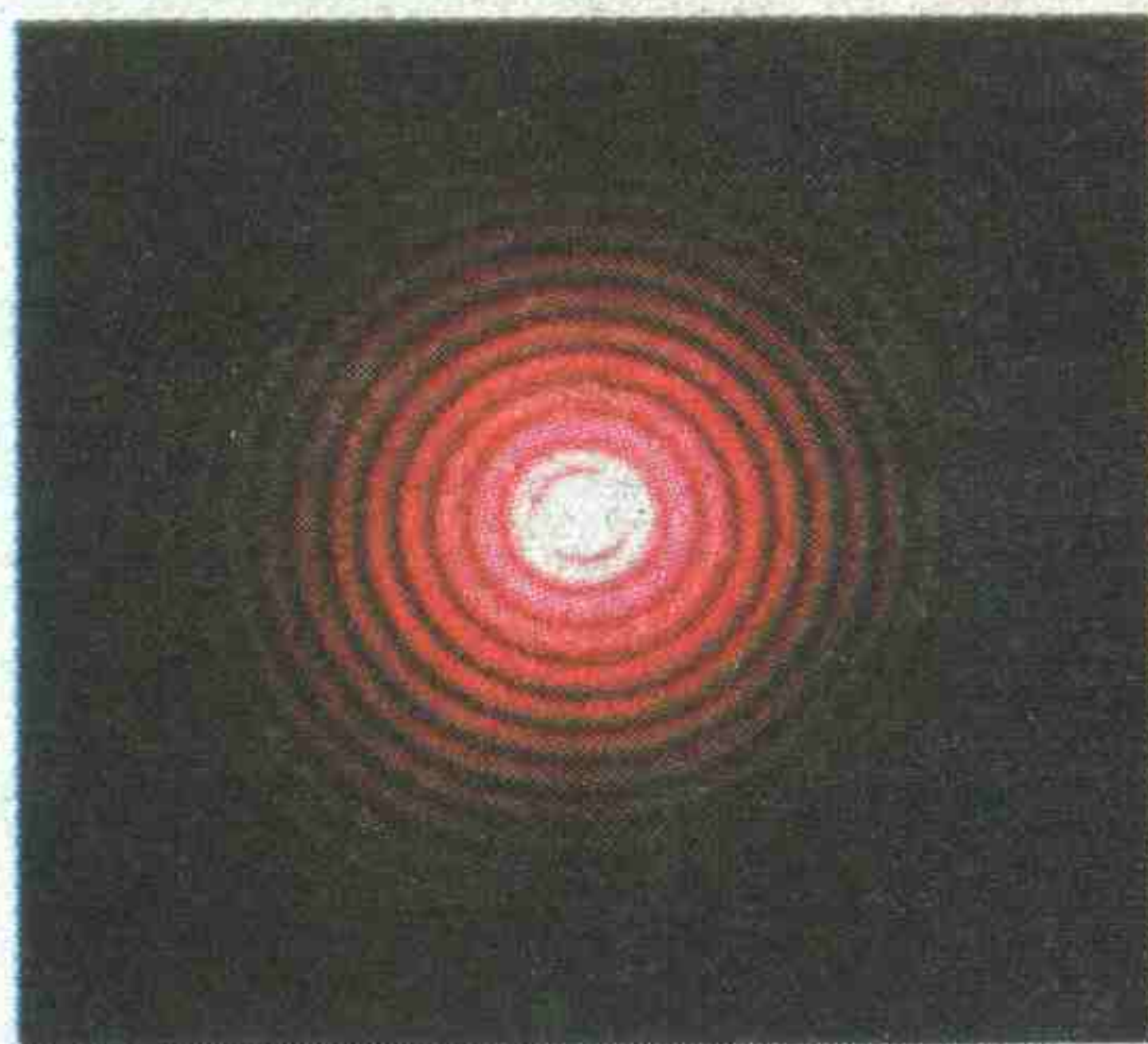


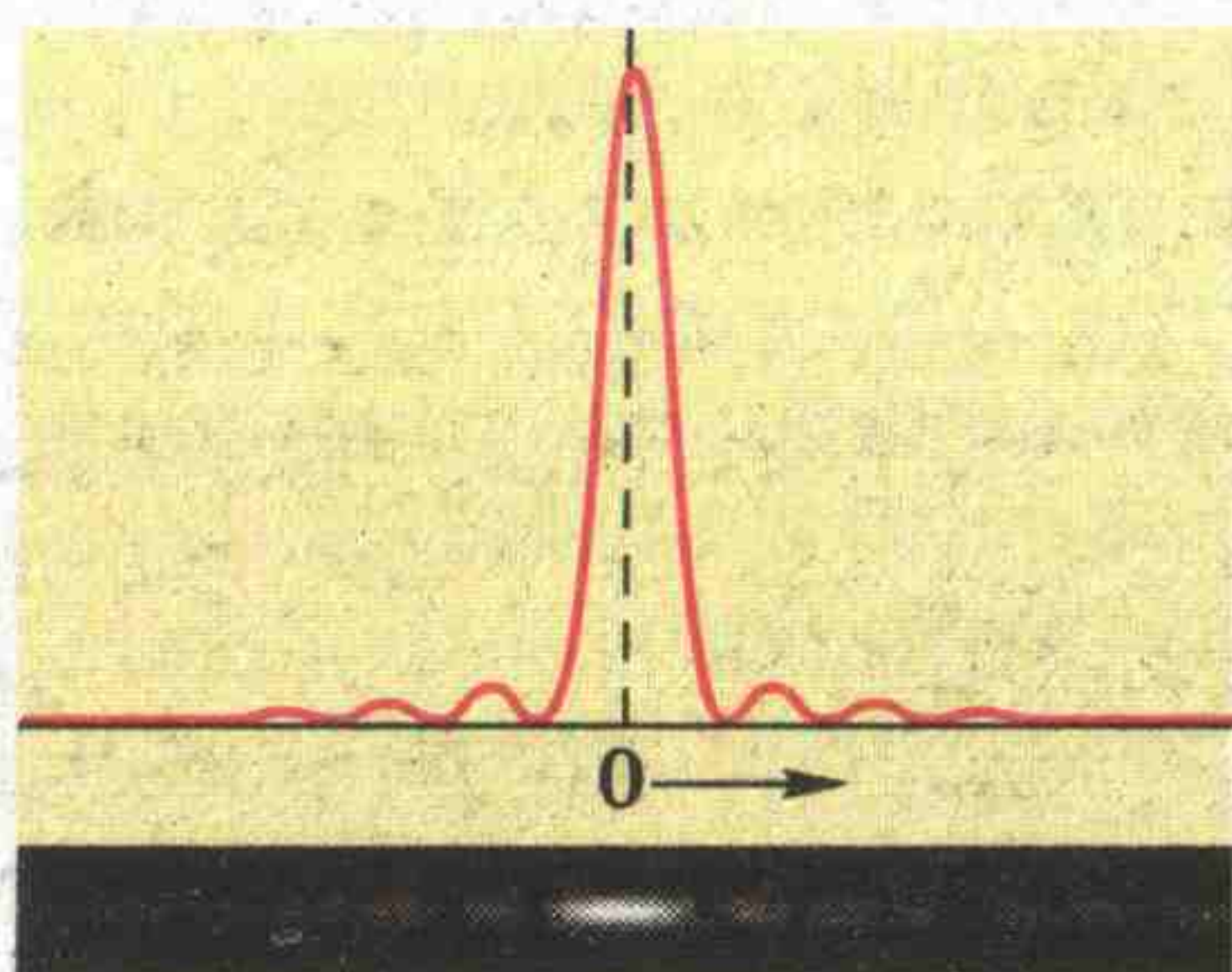
Рис. 4.20. Дифракция света ( $\lambda = 650$  нм) от отверстия диаметра 0,2 мм



совсем иная картина: свет будет проникать в область тени, нарушая тем самым основы геометрической оптики. Т. е. там, где должна быть темная тень, будут появляться светлые полосы, а в центре светлого пятна может появиться темная область (рис. 4.20).

Явление попадания света в область геометрической тени, словно свет огибает преграду, называется *дифракцией*.

Впервые дифракцию света наблюдал Т. Юнг. Объяснил же данное явление на основе волновой теории света Ж.О. Френель.



182

Рис. 4.21. Объяснение дифракции света на основе принципа Гюйгенса-Френеля

Пусть на щель падает сферическая волна, исходящая от точечного источника света. Согласно принципу Гюйгенса-Френеля ее края станут источниками новых волн, которые могут попасть и в область геометрической тени (рис. 4.21). Данные волны когерентны, поэтому вследствие наложения образуют интерференционную картину с максимумами и минимумами освещенности. Ее называют дифракционной картиной, поскольку она отображает явление дифракции света.

Явление дифракции присуще всем волновым процессам, поэтому оно происходит во всем диапазоне длин волн электромагнитного излучения. Кроме того, дифракция наблюдается у электронов при их рассеивании во время прохождения сквозь кристаллические тела. Этим фактически подтверждается, что микрочастицы обладают также волновыми свойствами, т. е. им также присущ корпускулярно-волновой дуализм. Для микрочастиц он проявляется в существовании так называемых волн де Бройля (см. § 61).

## Лабораторная работа № 6

### Наблюдение дифракции света

**Цель.** Визуальное наблюдение явления дифракции от узкой щели, маленького отверстия или дифракционной решетки.

**Оборудование.** Темная (черная) бумага, тонкое лезвие, игла, птичье перо, дифракционная решетка, источник света.

### Теоретические сведения

Дифракционную картину можно наблюдать от тонкой щели или маленького отверстия, сделанных в темной плотной бумаге при помощи лезвия или иглы, а также при помощи устройства, называемого дифракционной решеткой. Дифракционная



решетка — это последовательность щелей одинаковой ширины, расположенных на равных расстояниях одна от другой. Их число, приходящееся на 1 мм, называется периодом решетки. Если сквозь такую решетку посмотреть на точечный источник света, то его изображение разделится на несколько светящихся точек, определяемых как максимумы дифракционной картины:  $dsin\alpha = k\lambda$ , где  $d$  — период решетки;  $\alpha$  — угол, под которым наблюдается максимум;  $k$  — его порядковый номер;  $\lambda$  — длина волны падающего света.

### Выполнение работы

1. При помощи тонкого лезвия или иглы сделать в темной бумаге щель или отверстие.
2. Посмотреть сквозь него или птичье перо на точечный источник света.
3. Изобразить полученную картину в тетради.
4. При наличии дифракционной решетки посмотреть сквозь нее на точечный источник света.
5. Изобразить полученную дифракционную картину, обратив внимание на ее спектр цветов.
6. Сделать выводы.

183

1. В чем состоит сущность явления дифракции? Какое из положений геометрической оптики оно нарушает?
2. При каких условиях наблюдается дифракция?
3. Почему дифракцию иногда считают частным случаем интерференции?
4. В чем состоят конструктивные особенности дифракционной решетки?

### Упражнение 28

1. В одну и ту же точку экрана падают два когерентных пучка белого света, имея разность хода 3 мкм. Какие волны видимого света в данной точке будут максимально усиливаться, а какие максимально ослабляться?

2. От двух когерентных источников света длиной волны 480 нм, расстояние между которыми 120 мкм, на экран попадают световые пучки, образуя интерференционную картину. Определить расстояние между двумя находящимися рядом темными полосами на экране, если расстояние от источника света до экрана 3,6 м.

3. Две узкие щели, расстояние между которыми 0,32 мм, освещены белым светом. Экран, на котором отображена интерференционная картина, расположен на расстоянии 3,2 м от них. Определить расстояние между красной (760 нм) и фи-



олетовой (400 нм) линиями второго порядка интерференционной картины.

4. Сквозь дифракционную решетку проходит свет, длина волны которого 480 нм. Максимум первого порядка находится на расстоянии 2,39 см от центральной полосы. Определить период дифракционной решетки, если расстояние от нее до экрана 1,2 м.

## § 59. Дисперсия света. Спектроскоп

Наблюдая в 1672 г. прохождение солнечного света сквозь призму, И. Ньютон обнаружил, что свет разлагается на цвета (рис. 4.22). Данное явление было названо *дисперсией света*. Сущность ее состоит в том, что скорость распространения световых волн различной частоты в прозрачной оптической

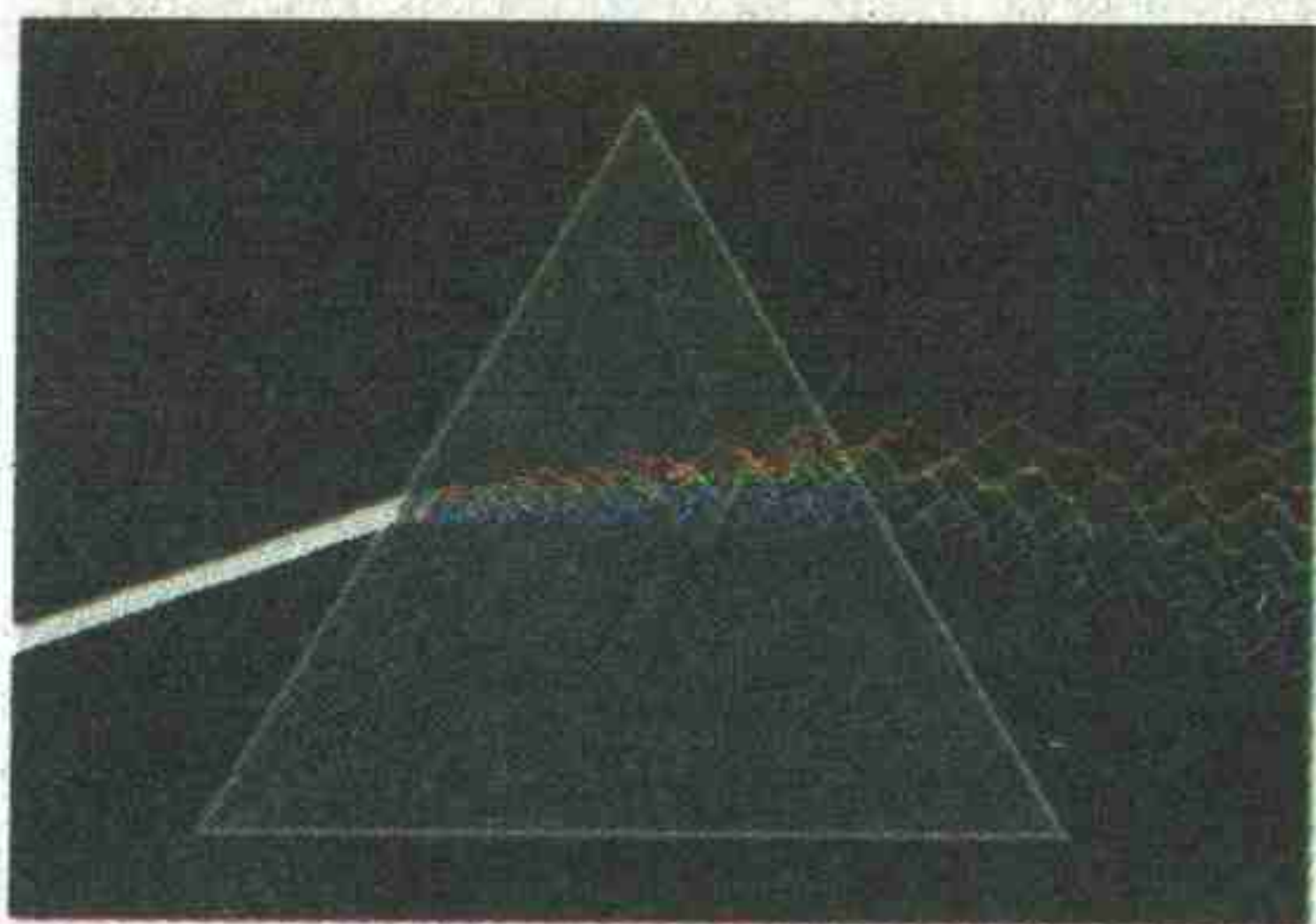


Рис. 4.22. Дисперсия света (опыт И. Ньютона)

среде, за исключением вакуума, неодинакова\*: в оптической среде она тем больше, чем меньше частота световой волны (больше длина волны). т. е. в одной и той же среде у красного света ( $\lambda = 620 \div 760$  нм) скорость выше, нежели у фиолетового ( $\lambda = 380 \div 450$  нм).

Соответственно, учитывая формулу показателя преломления среды  $n = \frac{c}{v}$ , можно сделать вывод, что его

значение зависит от скорости света в данной среде, следовательно, от длины световой волны: как правило, он больше у света с меньшей длиной волны. Таким образом, *дисперсия — это фактически зависимость абсолютного показателя преломления оптической среды от длины волны света:  $n = f(\lambda)$* . Поэтому при прохождении солнечного света сквозь призму мы наблюдаем спектр, в котором лучи фиолетового цвета, имеющие наименьшую скорость, отклоняются больше всех, а красного цвета — меньше. В лабораторных условиях это можно наблюдать, если сквозь призму поочередно пропускать лучи, например, красного и фиолетового цветов.

Графическая зависимость показателя преломления от длины волны для некоторых веществ приведена на рисунке 4.23. Как видно из графика, она имеет нелинейный характер.

\* Скорость света в вакууме одинакова во всех системах отсчета и не зависит от длины световой волны.



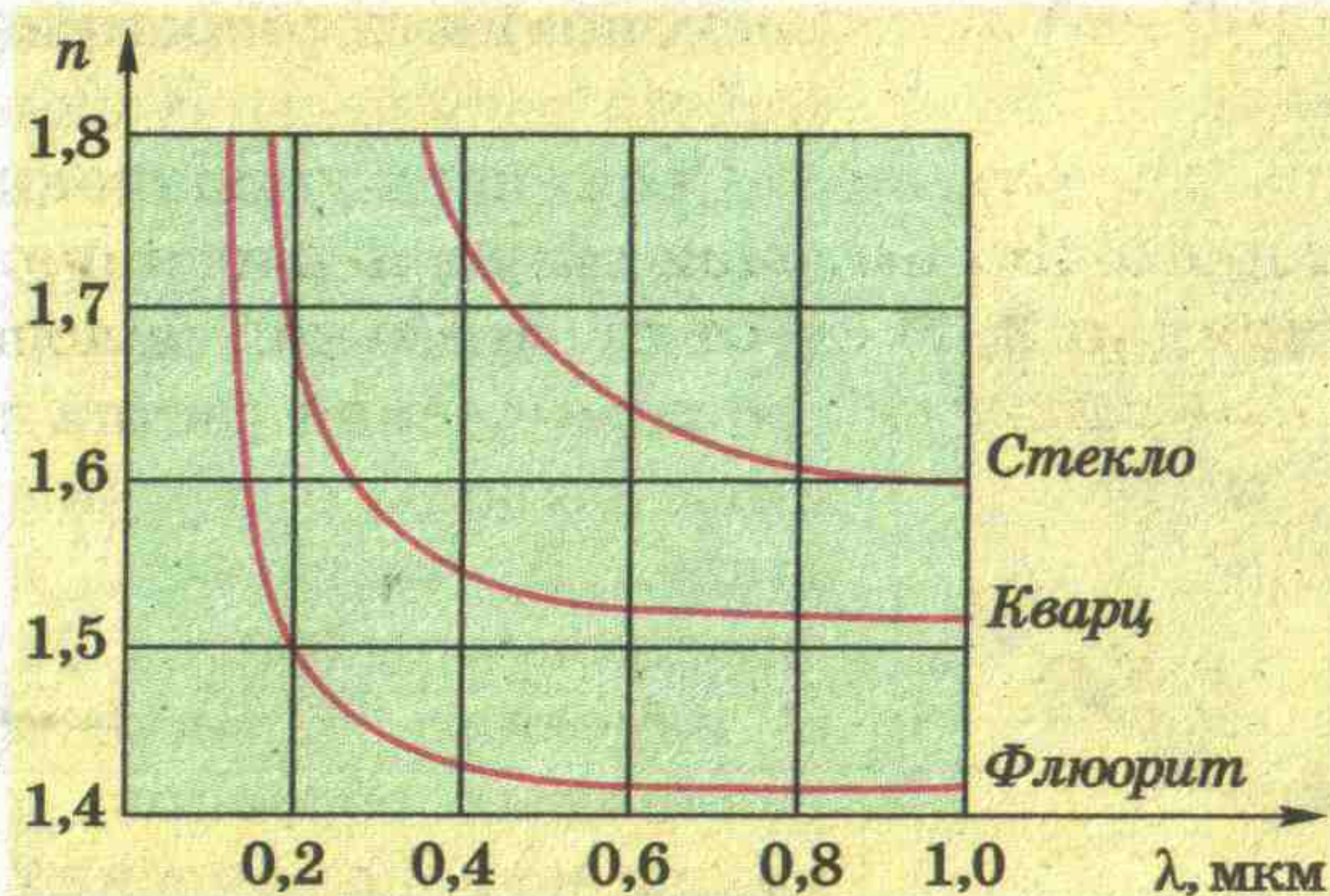


Рис. 4.23. Зависимость показателя преломления вещества от длины волны

Например, у одного из видов стекла показатель преломления для лучей фиолетового цвета равен 1,532, для зеленого — 1,519, а для красного — 1,513. Следовательно, при прохождении сквозь призму солнечного света, в составе которого лучи разной длины волны, из-за дисперсии они преломляются по-разному, образуя разноцветный непрерывный спектр. В таком спектре присутствуют все цвета от красного до фиолетового, плавно переходя от одного к другому. В природе его можно наблюдать в виде радуги.

Установлено, что в зависимости от состава спектра можно судить о свойствах вещества и на этом основании различать их, поскольку каждое вещество имеет особый, присущий лишь ему спектр. С целью исследования свойств веществ применяют спектроскопы и спектрометры, при помощи которых изучают спектры различных веществ. Основной деталью такого оптического прибора является дисперсионная призма (рис. 4.24), разлагающая узкий пучок света от исследуемого образца в спектр. Его фиксируют визуально либо на фотопленку (у спект-

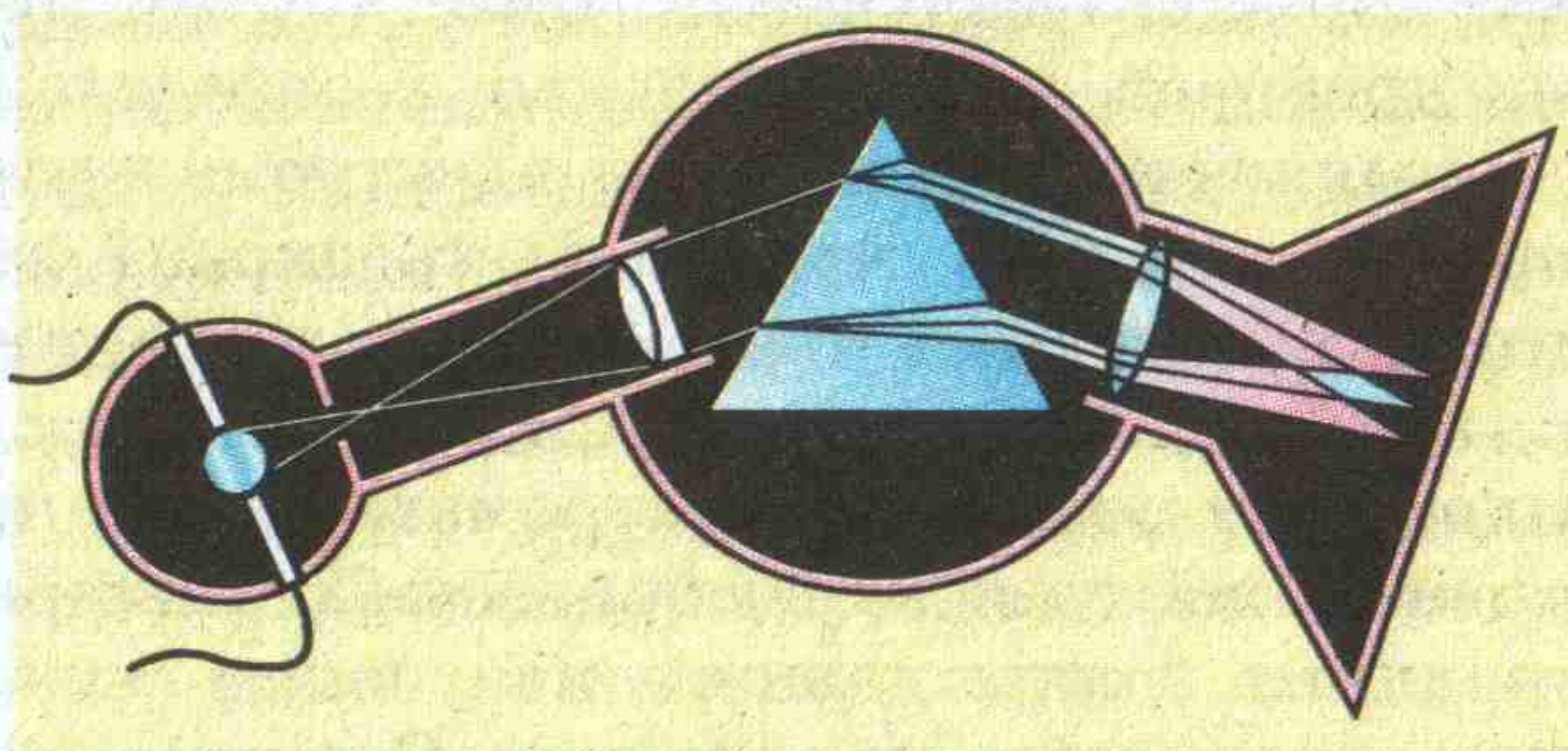


Рис. 4.24. Устройство спектроскопа





Рис. 4.25. Современный спектрометр

роскопов) или современными детекторами излучения (у спектрометров).

Сравнивая полученный спектр исследуемого тела со спектрами других веществ, можно выяснить его химический состав либо сделать иные выводы о его химическом составе. В частности, современные спектрометры (рис. 4.25) применяют в изучении химического состава различных образцов, для исследования астрономических объектов, в экологических экспертизах с целью выявления загрязнения пищевых

продуктов и грунтов, во время контроля качества сырья в металлургии и на химическом производстве, для анализа художественных произведений на их соответствие оригиналу и т. д.

186

1. Почему естественный солнечный свет разлагается в спектр? Как называется данное явление?
2. Каким образом показатель преломления среды зависит от длины волны света?
3. Принцип действия каких оптических приборов основывается на явлении дисперсии? Что является их основным конструктивным элементом?
4. Где применяют спектроскопы и спектрометры?

## § 60. Инфракрасное и ультрафиолетовое излучения



Спектр видимого света с одной стороны ограничен фиолетовым светом, а с другой – красным. За их пределами глаз не видит никакого излучения. Вместе с тем при помощи специальных приборов, чувствительных к определенному диапазону волн, выявлены другие виды электромагнитного излучения. К примеру, если в темную часть экрана за красным участком спектра поместить термодатчик, то он зафиксирует нагревание. Это свидетельствует о том, что на данном участке спектра существует энергия электромагнитного излучения, которое человеческий глаз не воспринимает. Измерения показывают, что длина волны данного излучения больше длины волны красного света видимого спектра. Поэтому оно получило название инфракрасного. Диапазон инфракрасных волн довольно широкий: от 760 нм до 0,1 мм.



**Пределы диапазона инфракрасных волн от 760 нм до 0,1 мм.**



Открыл инфракрасное излучение известный английский астроном и оптик В. Гершель в 1800 г.

Инфракрасные волны излучают все тела, независимо от их температуры. При этом следует учитывать, что длина волны, на которую приходится максимальная энергия излучения, уменьшается с повышением температуры тела. Данный вид излучения часто называют тепловым, поскольку благодаря инфракрасному излучению осуществляется один из видов теплообмена. Например, таким образом передается на Землю тепловая составляющая солнечной энергии.

Распространением инфракрасных лучей, как и любым другим излучением, можно управлять, используя их взаимодействие с веществом. С этой целью отбирают такие материалы, которые слабо поглощают инфракрасные лучи. К ним относятся кухонная соль и эбонит. Например, в технической сфере применяют различные устройства, действие которых основывается на использовании энергии инфракрасного излучения. Это различные сушилки, применяемые во время покраски автомобилей, обезвоживание влажной древесины и т. п.

Инфракрасное излучение незначительно поглощается воздухом, при этом хорошо отражается от поверхности твердых тел. Это его свойство положено в основу систем так называемого ночного видения, широко применяемых в военном деле и научных исследованиях. В таких системах приемник фиксирует волны, которые излучает каждое тело в инфракрасном диапазоне, либо отраженное от предметов излучение, испускаемое «инфракрасными» прожекторами. Сложные электронные системы преобразуют полученную информацию в видимое глазом изображение на мониторе.

С противоположного края видимого света, прилегающего к диапазону фиолетовых волн, находится так называемое ультрафиолетовое излучение, также имеющее особые свойства.

Например, многие вещества излучают видимый свет, когда на них попадает ультрафиолетовое излучение. Данное свойство положено в основу методов выявления ультрафиолетового излучения, а также неразрушающего анализа различных веществ. В частности, по цвету свечения продуктов питания, на которые направлено ультрафиолетовое излучение, можно определить их пищевое качество; по цветовой гамме свечения некоторых минералов геологи выясняют их химический состав. Известен также метод обнаружения фальшивых денежных банкнот, применяемый в банковских учреждениях и магазинах.




Ультрафиолетовое излучение обладает сильным бактерицидным действием. Под его воздействием гибнет большинство болезнетворных бактерий. Поэтому во всех операционных комнатах больниц имеются специальные ультрафиолетовые лампы, применяемые для дезинфекции помещений. Таким же образом ультрафиолетовое излучение используют для стерилизации различных медицинских материалов и инструментов, дезинфекции питьевой воды.

Под действием ультрафиолетового излучения в человеческом организме вырабатываются вещества (например, витамин D), благоприятствующие укреплению здоровья человека. Поэтому малые дозы такого излучения используют для оздоровления людей в медицинских учреждениях и санаториях, в частности во время процедур загораения под солнечными лучами, которые содержат значительную долю ультрафиолетового излучения.

В то же время ультрафиолетовое излучение (особенно в коротковолновом диапазоне) может навредить здоровью человека. Оно способно оказать отрицательное влияние на сетчатку при прямом попадании в глаз, вызвать ожоги кожи, привести к необратимым процессам в организме.

Различные вещества по-разному взаимодействуют с ультрафиолетовым излучением, пропуская или поглощая его. Например, обычное оконное стекло поглощает почти все волны ультрафиолетового диапазона, а кварцевое стекло пропускает их практически без изменений.

Ультрафиолетовое излучение можно получить при помощи искусственных источников — так называемых ламп черного света, специальных лазерных установок.

- 
1. Каковы основные свойства инфракрасных лучей?
  2. Что является источником инфракрасного излучения?
  3. Какое практическое применение получило инфракрасное излучение?
  4. Какой вид электромагнитного излучения называют ультрафиолетовым?
  5. Каковы основные свойства ультрафиолетового излучения?
  6. Где применяют ультрафиолетовое излучение?

## § 61. Квантовые свойства света. Фотон

В разные времена, объясняя природу света, ученые придерживались различных точек зрения. Одни считали свет электромагнитной волной и обосновано доказывали данное



утверждение, ссылаясь на явления интерференции, дифракции и поляризации света. Другие, приверженцы корпускулярной теории, представляли свет как поток частиц и также имели весомые аргументы в подтверждение этого. Например, на основании корпускулярных представлений И. Ньютон объяснил прямолинейное распространение света и дисперсию.

Вместе с тем в конце XIX в. благодаря исследованиям Т. Юнга и О.Ж. Френеля, а также обоснованию природы света с позиций электромагнитной теории Дж. Максвелла в физике сложилось убеждение, что волновая теория способна объяснить любое световое явление. Поэтому когда А. Эйнштейн перенес идею квантования энергии, предложенную М. Планком для теплового излучения, на световые явления, это было воспринято учеными неоднозначно.

**Гипотеза М. Планка гласит: тепловое излучение происходит определенными минимальными порциями энергии – квантами, которые пропорциональны частоте излучения  $\nu$ . Квант энергии  $\epsilon = h\nu$ , где  $h$  – постоянная Планка.**



189

В те времена ограничения волновой теории света подтверждали опыты Г. Герца и результаты изучения явления фотоэффекта А.Г. Столетовым. Позже, в 1922 г., квантовая природа светового излучения была экспериментально доказана А. Комптоном при исследовании рассеивания рентгеновских лучей в веществе.

Таким образом, многочисленные исследования световых явлений указывают на неоднозначное проявление свойств света: в одних случаях они свидетельствуют в пользу волновой природы света, в других – отчетливо проявляются его корпускулярная природа. Следовательно, свет обладает корпускулярно-волновым дуализмом – он имеет как непрерывные, волновые свойства, так и дискретные, корпускулярные.

**Гипотезу о двойственной природе света – корпускулярно-волновом дуализме – впервые предложил А. Эйнштейн.**



В целом же корпускулярно-волновой дуализм присущ не только свету, а всем микрочастицам. К примеру, поток электронов, направленный на кристаллическое тело, образует дифракционную картину, объяснить которую можно лишь на основе волновых представлений. Т. е. электроны, являясь элементарными частицами, корпускулами, при определенных условиях проявляют волновые свойства. Такие представления о материи лежат в основе квантовой теории. Она, в частности, предполагает, что каждой движущейся микрочастице соответ-



ствуется волна де Бройля  $\lambda = \frac{h}{p}$ , где  $p$  – импульс тела,  $h$  – постоянная Планка.



Длина волны де Бройля у электрона, движущегося со скоростью 500 м/с, равна

$$\lambda = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 1,5 \text{ мкм.}$$

Корпускулярную природу света в современной физике отображает понятие светового кванта, смысл которого определил А. Эйнштейн, распространив гипотезу Планка на световое излучение. Согласно его толкованию световой квант – это минимальная порция световой энергии, локализованная в частице, называемой **фотоном**. Следовательно, свет с точки зрения квантовой теории – это поток фотонов, движущихся со скоростью света ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с).



**Фотон** – это элементарная частица, характеризующая квант света  $h\nu$ .

Фотону как кванту излучения, согласно гипотезе Планка, соответствует энергия  $\varepsilon = h\nu$ . Как элементарная частица он имеет импульс  $p = mc$ . Учитывая формулу взаимосвязи массы и энергии  $\varepsilon = mc^2$ , его импульс равен:

$$p = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda},$$

где  $\lambda$  – длина световой волны.

Данная формула отображает наличие у света одновременно и волновых, и корпускулярных свойств. Ведь импульс фотона как кинематический параметр микрочастицы определен через частоту или длину волны, т. е. величины, которые характеризуют излучение.

Фотон – это особая элементарная частица. Он не имеет массы покоя ( $m_0 = 0$ ), т. е. его нельзя остановить. Действительно, если бы была такая система отсчета, в которой он был бы неподвижен, то в ней тогда теряет смысл понятие света, ведь не происходит его распространение.

Масса фотона зависит от частоты (длины волны) электромагнитного излучения, ведь  $m = \frac{h\nu}{c^2}$ . Например, для видимого

света длиной волны (например,  $\lambda_{\text{с}} = 6 \cdot 10^{-7}$  м) его масса равна  $3,7 \cdot 10^{-36}$  кг, а для рентгеновского излучения с длиной волны, например  $\lambda_{\text{р}} = 10^{-9}$  м, масса фотона равна  $2,2 \cdot 10^{-33}$  кг.



**Масса фотона рентгеновского излучения меньше массы электрона ( $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг) почти в 500 раз.**

Квантовые представления о природе света позволяют объяснить ряд явлений, для которых волновая теория оказывается беспомощной. В частности, это касается фотоэффекта, люминесценции, фотохимических реакций, рассеивания рентгеновского излучения в веществе и др. Поскольку квантовая теория рассматривает свет как поток фотонов, то согласно законам механики во время столкновения они должны передавать импульс тому телу, с которым взаимодействуют. Значит, свет должен оказывать давление на поверхность, куда он падает. Данный вывод экспериментально подтвердил в 1899 г. русский ученый П.М. Лебедев.

1. Какие два учения о природе света существуют в физике? Какие световые явления подтверждают каждое из них?
2. В чем состоит сущность гипотезы Планка?
3. В чем проявляется корпускулярно-волновой дуализм для света и микрочастиц?
4. В чем состоит сущность квантования электромагнитного излучения?
5. Дайте характеристику фотону как элементарной частице.

191

## § 62. Фотоэффект. Уравнение фотоэффекта

В 1887 г. Г. Герц наблюдал явление, давшее со временем толчок развитию квантовых представлений о природе света. При облучении отрицательно заряженных тел ультрафиолетовыми лучами они быстрее теряли свой электрический заряд, чем когда такого облучения не было. Как оказалось, это было проявлением явления, названного впоследствии фотоэффектом. **Фотоэффект** – это явление выхода электронов из тела под действием электромагнитного излучения. В физике различают два вида фотоэффекта – внутренний и внешний. В случае вылета электронов из тела в вакуум или иную какую-либо среду фотоэффект называют внешним, или *фотоэлектронной эмиссией*.

Если рассмотреть внешний фотоэффект с точки зрения происходящих во время него процессов, то данное явление можно представить как результат трех последовательных процессов: поглощение фотона, вследствие чего энергия одного из электронов возрастает; движение данного электрона к поверхности



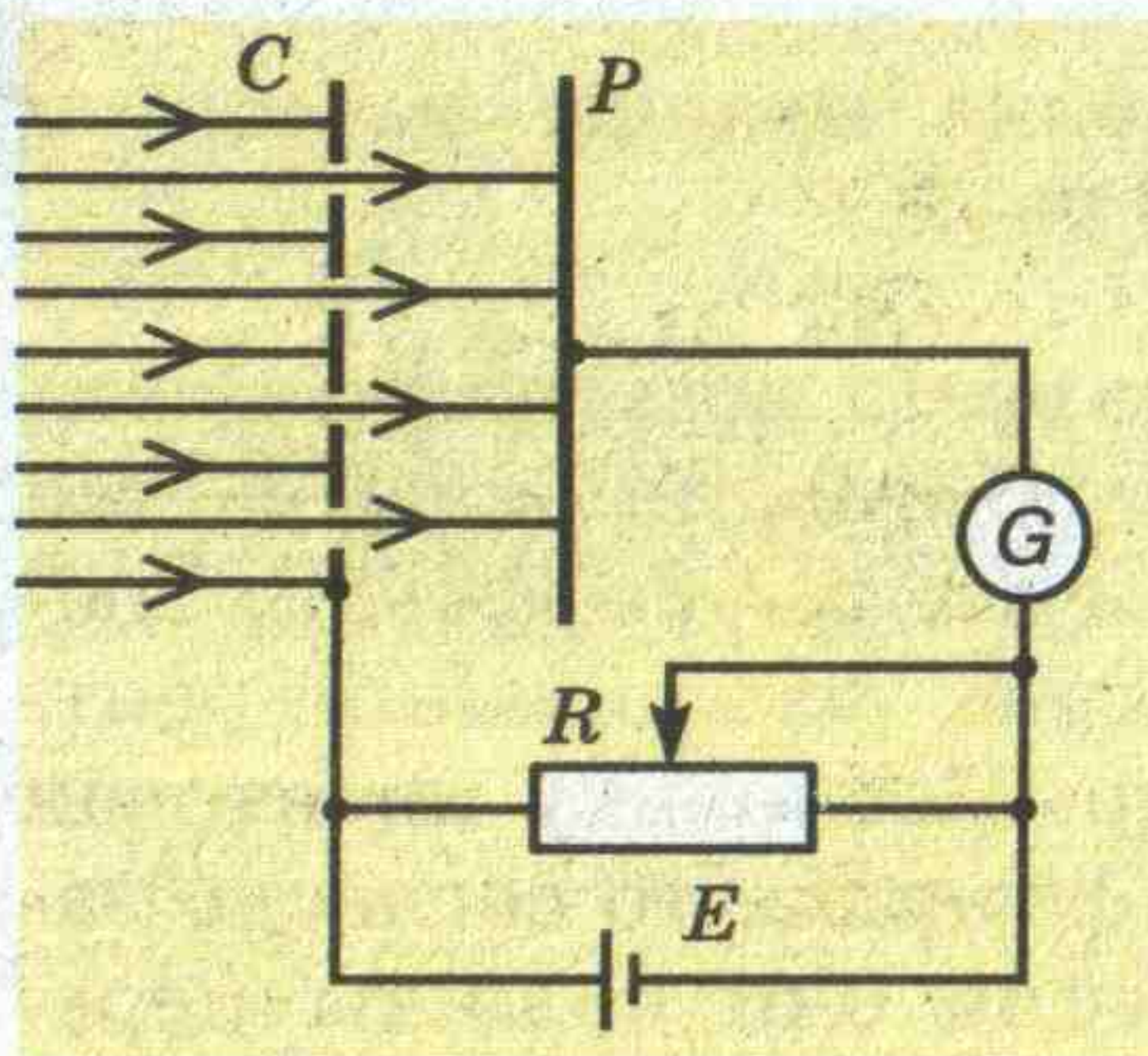


Рис. 4.26. Схема опыта  
А.Г. Столетова

тела; выход его за пределы тела в другую среду.

В 1888–1889 гг. явление фотоэффекта детально изучал русский ученый А.Г. Столетов (1839–1896). В своих опытах он использовал конденсатор, одна из пластин которого была в виде сетки С. Конденсатор был включен в электрическую цепь последовательно с гальванометром (рис. 4.26). Когда на отрицательно заряженную цинковую пластину Р сквозь сетку попадали ультрафиолетовые лучи, в цепи возникал ток,

который регистрировал гальванометр. При помощи потенциометра  $R$  можно было изменять напряжение на конденсаторе. Когда меняли полярность источника тока  $E$  (пластину  $P$  присоединяли к положительному полюсу), то ток в цепи отсутствовал.

192



**Фотоэлектроны** – это электроны, выбитые в результате фотоэффекта с поверхности тела под действием электромагнитного излучения.

Исследуя при помощи данной установки зависимость силы тока от частоты света, его интенсивности и других характеристик излучения, А.Г. Столетов открыл закономерности протекания данного явления, названные впоследствии законами фотоэффекта:

1) количество электронов, вылетающих с поверхности тела под действием электромагнитного излучения, пропорционально его интенсивности;

2) для каждого вещества, в зависимости от его температуры и состояния поверхности, существует минимальная частота света  $\nu_0$ , при которой происходит внешний фотоэффект;

3) максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов зависит от частоты света, которым облучают пластины, и не зависит от его интенсивности.

Минимальная частота  $\nu_0$  (или максимальная длина волны  $\lambda_0$ ) излучения, которая еще вызывает внешний фотоэффект, называется *красной границей фотоэффекта*.

При попытке объяснить законы фотоэффекта с позиций волновой теории ученые столкнулись с некоторыми трудностями, возникшими из-за противоречия между ее положениями и



полученными экспериментальными результатами. Это заставило их иначе истолковать механизм поглощения светового излучения.

**Границу фотоэффекта называют «красной» потому, что при смещении длины волны в сторону красного света ( $\lambda > \lambda_0$ ) фотоэффект прекращается.**

С этой целью А. Эйнштейн прибег к квантовым представлениям о природе света, согласно которым он объяснил поглощение света как явление передачи телу всей энергии фотона. Как известно, для того чтобы электрон покинул твердое тело или жидкость, ему необходимо преодолеть энергию взаимодействия с атомами и молекулами, которые удерживают его внутри тела, т. е. необходимо выполнить работу выхода  $A_0$ . Ее физический смысл состоит в том, что это минимальная энергия, необходимая для выхода электрона из тела в вакуум или иную среду.

Таким образом, можно сделать вывод, что **фотоэффект может состояться лишь при условии, что фотон будет обладать энергией большей или равной работе выхода ( $h\nu \geq A_0$ )**. Если же данное условие не выполняется, т. е.  $h\nu < A_0$ , то фотоэффект невозможен.

**Работа выхода, кроме химической природы вещества, из которого состоит тело, зависит также от состояния его поверхности.**

Если энергия фотона, переданная электрону вследствие поглощения, больше работы выхода, то электрон дополнительно приобретает еще и кинетическую энергию. Следовательно, согласно закону сохранения энергии:

$$h\nu = A_0 + \frac{mv^2}{2}.$$

Данное выражение называется **уравнением Эйнштейна для фотоэффекта**.

**За теоретическое обоснование законов фотоэффекта А. Эйнштейн в 1922 г. получил Нобелевскую премию.**

На основе данного уравнения можно объяснить все три закона фотоэффекта. Действительно, интенсивность монохроматического излучения пропорциональна числу фотонов, падающих на поверхность за 1 с:  $I \sim N_\phi$ . В свою очередь, от количества фотонов зависит количество выбитых из поверхности тела электронов  $N_e$ . Следовательно,  $N_e \sim I$ .



При предельных условиях красной границы фотоэффекта  $\nu_0$  кинетическая энергия электрона равна нулю. Поэтому красная граница фотоэффекта определяется лишь работой выхода и зависит от химической природы вещества, наличия в нем примесей и состояния поверхности тела:

$$h\nu_0 = A_0, \nu_0 = \frac{A_0}{h}, \text{ или } \lambda_0 = \frac{hc}{A_0}.$$

Таким образом, обоснование явления фотоэффекта на основе квантовых представлений о природе света стало убедительным доказательством корпускулярных свойств электромагнитного излучения, и положило начало развитию квантовой физики.

1. В чем состоит сущность явления фотоэффекта?
2. Какие физические процессы отображают явление фотоэффекта? На какое другое явление оно похоже?
3. Почему в опыте А.Г. Столетова явление фотоэффекта можно наблюдать только при определенном подключении источника тока?
4. Объясните сущность каждого из законов фотоэффекта.
5. При каких условиях происходит фотоэффект?
6. Почему красная граница фотоэффекта зависит от химической природы тела? Что еще влияет на ее значение?

## § 63. Применение фотоэффекта. Примеры решения задач

Различные проявления явления фотоэффекта нашли широкое практическое применение в науке и технике. В частности, у полупроводников выявлен также внутренний фотоэффект, который проявляется в возрастании их электропроводности (так называемая фотопроводимость) и возникновении ЭДС во время их облучения (так называемая фотоЭДС).

Фотопроводимость обусловлена главным образом повышением концентрации подвижных носителей заряда (электронов и дырок) в полупроводниках под действием электромагнитного излучения. Поглощенный фотон отдает всю свою энергию электронам полупроводника, которые в результате этого могут стать свободными, увеличивая тем самым количество электронов проводимости и дырок (это так называемая собственная фотопроводимость). В данном случае фотопроводимость полупроводников возрастает пропорционально интенсивности облучения – чем она больше, тем больше электрический ток в цепи. Она также зависит от частоты излучения, однако характер такой связи сложнее.



Фотопроводимость полупроводников используется в фоторезисторах и фотодиодах. Фоторезистор – это полупроводниковый прибор (рис. 4.27), сопротивление которого изменяется в зависимости от его освещенности: чем больше сила света, падающего на него, тем меньше его сопротивление. Ведь под действием света в результате фотоэффекта в полупроводнике образуются дополнительные носители электрического заряда – пара «электрон–дырка», которые повышают проводимость материала, следовательно, уменьшают его сопротивление.

В полупроводниковых фотодиодах (рис. 4.28), включенных в цепь в запирающем направлении  $p$ - $n$ -перехода, под действием света возникает односторонняя проводимость. Это объясняется тем, что в результате облучения светом в них возрастает концентрация электронов и дырок. Под действием электрического поля неосновные носители заряда (электроны в полупроводнике  $p$ -типа и дырки в полупроводнике  $n$ -типа) легко преодолевают запирающий слой  $p$ - $n$ -перехода, благодаря чему в цепи возникает ток.

Фоторезисторы и фотодиоды широко применяют в средствах автоматики, где необходимо учесть изменение светового потока, например в охранных системах, пропускных турникетах метрополитена, устройствах воспроизведения звука и др.

Под действием света в полупроводниках может возникать фотоЭДС, создаваемая в результате перераспределения носителей заряда вследствие неравномерного поглощения светового излучения (рис. 4.29). Концентрация носителей заряда возле грани 1, на которую падает свет, намного выше, чем с противоположной, затемненной грани 2. Поэтому электроны и дырки диффундируют от грани 1 к грани 2. Поскольку они обладают неодинаковой подвижностью, в объеме полупроводника происходит перераспределение заряда, в результате которого образуется электрическое поле  $E$ . Данное поле поддерживает разность потенциалов, благодаря которой существует фотоЭДС.

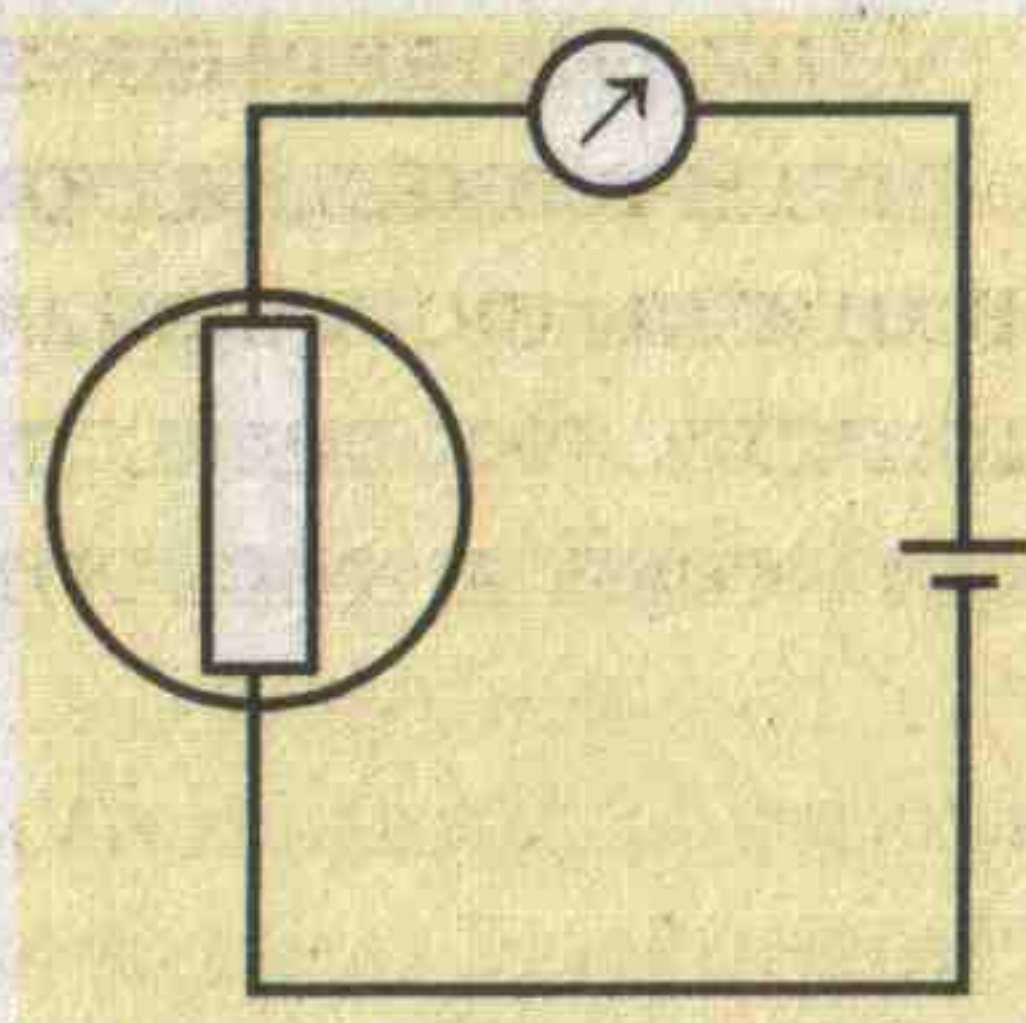


Рис. 4.27.  
Фоторезистор

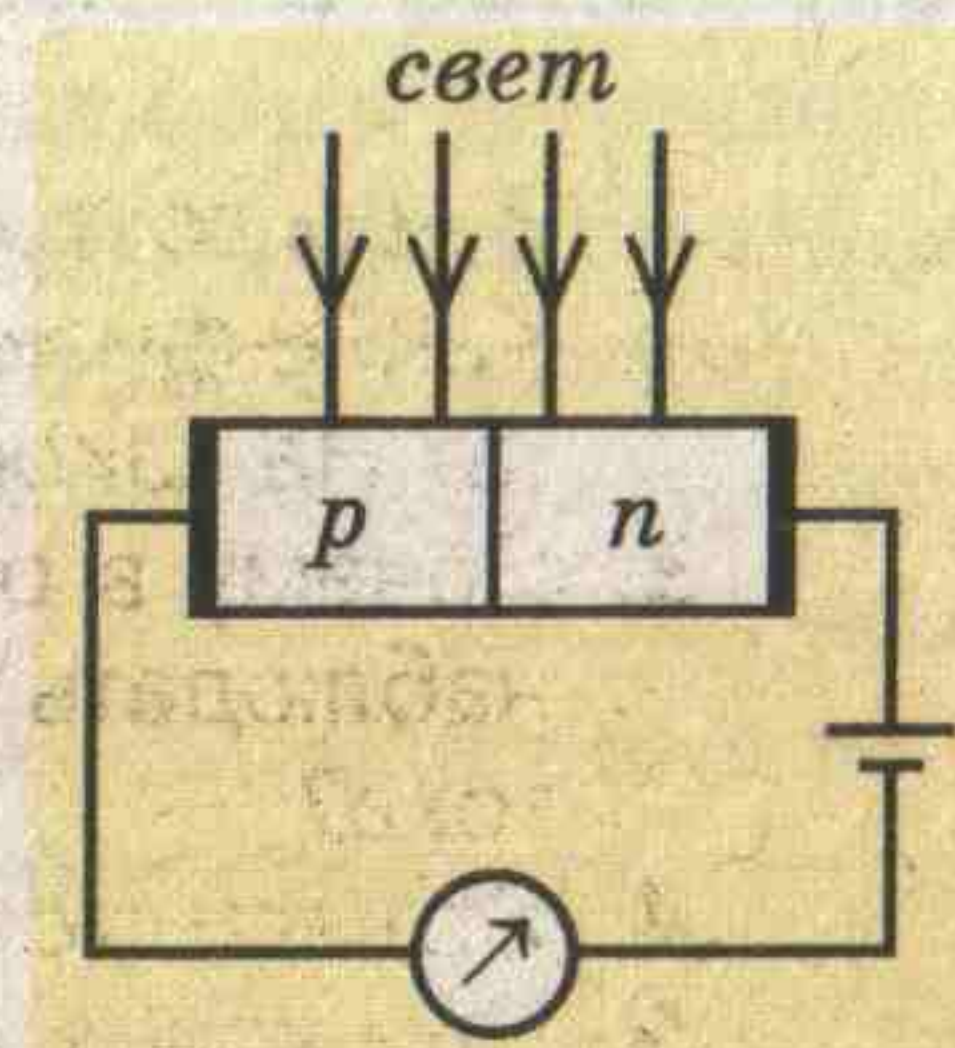


Рис. 4.28.  
Фотодиод

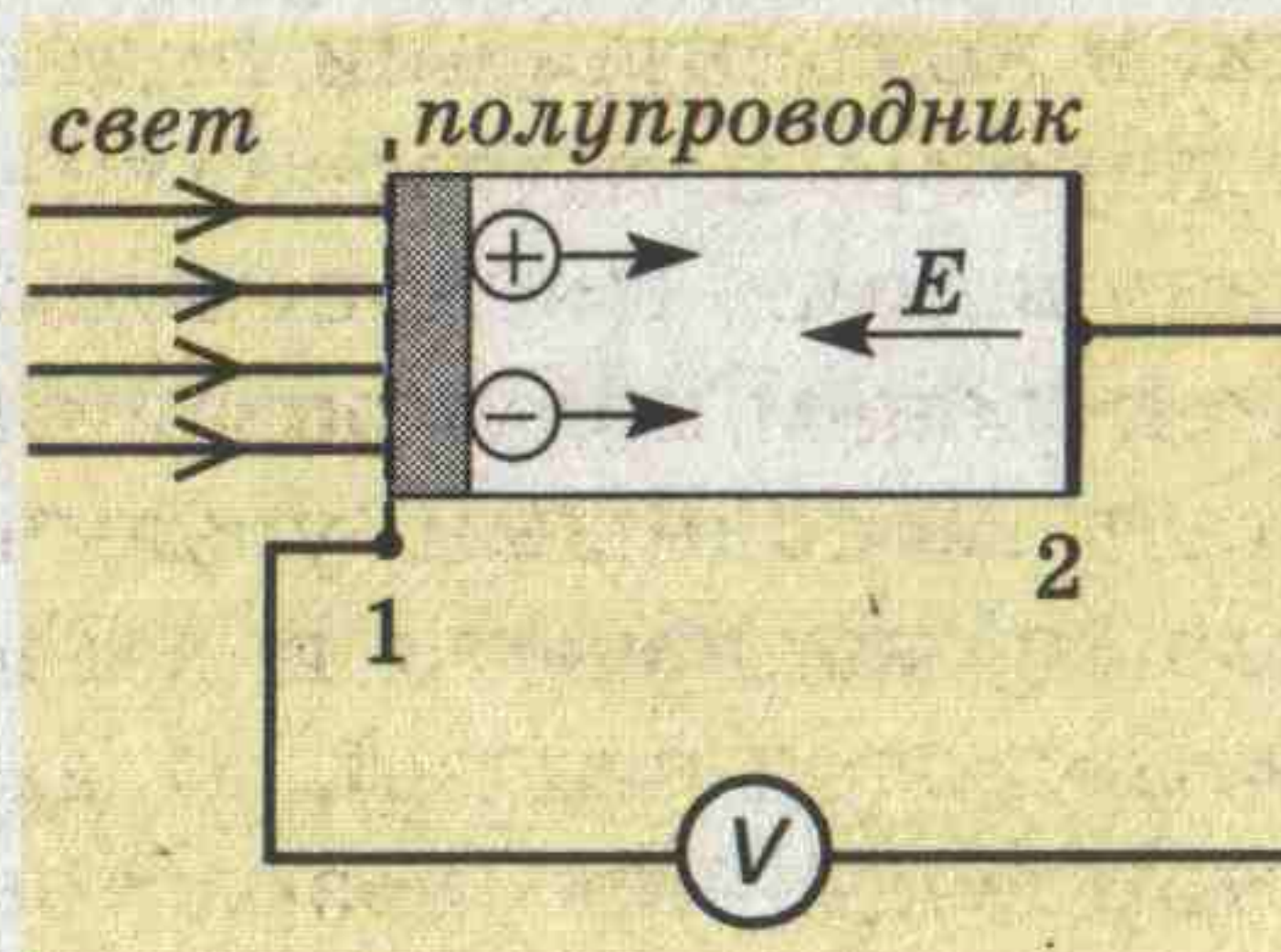


Рис. 4.29. Возникновение  
фотоЭДС



Возникновение фотоЭДС под действием света используется в различных датчиках, предназначенных для измерения мощности излучения, солнечных батареях, применяемых в космической технике, в повседневной жизни как альтернативные источники электрической энергии и т. п.

Под действием электромагнитного излучения могут происходить процессы, вызывающие изменения свойств веществ. Например, множество органических и неорганических соединений при освещении изменяют свой цвет. Данное явление называется **фотохромизмом**. Это объясняется тем, что в результате поглощения кванта света вещество переходит в новое состояние, которое характеризуется уже иным спектром поглощения либо перестройкой валентных связей, влияющих на протекания фотодиссоциации или фотохимической реакции.

Данное свойство реагировать на облучение светом положено в основу изготовления фотохромных материалов, применяемых для регистрации изображений, записи и обработки оптических сигналов. В последнее время широкое распространение получили полимерные материалы и фотохромные светочувствительные пленки, содержащие галогениды Серебра ( $\text{AgBr}$ ,  $\text{AgCl}$ ), щелочно-галогидные соединения ( $\text{KCl}$ ,  $\text{NaF}$ ). В частности, их применяют в элементах оперативной памяти ЭВМ, цветной печати и фотографии, для записи информации на оптических дисках и т. п.

**Задача 1.** Будет ли наблюдаться фотоэффект при облучении цинковой пластины ультрафиолетовым светом длиной волны 200 нм? Какую максимальную скорость могут иметь при этом фотоэлектроны? Работа выхода электрона у Цинка равна  $6,8 \cdot 10^{-19}$  Дж\*.

Д а н о :	Р е ш е н и е
$A_0 = 6,8 \cdot 10^{-19}$ Дж, $\lambda = 200$ нм.	Фотоэффект возможен, если $\frac{hc}{\lambda} \geq A_0$ .
.....	$\frac{hc}{\lambda} = 9,9 \cdot 10^{-19}$ Дж;
$v_{\max} = ?$	$A_0 = 6,8 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Следовательно, фотоэффект состоится.

Из уравнения Эйнштейна:  $\frac{mv_{\max}^2}{2} = \frac{hc}{\lambda} - A_0$ .

Отсюда  $v_{\max} = 0,8 \cdot 10^6$  м/с.

\* Работу выхода чаще измеряют в электрон-вольтах (эВ).  
1 эВ =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж.



**Задача 2.** У какого металла – Цезия или Вольфрама – красная граница фотоэффекта выше? Работа выхода этих металлов равна соответственно 1,8 и 4,54 эВ.

**Дано:**

**Решение**

$$A_0(\text{Cs}) = 1,8 \text{ эВ},$$

$$A_0(\text{W}) = 4,54 \text{ эВ}.$$

По определению красная граница  $\nu_0 = \frac{A_0}{h}$ .

$$\nu_0(\text{Cs}) > \nu_0(\text{W}) - ?$$

$$\nu_0(\text{Cs}) = 0,43 \cdot 10^{15} \text{ Гц};$$

$$\nu_0(\text{W}) = 1,1 \cdot 10^{15} \text{ Гц}.$$

Следовательно,  $\nu_0(\text{Cs}) < \nu_0(\text{W})$ .

Учитывая, что  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ , получим:

$$\lambda_0(\text{Cs}) = 7 \cdot 10^{-7} \text{ м},$$

$$\lambda_0(\text{W}) = 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Т. е. красная граница фотоэффекта у цезия лежит в видимой части спектра света, а у вольфрама она – за его пределами.

197

1. Какие приборы основаны на использовании явления фотоэффекта?
2. Что такое фотопроводимость? От чего она зависит?
3. Где применяют фотодиоды и фоторезисторы?
4. Объясните принцип действия фоторезистора или фотодиода как средств автоматики.
5. В чем проявляется химическое действие света? Чем оно обусловлено?

### Упражнение 31

1. Какую энергию и импульс имеют фотоны видимой части спектра в самых коротких ( $\lambda = 400 \text{ нм}$ ) и самых длинных ( $\lambda = 760 \text{ нм}$ ) световых волнах? Чему равна их масса?
2. Какова длина волны, масса и импульс фотона энергией 1 МэВ?
3. С какой скоростью движется электрон, если его кинетическая энергия равна энергии фотона длиной волны 600 нм?
4. Человеческий глаз наиболее чувствителен к зеленому цвету ( $\lambda = 550 \text{ нм}$ ). Он реагирует на него при мощности светового потока  $2 \cdot 10^{-17} \text{ Вт}$ . Сколько фотонов за 1 с попадает при этом на сетчатку глаза?
5. Какой кинетической энергией и скоростью обладают фотоэлектроны, вылетающие с поверхности оксида Бария ( $A_0 = 1,2 \text{ эВ}$ ), если на нее падает зеленый свет, длина волны которого 550 нм?



6. Работа выхода электрона из Цезия равна 1,9 эВ. Найти красную границу фотоэффекта для Цезия. Какому цвету видимого света она отвечает?

7. Вычислить работу выхода электронов из серебра в джоулях и электрон-вольтах, если его красная граница фотоэффекта равна 260 нм.

8. Произойдет ли фотоэффект, если поверхность ртути облучать светом видимого диапазона излучения? Работа выхода электронов у Ртуту равна 4,53 эВ.

9. Какое запирающее напряжение следует подать, чтобы прекратился электрический ток в цепи, если на вольфрамовый катод падает излучение длиной волны 0,1 мкм?

## Главное в разделе 4

198

1. Свет — это электромагнитное излучение определенного диапазона волн (от 380 нм до 760 нм). Ему присущ корпускулярно-волновой дуализм — он имеет как непрерывные, волновые свойства, так и дискретные, корпускулярные. Т. е. в одних случаях (интерференция, дифракция, поляризация) свет проявляет волновую природу, в других (поглощение, фотоэффект) — проявляется его корпускулярная природа.

2. Распространяясь в оптической среде, свет взаимодействует с ней, в результате чего происходит поглощение, рассеивание или отражение света. Например, с точки зрения квантовых представлений поглощение света — это процесс захвата фотонов атомами вещества, вследствие чего они отдают им всю свою энергию.

3. Во время зеркального отражения света выполняется закон отражения света: *падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с перпендикуляром, поставленным к отражающей поверхности в точке падения луча; перпендикуляр делит угол между падающим и отраженным лучами на две равные части.*

4. При переходе света из одной среды в другую выполняется закон преломления света: *падающий и преломленный лучи лежат в одной плоскости с перпендикуляром, поставленным на границе двух сред в точке падения луча; угол падения  $\alpha$  светового луча на поверхность, разделяющую две среды, связан с углом преломления  $\gamma$  соотношением:*

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \gamma, \text{ или } n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}.$$



5. Преломление света на границе двух сред происходит в линзах, которые изменяют конфигурацию световых пучков и направление распространения световых лучей, в частности собирают их в точку (собирающие линзы) либо делают их расходящимися (рассеивающие линзы).

Для построения изображений при помощи линз учитывают характерные точки (оптический центр линзы, ее фокус) и линии (главная оптическая ось), а также особенности прохождения световых лучей через них. Чтобы найти положение изображения, полученного при помощи линзы, применяют формулу линзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}.$$

6. Волновую природу света характеризуют явления интерференции, дифракции, поляризации и дисперсии. Явление перераспределения интенсивности падающего света, результатом которого является взаимное усиление или ослабление амплитуды двух и более электромагнитных волн от когерентных источников, называется *интерференцией*. Если разность хода световых пучков равна четному числу полуволн, то в данной точке будет наблюдаться максимум освещенности:

$$\Delta l = 2k \frac{\lambda}{2}.$$

Если укладывается нечетное число полуволн, то наблюдается минимум освещенности:

$$\Delta l = (2k + 1) \frac{\lambda}{2},$$

где  $\lambda$  — длина волны;  $k = 1, 2, 3, \dots n$ .

Явление огибания светом препятствий и попадания света в зону геометрической тени называется *дифракцией*.

Впервые данное явление наблюдал Т. Юнг, который объяснил его на основе волновой теории света: дифракционная картина образуется в результате наложения когерентных волн, формируя максимумы и минимумы освещенности в зоне геометрической тени.

Явления интерференции и дифракции наблюдаются от щелей и непрозрачных тел при условии соразмерности их с длиной волны света.

При прохождении света сквозь некоторые вещества наблюдается *поляризация*, т. е. определенная ориентация векторов напряженности электрического поля  $\vec{E}$  или индукции магнитного поля  $\vec{B}$  относительно направления распространения волны.



Во время прохождения света через призму происходит *дисперсия*, т. е. разложение света в спектр. Это явление объясняется тем, что показатель преломления веществ зависит от длины волны света.

7. В основу квантовой физики положена гипотеза М. Планка: *излучение энергии происходит определенными минимальными порциями – квантами, энергия которых пропорциональна частоте излучения  $\nu$ :*

$$\varepsilon = h\nu,$$

где  $h$  – постоянная Планка.

Позже А. Эйнштейн распространил квантовую гипотезу на световые явления, объяснив таким образом явление фотоэффекта. Согласно его толкованию световой квант – это минимальная порция световой энергии, локализованная в частице, называемой фотоном. Следовательно, свет с точки зрения квантовой теории – это поток фотонов, движущихся со скоростью света.

200

Фотон – это элементарная частица, характеризующая квант света  $h\nu$ ; его импульс равен

$$p = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda},$$

а масса зависит от частоты электромагнитного излучения. Фотон не имеет массы покоя.

8. Одним из проявлений корпускулярной природы света является фотоэффект. Исследуя данное явление, А.Г. Столетов открыл **законы фотоэффекта**:

- 1) количество электронов, вылетающих с поверхности тела под действием электромагнитного излучения, пропорционально его интенсивности;
- 2) у каждого вещества, в зависимости от его температуры и состояния поверхности тел, существует минимальная частота света  $\nu_0$ , так называемая красная граница фотоэффекта, при которой еще возможен внешний фотоэффект;
- 3) максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов зависит от частоты падающего на тело излучения и не зависит от его интенсивности.

Явление фотоэффекта нашло широкое практическое применение в технике благодаря использованию фотопроводимости и возникновению фотоЭДС в полупроводниках (фоторезисторы, фотодиоды).



9. Объясняя явление фотоэффекта, А. Эйнштейн нашел выражение, которое называется уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

$$h\nu = A_0 + \frac{mv^2}{2}.$$

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта согласуется с законами фотоэффекта, открытыми раньше А.Г. Столетовым, и объясняет их с позиций квантовых представлений о природе света. В частности, установлено, что красная граница фотоэффекта  $\nu_0$  зависит от химической природы облучаемой поверхности, наличия в веществе примесей и определяется работой выхода электрона  $A_0$ :

$$\nu_0 = \frac{A_0}{h} \text{ или } \lambda_0 = \frac{hc}{A_0},$$

где  $c$  — скорость света в вакууме.



# Раздел 5



Усвоив материал данного раздела, ты будешь **знать**:

- ♦ ядерную модель атома, протонно-нейтронную модель ядра, квантовые постулаты Н. Бора;
- ♦ виды радиоактивного излучения, особенности его влияния на живые организмы, закон радиоактивного распада;
- ♦ физические величины, характеризующие ядерные процессы (дозиметрические величины, энергия связи, дефект масс);
- ♦ устройство и принцип действия квантовых генераторов;
- ♦ физические основы ядерной энергетики;
- ♦ характерные признаки и классификацию элементарных частиц, их кварковую модель.

Ты сможешь **объяснить**:

- ♦ энергетические состояния атома, природу излучения и поглощения света атомами, сущность спектрального анализа;
- ♦ протекание ядерных реакций, цепную реакцию деления ядер урана;
- ♦ атомные и молекулярные спектры, устойчивость ядер, существование изотопов.

Ты будешь **способен**:

- ♦ решать задачи, применяя квантовые постулаты Н. Бора, закон радиоактивного распада, формулы энергии связи и дефекта масс ядра;
- ♦ исследовать треки заряженных частиц, наблюдать спектры веществ;
- ♦ записывать ядерные реакции и определять их энергетическую эффективность.



# АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

203

## § 64. История развития учения о строении атома. Ядерная модель атома

В конце XIX и в начале XX в. в физике было получено несколько весомых опытных фактов, привернувших внимание ученых к микромиру. Это открытие рентгеновского излучения (1895 г., В.К. Рентген, И. Пулюй), радиоактивности (1896 г., А. Беккерель), электрона (1897 г., Дж.Дж. Томсон). Они вызвали сомнения ученых относительно неделимости атома, противоречили сложившимся классическим представлениям о строении вещества, побуждали к углублению понимания явлений, происходящих в микромире. Как следствие, в науке появилась новая область физического знания – *атомная физика*, которая изучает строение и свойства атомов, элементарные процессы на атомном уровне.

Для атомной физики характерны расстояния, соизмеримые с размерами атома ( $\sim 10^{-10}$  м), и энергия порядка  $10^{-19}$  Дж (несколько эВ).



В 1897 г. английский физик Дж.Дж. Томсон экспериментально открыл электрон как частицу, входящую в состав атома и носителя наименьшего электрического заряда. Он предположил, что атом – это положительно заряженный шар, внутри



которого находятся отрицательно заряженные электроны. Равномерность их распределения в объеме шара и равенство положительного и отрицательного зарядов обуславливают электрическую нейтральность атома.



**Модель атома Томсона называют «пудинговой» – по аналогии с традиционным британским пирогом с изюмом.**

Однако такая модель атома имела свои ограничения и не согласовалась с экспериментальными фактами, полученными в то время физиками. Предложить более правдоподобную модель атома удалось лишь после опытов Э. Резерфорда и формулирования Н. Бором квантовых постулатов.

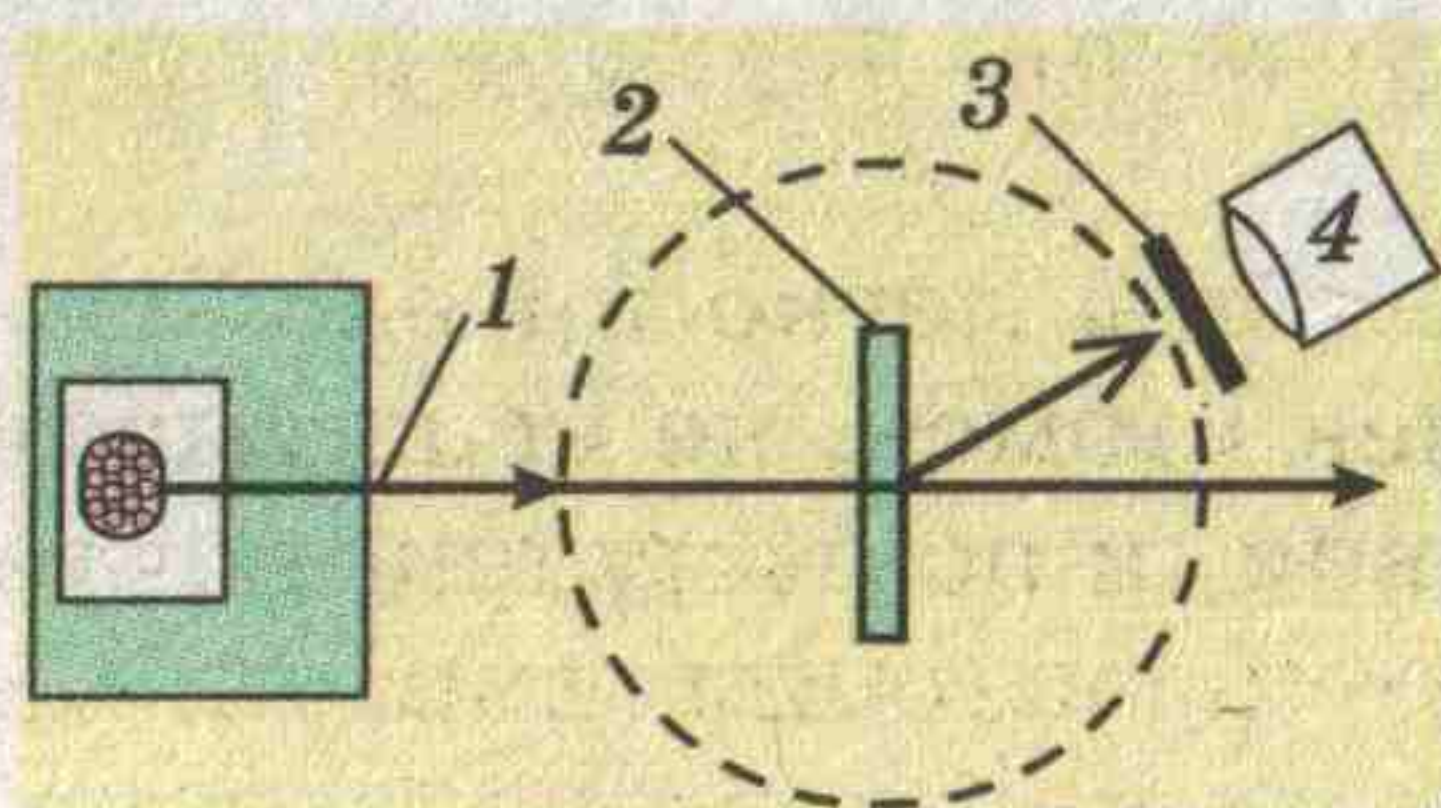


Рис. 5.1. Схема опыта Э. Резерфорда

за которой находился экран 3, обладающий свойством фиксировать их попадание на экран вспышками. При помощи специального оптического устройства 4 можно было наблюдать и измерять угол отклонения  $\varphi$  альфа-частиц.



**Альфа-частица – это положительно заряженная частица, заряд которой равен двум зарядам электрона, а масса в четыре раза больше массы атома Гидрогена.**

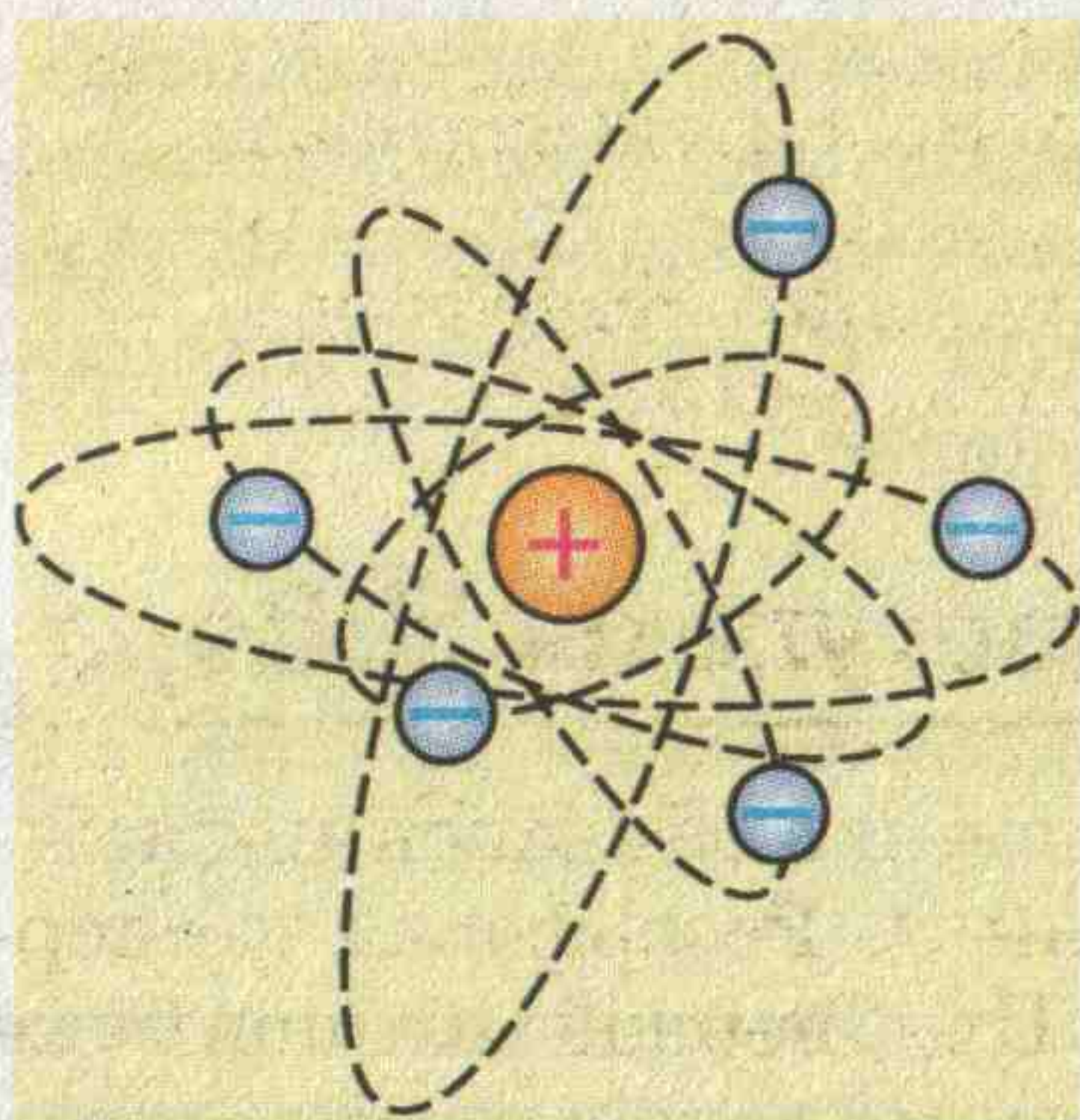


Рис. 5.2. Ядерная модель атома

В 1911 г. английский физик Э. Резерфорд, исследуя со своими сотрудниками прохождение альфа-частицами тонких металлических пластинок, установил, что данные заряженные частицы рассеиваются определенным образом (рис. 5.1). Узкий пучок быстрых альфа-частиц 1 направлялся на тонкую золотую или платиновую пластинку 2,

Большинство частиц имело почти прямолинейную траекторию (угол отклонения  $\varphi$  составлял  $1-2^\circ$ ). Однако незначительная их часть отклонялась на большие углы; были зафиксированы даже такие альфа-частицы, которые после рассеивания изменяли направление движения на противоположное ( $\varphi > 90^\circ$ ).

Чтобы объяснить полученные результаты, Э. Резерфорд предположил, что атом является сложным образованием, похожим на Солнечную систему: внутри которого нахо-



дится положительно заряженное ядро, вокруг него вращаются электроны (рис. 5.2). Произведенные им расчеты показали, что в ядре сосредоточена практически вся масса атома, однако его размеры намного меньше самого атома. Измерения показали, что линейные размеры атома составляют  $10^{-10}$  м, а радиус его ядра равен приблизительно  $10^{-15}$  м.

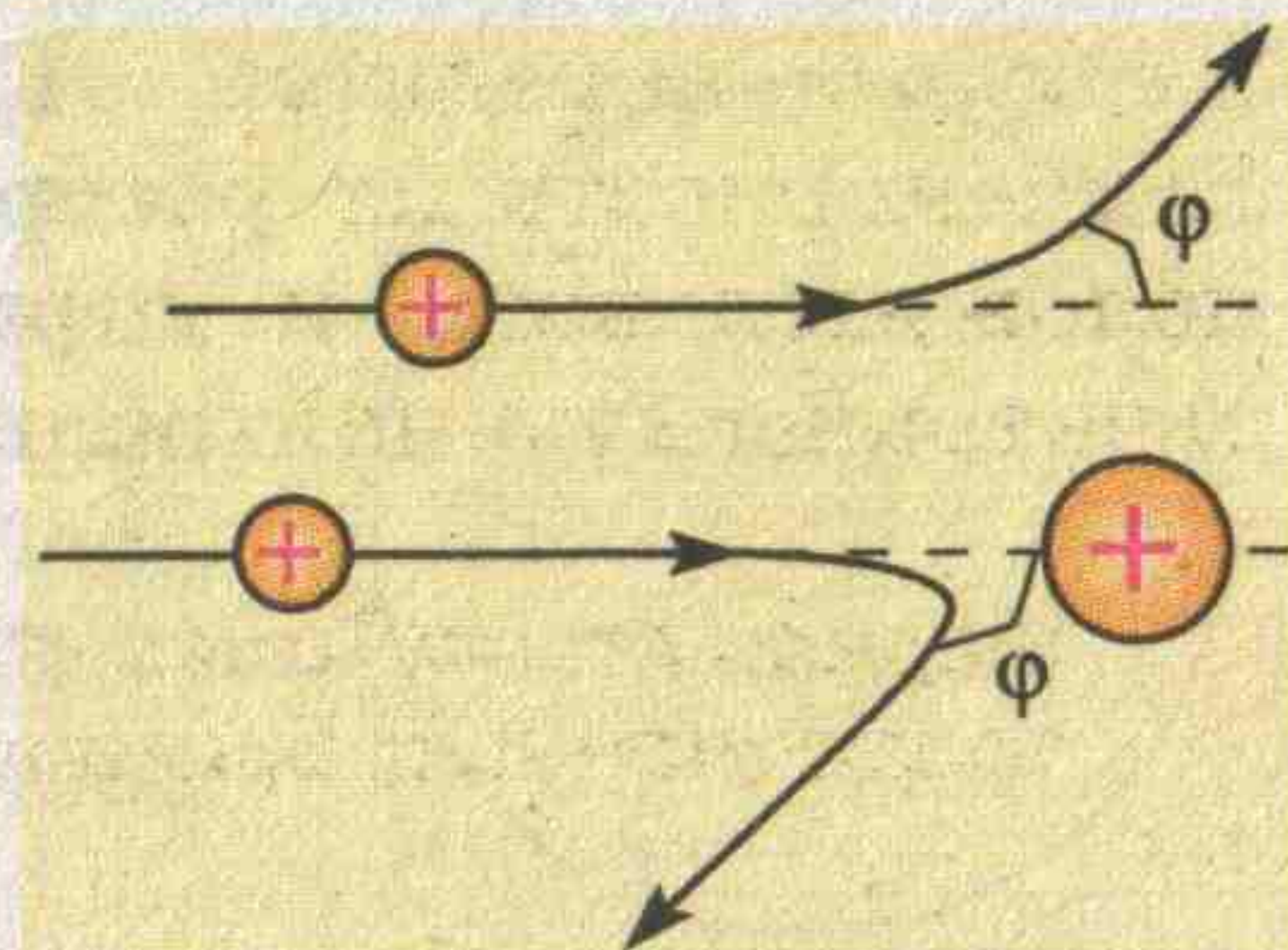


Рис. 5.3. Траектория альфа-частиц

Таким образом, на основании полученных экспериментальных данных Э. Резерфорд предложил ядерную модель атома, которая согласовалась с результатами его опытов и позволила объяснить много других явлений, связанных со строением атома.

Действительно, быстрые альфа-частицы легко преодолевают пространство электронных оболочек атомов, не испытывая с их стороны значительного воздействия, и поэтому они почти не отклоняются от прямолинейной траектории движения. Вместе с тем, когда они пролетают достаточно близко от положительно заряженного ядра, кулоновское взаимодействие между ядром и частицами вынуждает их искривлять траекторию и отклоняться на определенный угол (рис. 5.3).

Благодаря законам электромагнитного взаимодействия Э. Резерфорд вывел формулу, позволяющую вычислить число альфа-частиц, рассеянных на угол  $\phi$  в зависимости от их энергии и химической природы исследуемого образца. Позже эта теоретически выведенная формула получила экспериментальное подтверждение, вследствие чего окончательно утвердила в физике ядерную модель атома.

1. Какие открытия стали толчком в развитии современной физики?
2. В чем состоит суть опытов Резерфорда?
3. Чем отличается ядерная модель атома, предложенная Резерфордом, от «пудинговой» модели Томсона?
4. Почему отдельные альфа-частицы в опытах Резерфорда отклонялись от прямолинейной траектории движения?

## § 65. Квантовые постулаты Н. Бора

Триумф классической физики в объяснении сложного строения микромира, приведший Э. Резерфорда к ядерной модели атома, длился недолго. При первой же попытке применить законы классической механики и электродинамики к описанию простейшего атома Гидрогена ученые встретились с трудностями, которые поначалу казались непреодолимыми.



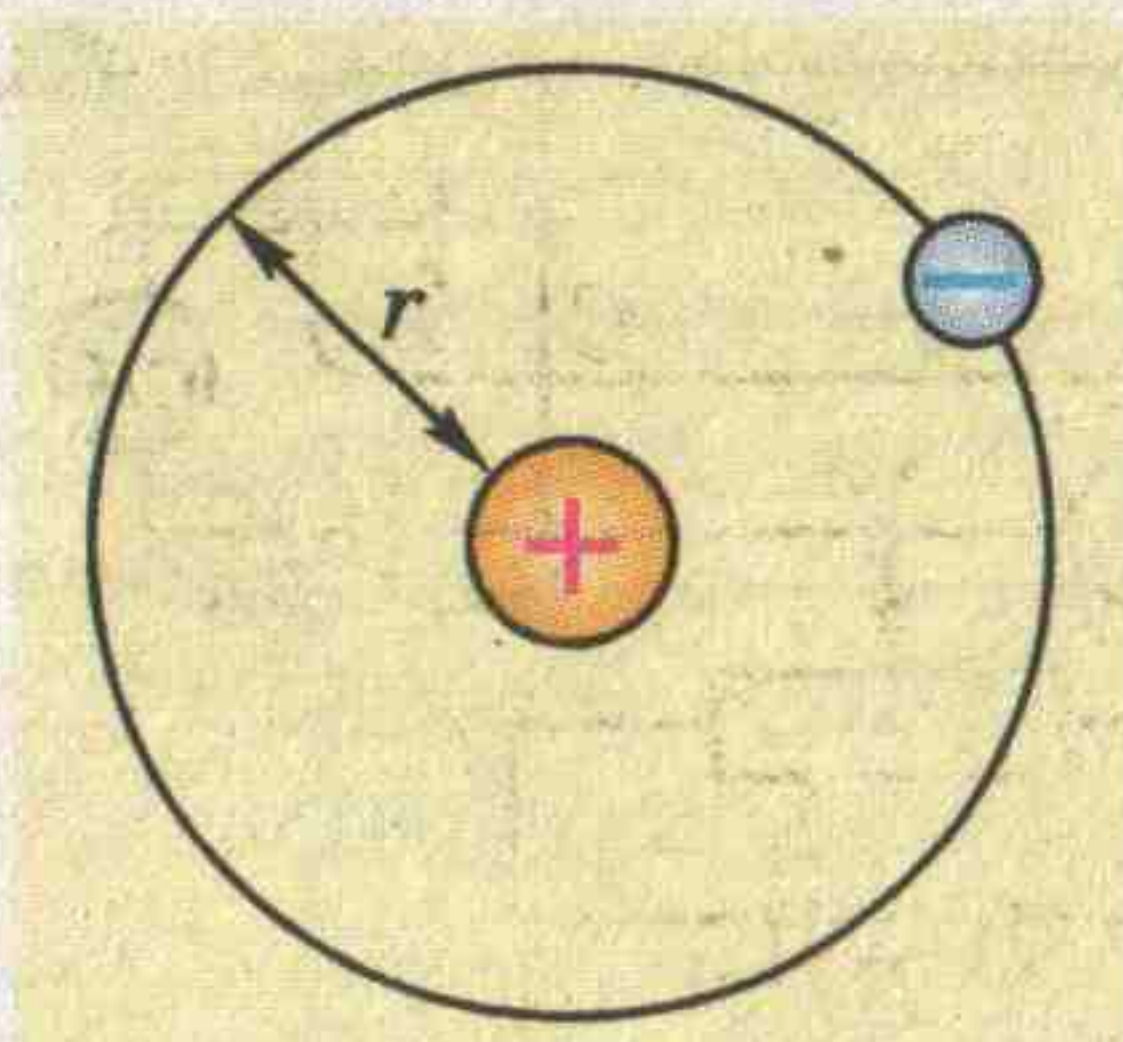


Рис. 5.4. Модель атома Гидрогена

Как известно, атом Гидрогена является устойчивым образованием, состоящим из ядра-протона и одного электрона, который вращается вокруг него под действием кулоновской силы взаимодействия (рис. 5.4).

Если считать орбиту электрона окружностью, то получим

$$\frac{mv^2}{r} = k \frac{e^2}{r^2}.$$

Из теории электродинамики Дж. Максвелла известно, что движущийся с ускорением электрон должен излучать электромагнитные волны и постепенно будет терять энергию. Т. е. со временем он упадет на ядро, и атом прекратит свое существование как целостная система «ядро-электрон». Следовательно, исходя из классических представлений, атомы не могут быть устойчивыми образованиями и все время должны излучать сплошной спектр электромагнитных волн. На самом же деле такой вывод противоречит практике, ведь реально они «живут» длительное время и излучают энергию лишь при определенных условиях.

206



Учитывая размер атома  $r \approx 10^{-10}$  м и скорость электрона  $v \approx 10^6$  м/с, а его ускорение  $a \approx 10^{22}$  м/с<sup>2</sup>.

Данное противоречие между классической теорией и практикой устранил в 1913 г. известный датский ученый Нильс Бор, сформулировав *квантовые постулаты*:

- 1) атомы находятся в определенных стационарных состояниях, в которых они не излучают электромагнитные волны;
- 2) при переходе атома из одного стационарного состояния, характеризующегося энергией  $E_n$ , в другое с энергией  $E_m$  он излучает либо поглощает квант, равный:

$$h\nu = E_n - E_m.$$

Таким образом, квантовые постулаты Н. Бора окончательно устранили трудности классической физики относительно строения вещества. Они связали между собой ядерную модель атома Э. Резерфорда, построенную на классической физической теории, и квантовый характер изменений состояния атома, подтвержденных экспериментально. Их значение в развитии современной физики проявилось позже, во время становления квантовой механики, в основу которой положена идея квантования некоторых физических величин.





Первый постулат Бора, опровергающий фундаментальные положения классической физики, был экспериментально подтвержден в 1913 г. опытами Д. Франка и Г. Герца. Они исследовали зависимость силы тока от напряжения паров ртути, находящихся в стеклянной колбе (рис. 5.5).

Электроны с катода  $K$  под действием электрического поля устремляются к сетке  $C$  и аноду  $A$ . Между сеткой  $C$  и анодом  $A$  существует незначительное напряжение (0,5 В), задерживающее медленные электроны, не давая им достичь анода.

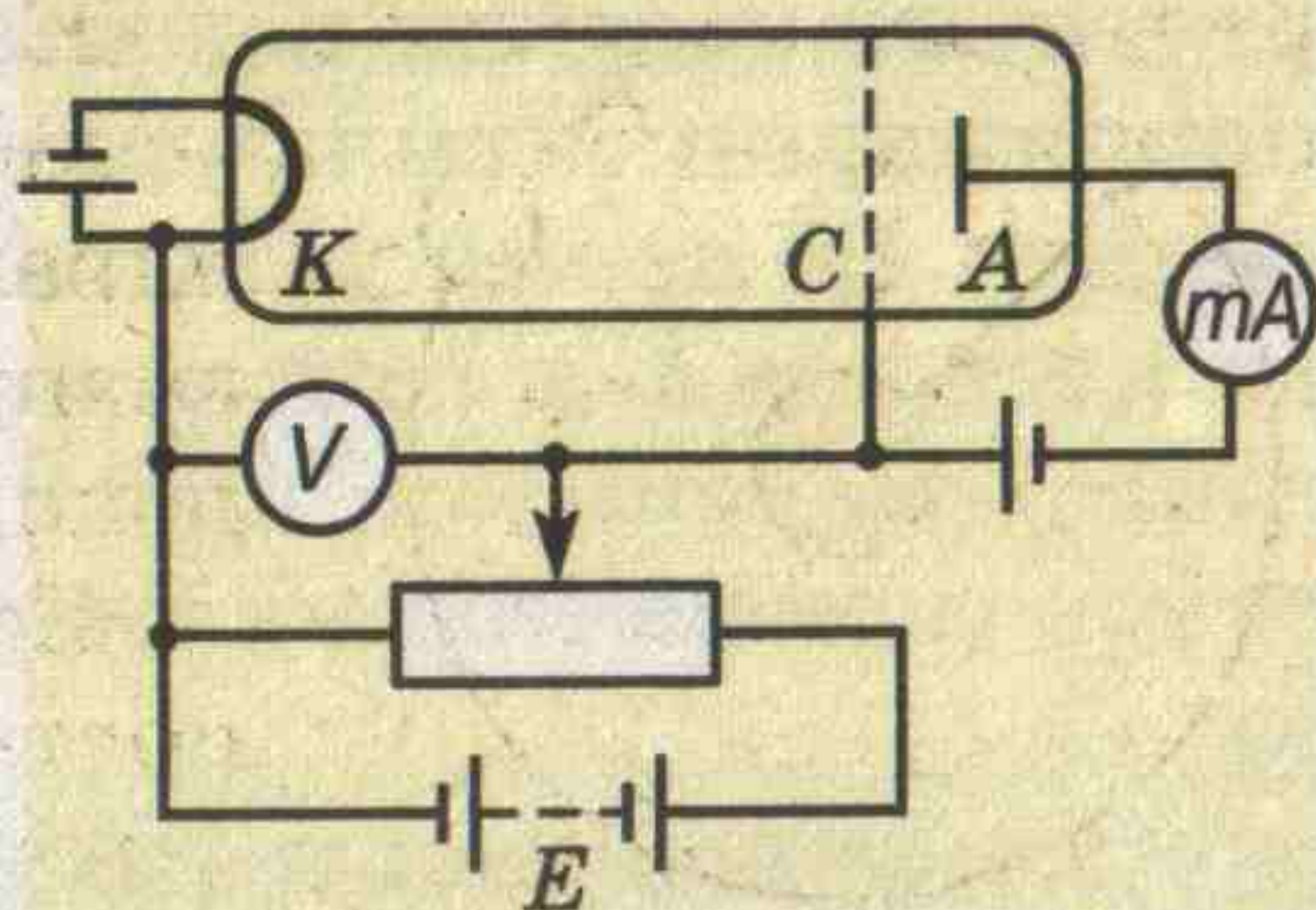


Рис. 5.5. Схема опыта Д. Франка и Г. Герца

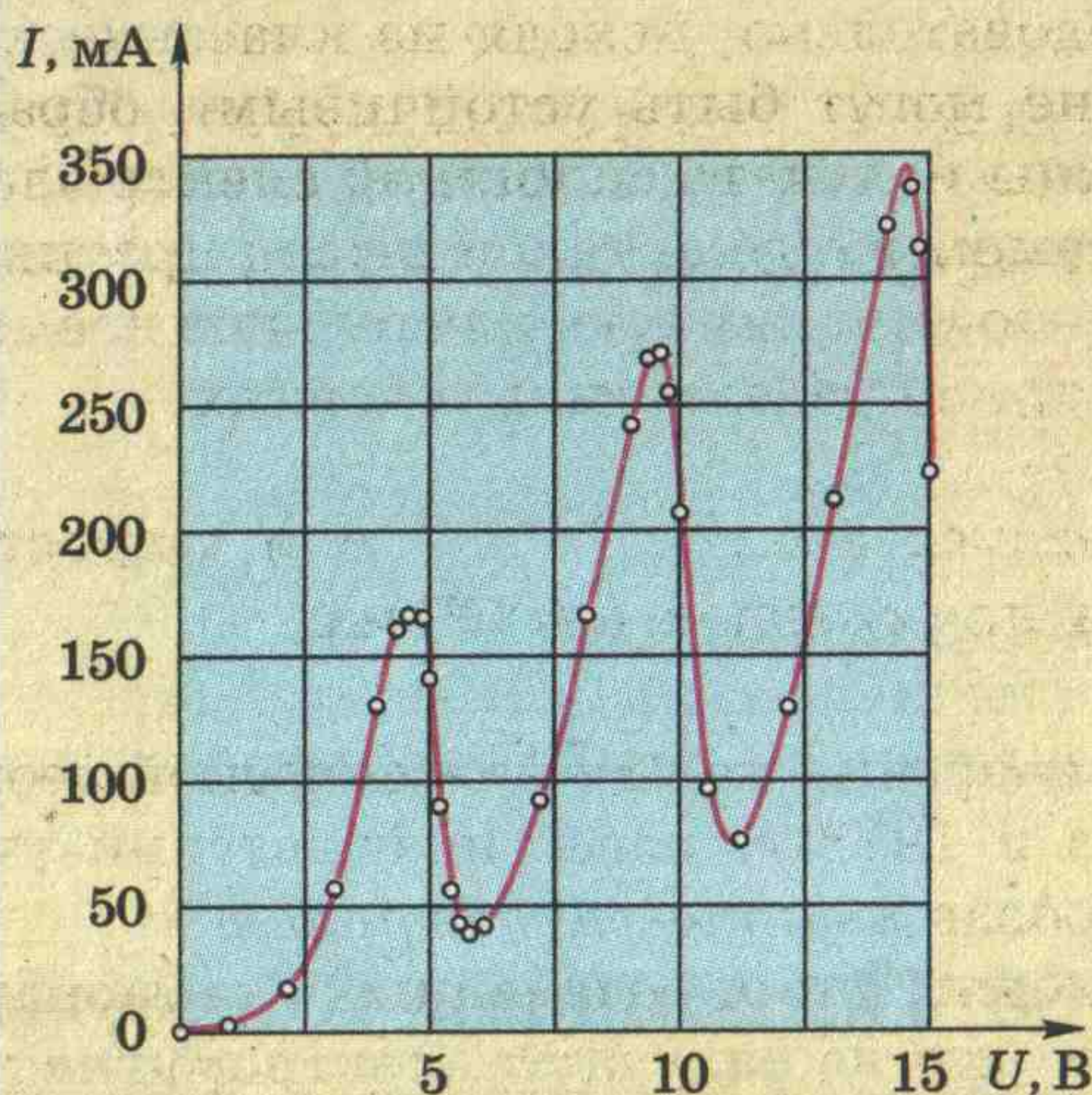


Рис. 5.6. Зависимость силы тока от напряжения в опыте Франка и Герца

Результаты исследования зависимости силы тока  $I$  цепи анода от напряжения  $U$  показали, данная зависимость имеет нелинейный сложный характер (рис. 5.6). Существование максимумов тока при напряжении 4,9 В, 9,8 В и 14,7 В может быть объяснено лишь одной причиной – существованием в атомах ртути стационарных состояний. Действительно, при напряжении  $U < 4,9$  В электроны, вылетающие с катода, сталкиваясь с атомами ртути, практически не изменяют свою энергию ( $m_e \ll M_{\text{Hg}}$ ) и поэтому легко преодолевают тормозящее напряжение между сеткой и анодом. При достижении напряжения  $U = 4,9$  В происходит их неупругое столкновение и электроны теряют энергию, возбуждая тем самым атомы



ртути; их энергии недостаточно для преодоления тормозящего напряжения и сила тока в цепи анода в таком случае резко падает. Во время дальнейшего возрастания напряжения между катодом  $K$  и сеткой  $C$  сила анодного тока вновь растет, достигая максимума при 9,8 В. Следовательно, энергия атомов ртути изменяется на значения, кратные энергии 4,9 эВ.



**Электрон-вольт (эВ) – это энергия, которую приобретает электрон под действием напряжения 1 В:**

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

В возбужденном состоянии атомы могут находиться довольно короткий промежуток времени ( $\approx 10^{-8}$  с), после чего они самопроизвольно возвращаются в основное состояние, излучая квант света частотой  $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ . В опытах Франка и Герца

при напряжении 4,9 В наблюдалось ультрафиолетовое свечение паров ртути, что подтверждало справедливость квантовых постулатов Бора.

208



1. Почему у классической физики возникли трудности при объяснении ядерной модели атома? В чем они проявились?
2. Почему постулаты Н. Бора называют квантовыми?
3. Какие опытные факты подтверждают справедливость квантовых постулатов Бора?
4. В чем состоит суть опыта Д. Франка и Г. Герца?
5. Каково значение квантовых постулатов Бора для современной физики?

## § 66. Поглощение и излучение света атомом. Оптические спектры

Электромагнитное излучение любой природы характеризуется диапазоном частот, в пределах которых оно проявляет определенные свои свойства. В оптическом диапазоне, в зависимости от характера распространения электромагнитных волн, выделяют *спектры излучения, спектры поглощения, спектры рассеивания и спектры отражения*.

Оптические спектры излучения наблюдаются у источников света, испускающих волны в результате возбуждения вещества под действием внешнего фактора. Например, раскаленная вольфрамовая нить электрической лампы излучает свет благодаря протеканию по ней электрического тока. Последние три вида спектра наблюдаются во время прохождения излучения через вещество, в результате которого происходит поглоще-



ние, рассеивание или отражение света, в зависимости от длины волны  $\lambda$  или частоты  $\nu$ .

**Оптические спектры поглощения, рассеивания и отражения характеризуют свойства вещества.**

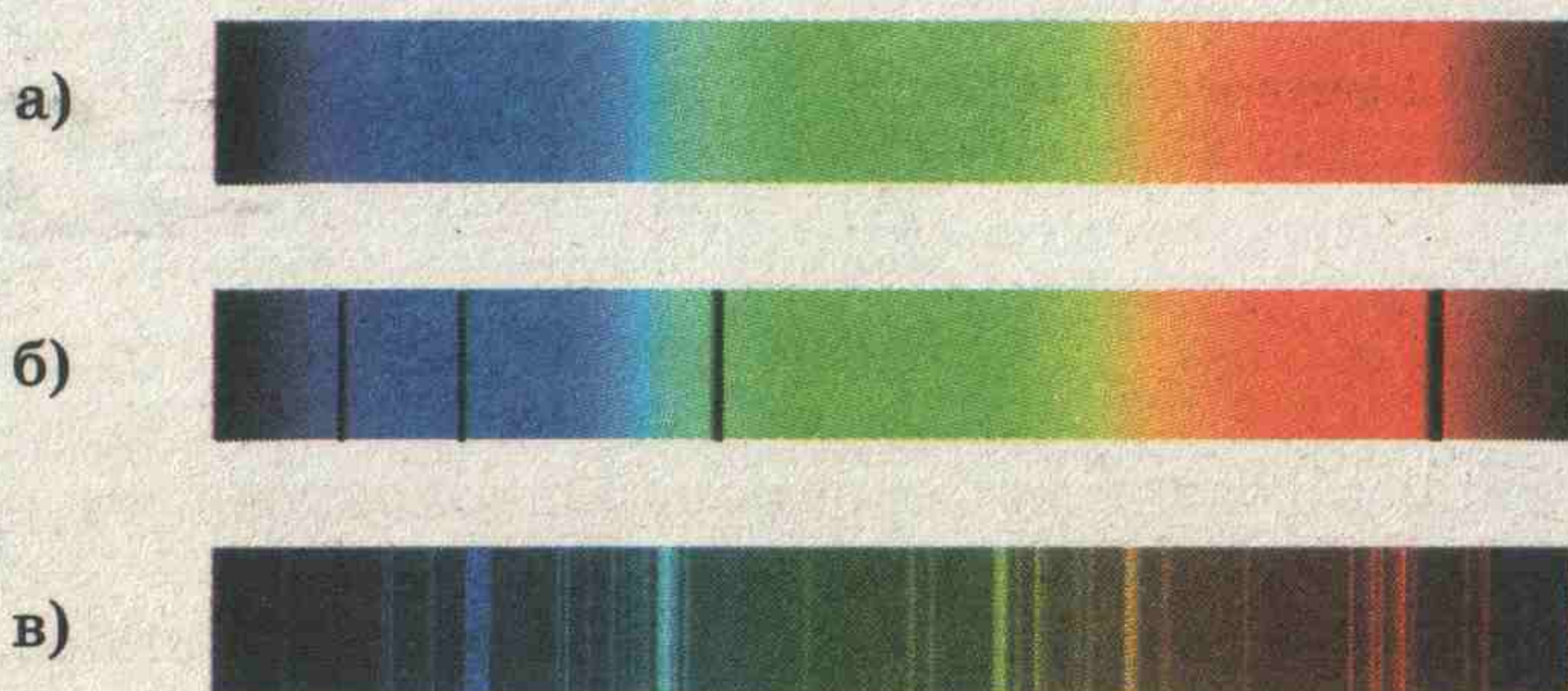


Рис. 5.7. Виды оптических спектров

Оптические спектры наблюдают визуально при помощи спектральных приборов и фиксируют, как правило, фотографическим способом либо фотоэлементами. Они могут быть (рис. 5.7):

- а) *сплошными* – охватывающие широкий диапазон длин волн;
- б) *линейчатыми поглощения* – состоящие из отдельных спектральных линий определенной длины волны  $\lambda$ ;
- в) *линейчатыми излучения* – набором отдельных спектральных линий, которые излучаются атомами определенного химического элемента.

Сплошной оптический спектр можно получить при условии термодинамического равновесия вещества и излучения при данной температуре. Однако в реальных условиях достичь такого состояния практически невозможно. Поэтому чаще всего одновременно наблюдают различные виды спектра. Например, обычно в спектроскопе солнечный свет имеет вид сплошного спектра с темными линиями поглощения.

Механизм образования сплошных оптических спектров объясняется на основе классической теории Дж. Максвелла. В ее толковании поглощенное электромагнитное излучение возбуждает в веществе волны, частота которых соответствует частоте падающего света.

**В соответствии с классической теорией монохроматический свет возбуждает волны той частоты, что и падающий свет, а естественный свет образует сплошной спектр излучения.**



Однако классическая физика не смогла объяснить образование спектров излучения и поглощения света атомами и



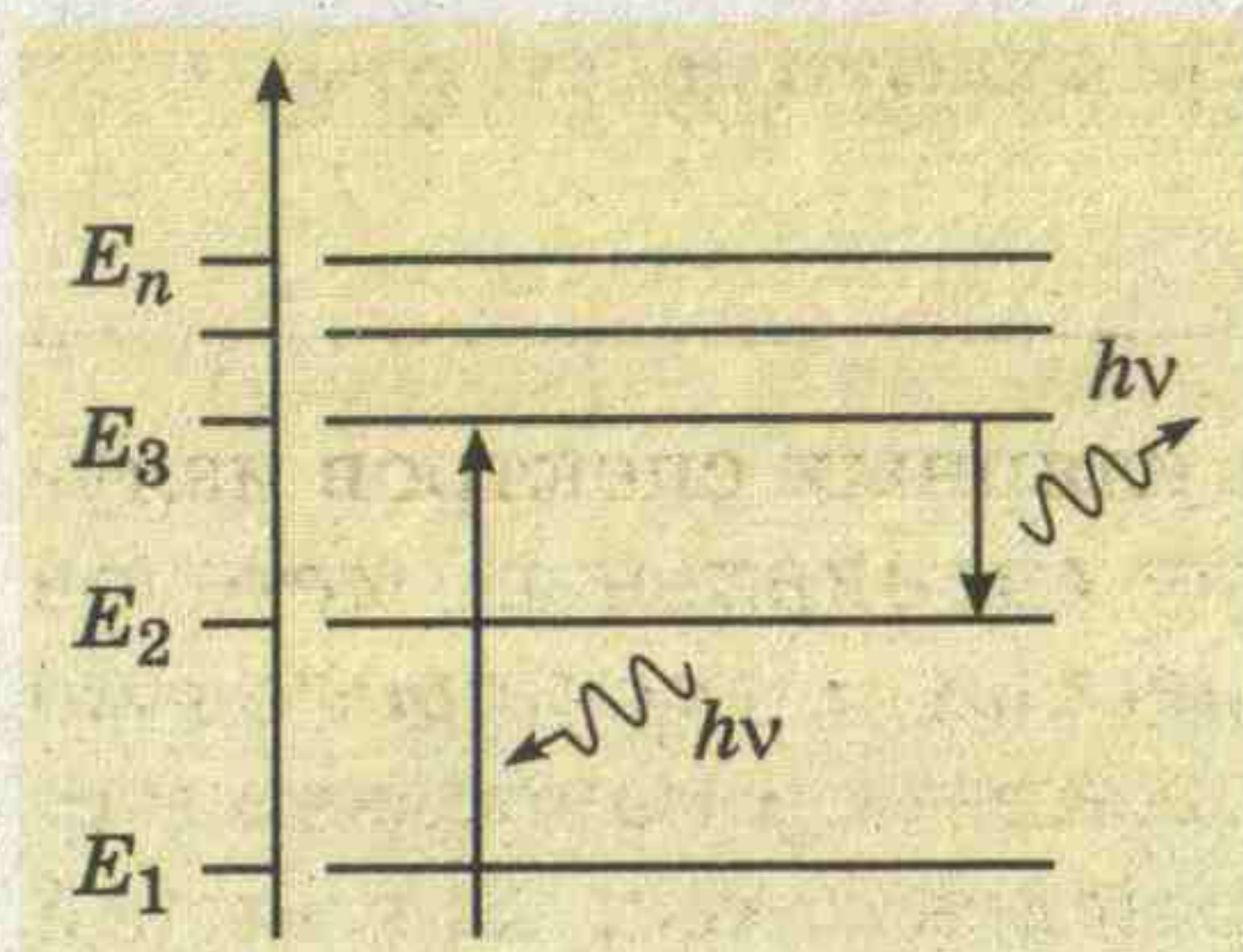


Рис. 5.8. Энергетические уровни атома

молекулами. Их природу можно понять лишь на основе квантовых постулатов Н. Бора, благодаря интерпретации квантовых переходов между уровнями энергии в атомах и молекулах.

Для наглядного представления состояний атома используют энергетические диаграммы, на которых уровни энергии обозначают горизонтальными линиями (рис. 5.8). Достаточно долго атом может нахо-

диться лишь в основном стационарном состоянии, характеризуемом минимальной энергией  $E_1$ . Остальные состояния атома или молекулы ( $E_2, E_3, \dots, E_n$ ) будут стационарными лишь условно, поэтому их называют *возбужденными состояниями*. Например, если невозбужденный атом поглощает квант  $h\nu$ , то может произойти его переход в условно стабильное, возбужденное состояние  $E_3$ ; но со временем, излучая квант частотой  $\nu = \frac{E_3 - E_2}{h}$ , атом может перейти в более стабильное со-

стояние  $E_2$ . Следует отметить, что излучение происходит при квантовом переходе атома из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией, и наоборот, поглощение энергии атомом сопровождается его переходом из состояния с меньшей энергией в состояние с большей энергией.



**Переход атома из одного энергетического состояния в другое скачком, удовлетворяя условию второго постулата Бора, называется квантовым переходом.**

Молекулярные спектры представляют собой совокупность полос, по набору которых можно получить информацию о составе и структуре молекулы, состоянии ее электронных оболочек. Поэтому их широко используют в химии, в спектральном анализе веществ.



1. Какие бывают оптические спектры?
2. Какие виды спектров вам известны?
3. Каким образом можно объяснить природу линейчатых спектров?
4. Какие переходы атома сопровождаются поглощением света, а какие – излучением?



## § 67. Спектральный анализ и его применение

Изучение атомных и молекулярных спектров излучения и поглощения положено в основу специальных методов исследования состава и строения вещества – *спектрального анализа*. Он основывается на количественных и качественных методах исследования спектров электромагнитных излучений при помощи специальных приборов – *спектрометров*.

**Метод определения качественного состава и количественного содержания веществ на основе их спектра называется спектральным анализом.**

Принцип действия этих приборов основывается на их способности выделять в пространстве и времени из всего светового потока отдельные участки излучения, которые можно фиксировать фотографическим способом или измерять различные их характеристики – изменение

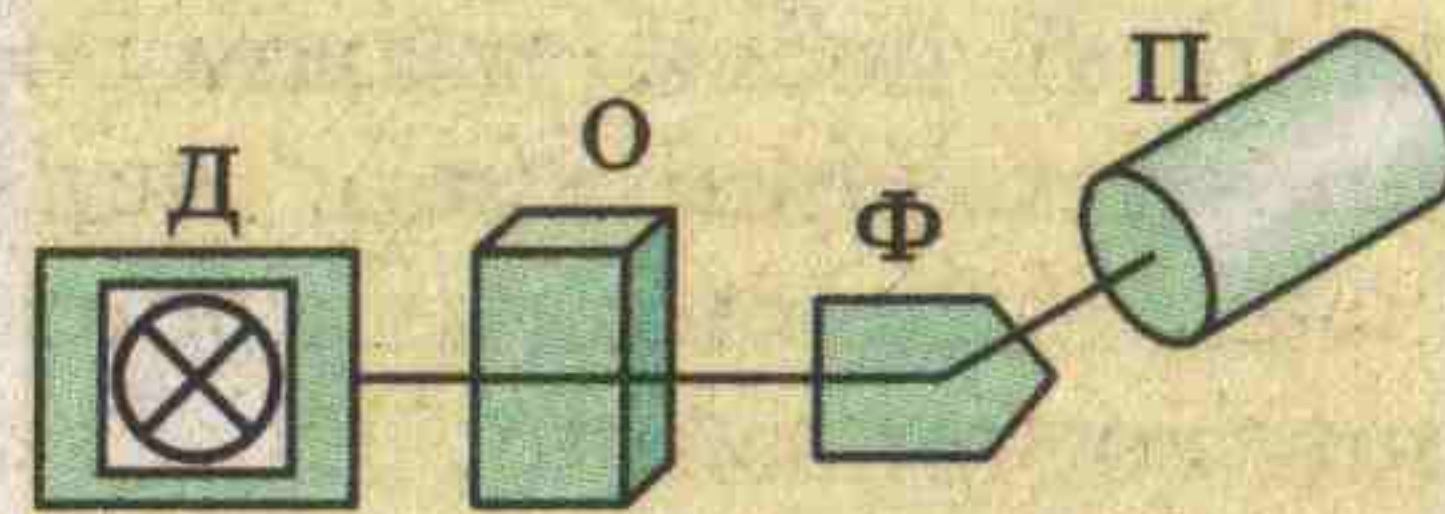


Рис. 5.9. Схема спектрометра

светового потока, длину волны спектральной линии и т. д. (рис. 5.9). Поэтому главный их элемент – селективное устройство (дисперсионная призма, дифракционная решетка, интерферометр и пр.), при помощи которого выделяется часть спектра в определенном интервале длин волн.

Для изучения спектров поглощения световой поток от источника Д направляется на исследуемый объект О, после прохождения которого он попадает на селективное устройство Ф. Выделенная определенным способом часть спектра фиксируется устройствами отображения П (сканирующие экраны, фотоэлементы, фотопленки и пр.). Затем стандартные характеристики излучения сравниваются с полученным спектром и, в зависимости от избранного метода спектроскопии, на основе их анализа делаются выводы относительно исследуемых спектров поглощения.

**Каждый химический элемент обладает особым набором спектральных линий, присущим лишь ему одному.**

На основании атомного спектрального анализа определяют элементный состав образца, сравнивая его спектр со спектральными линиями химических элементов, приведенных в специальных таблицах и атласах. Для получения спектра из-



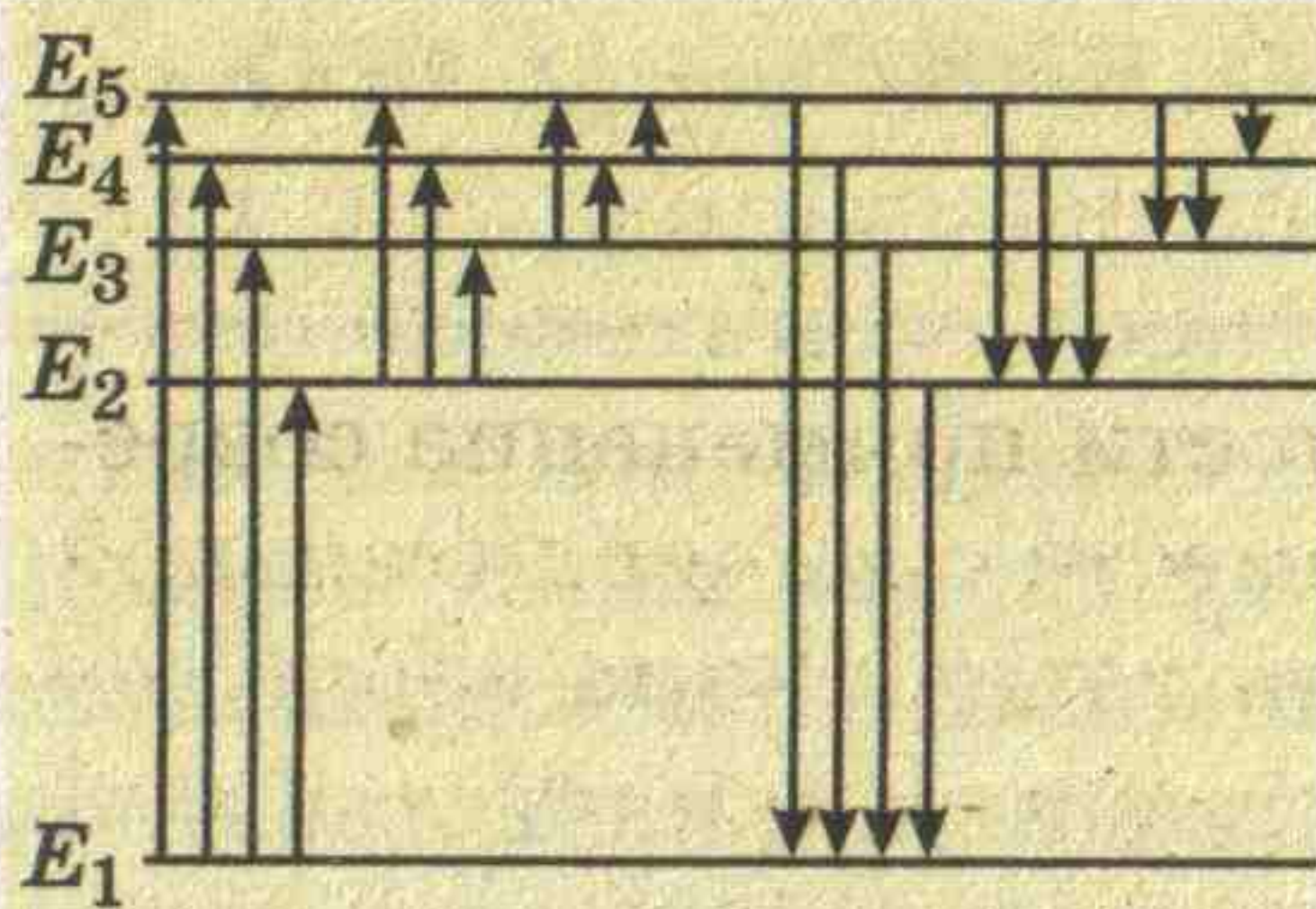


Рис. 5.10. Энергетическая диаграмма образования линейчатого спектра

лучения исследуемое вещество необходимо, как правило, перевести в газообразное состояние, а его атомы – в возбужденное состояние. Проще всего это можно сделать путем нагревания исследуемого образца, например, поместив его в пламя.

Если исследуемое вещество пребывает в газообразном состоянии, то для получения его линейчатого спектра применяют искровой разряд: подавая высокое напряжение

на электроды, в газовой среде возникает электрический разряд, в столбе которого атомы вещества возбуждаются. Для спектрального анализа твердых тел часто применяют дуговой разряд: исследуемый образец в плазме электрической дуги превращается в пар при высокой температуре.

При высоких температурах атомы переходят в возбужденное состояние  $E_2, E_3, E_4, E_5$ , в котором они могут находиться недолго (рис. 5.10). Со временем они возвращаются в свое стабильное состояние  $E_1$ , излучая при этом световой квант определенной частоты:

$$\nu = \frac{E_m - E_n}{h}.$$

Каждый химический элемент обладает своим, присущим только ему набором спектральных линий, так называемым *атомным спектром*. На основании линий атомного спектра образца при помощи специальных таблиц, в которых содержатся серии длин волн спектров излучения различных веществ, определяют химический состав исследуемого образца.

В основе молекулярного спектрального анализа лежит сравнение полученного спектра образца со спектрами отдельных веществ. Молекулярные спектры схожи с атомными. Они тоже линейчатые, однако имеют свои особенности – спектральных линий больше и они образуют достаточно широкие полосы. Это объясняется тем, что энергетические уровни атомов, составляющих молекулу, расщепляются, ведь их энергия обусловлена двумя факторами – собственными колебаниями атомов в молекуле и их вращением.



**Линейчатый атомный и полосатый молекулярный спектры отображают возможные электронные переходы с одного энергетического уровня на другие.**



Спектр молекулы является ее однозначной характеристикой. Благодаря этому производят идентификацию веществ. Их количественное содержание определяют по интенсивности излучения полосатого спектра, в частности применение современных фотоэлектрических приборов вместе с вычислительной техникой дает возможность определить содержание вещества в очень малых дозах – до 1 мкг и меньше. Поэтому данный метод нашел широкое применение в науке и технике, в частности в металлургии на основании его контролируют содержание примесей в сплавах, чтобы получать материалы с заданными свойствами.

**В горнодобывающей промышленности при помощи спектрального анализа определяют химический состав найденных образцов полезных ископаемых.**



На основании спектрального анализа в астрономии изучают химический состав небесных тел, находящихся далеко за пределами нашей галактики.

213

1. Что представляет собой спектральный анализ?
2. Какой принцип положен в основу действия спектральных приборов?
3. С какой целью применяют спектральный анализ?



## § 68. Рентгеновское излучение

Среди всех видов электромагнитных излучений особое место принадлежит рентгеновским лучам, длина волны которых меньше 6 нм. В повседневной жизни мы часто сталкиваемся с данным излучением, в частности, когда обследуем состояние своего здоровья в специальном «рентгеновском» кабинете больницы или поликлиники.

Интересна сама история открытия рентгеновских лучей. Первые вакуумные трубки для получения X-лучей (первоначально рентгеновское излучение имело такое название) были созданы известным физиком, украинцем по происхождению Иваном Пулюем, который жил и работал длительное время в Австрии.

Он впервые доказал, что излучение в вакуумных трубках, в которых течет электрический ток, имеет волновые свойства. Ученый

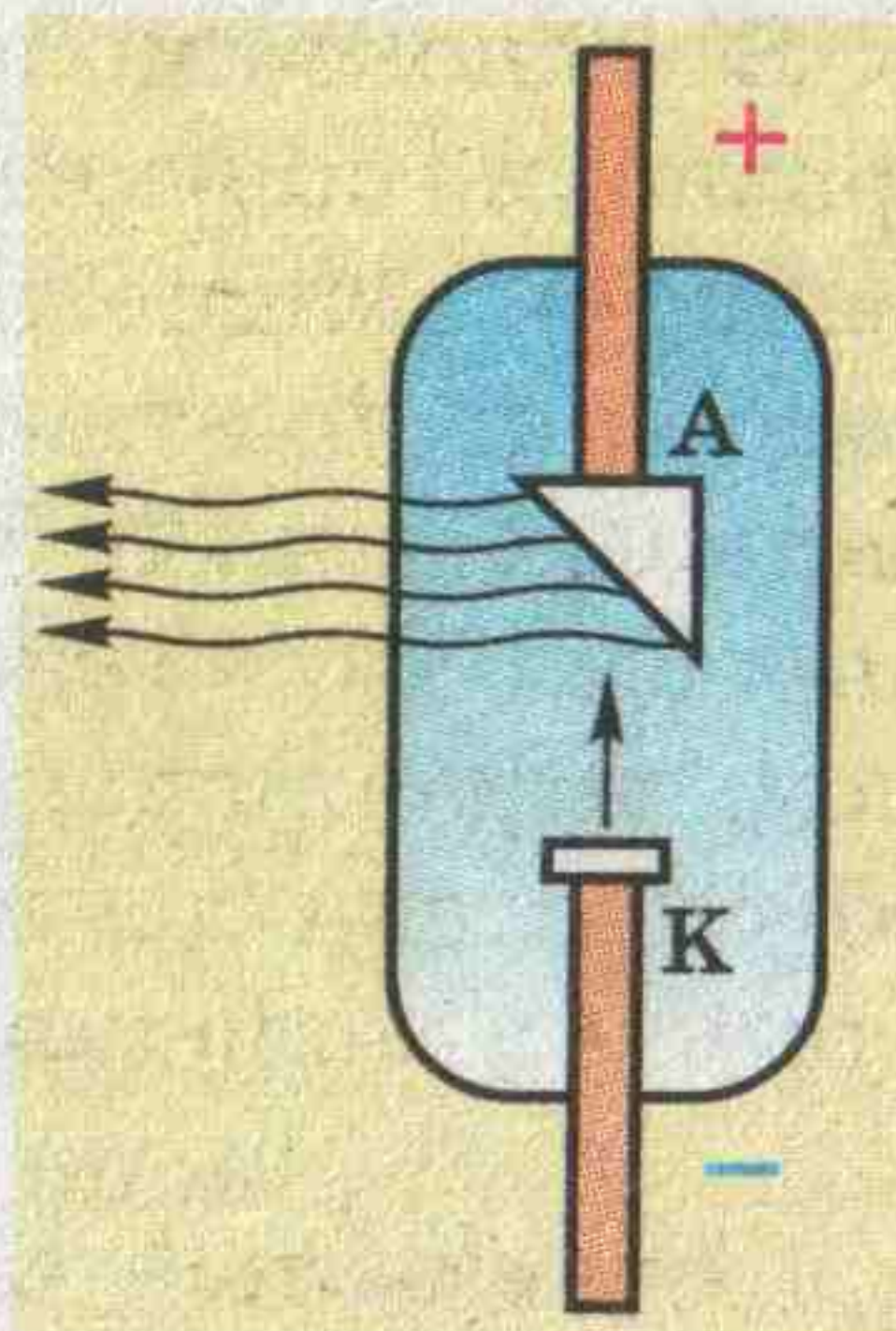


Рис. 5.11.  
Устройство рентгеновской трубки



выяснил природу лучей и изучил их основные свойства. Полученные И. Пулюем фотоснимки внутренних органов человека до сих пор приводятся как пример в учебной литературе. Однако первым об открытии нового вида электромагнитного излучения сообщил в 1895 г. немецкий физик В. Рентген. После публикаций В. Рентгена и получения им Нобелевской премии данное излучение начали называть рентгеновским.



**Пулюй Иван Павлович (1845–1918)** – известный украинский физик и общественный деятель. Научные труды посвящены главным образом электрическому току в вакууме. Открыл X-лучи, получившие впоследствии название рентгеновских, сделал весомый вклад в развитие электротехники.

Для получения рентгеновского излучения применяют специальные электронные приборы, называемые *рентгеновскими трубками* (рис. 5.11). Это стеклянный или металлический баллон, из которого откачан воздух, с вмонтированными в него двумя электродами. Один из электродов – катод К подогревается спиралью, по которой течет электрический ток. При нагревании в результате термоэлектронной эмиссии из катода вылетают электроны, образуя вокруг него электронное облако. Если между катодом и другим электродом – анодом А – приложить высокое напряжение, то электроны начнут ускоренно двигаться от катода к аноду. При приближении к аноду в результате резкого торможения они будут излучать лучи, получившие название рентгеновских\*.

Спектр частот данного излучения достаточно широк и может иметь либо фиксированную длину волны или быть сплошным. Это объясняется тем, что электроны, попадая на анод, имеют разные скорости, и поэтому излучают широкий спектр электромагнитного излучения. Увеличение ускоряющего напряжения между анодом и катодом обуславливает расширение



**Рентген Вильгельм Конрад (1845–1923)** – известный немецкий физик-экспериментатор, лауреат Нобелевской премии 1901 г. В 1895 г. опубликовал сообщение об открытии X-лучей, названных позже рентгеновскими. Значительная часть научных трудов посвящена исследованию рентгеновского излучения, свойствам жидкостей и газов, электромагнитных явлений.

\* Согласно теории Дж. Максвелла заряженные частицы, движущиеся с ускорением, излучают электромагнитные волны.



спектра, который смещается в сторону уменьшения длины волны. При достаточно высоком напряжении электроны, попадая на анод, могут возбуждать его атомы. В таком случае начинает преобладать излучение строго определенной длины волны, создавая так называемый характеристический спектр рентгеновского излучения. Данный вид спектра позволяет изучить внутреннее строение вещества, из которого сделан анод, и определить его химический состав.

Способ измерения длины волны рентгеновского излучения предложил немецкий физик М. Лауэ в 1912 г. В его основу положено явление дифракции рентгеновских лучей во время прохождения их через кристаллические вещества. Для рентгеновского излучения они представляют собой своеобразные дифракционные решетки. Рассеивание рентгеновских лучей на таких естественных решетках ведет к созданию дифракционной картины, в которой отклонение лучей определяется формулой максимума  $d \sin \alpha = k \lambda$ , где  $d$  – период решетки;  $\alpha$  – угол, под которым наблюдается максимум;  $k$  – его порядковый номер;  $\lambda$  – длина волны. Из данной формулы, измерив угол отклонения  $\alpha$  для первого максимума ( $k = 1$ ), можно найти длину падающей волны.

Рентгеновское излучение имеет большую проникающую способность, поэтому его используют в промышленности для исследования внутреннего строения вещества, а также для выявления дефектов металлических деталей.

Данное излучение оказывает сильное физиологическое действие на человеческий организм, и поэтому при длительном воздействии может вызвать тяжелые последствия. В связи с этим врачи не рекомендуют долго находиться вблизи электронных приборов, работающих при высоком напряжении (например, электронно-лучевых кинескопов телевизоров, дисплеев компьютера). Они могут быть источником рентгеновского излучения, поскольку быстрые электроны, ускоренные действием высокого напряжения (десятки тысяч вольт), попадая на экран кинескопа при резком торможении могут излучать «мягкие» рентгеновские лучи. Несмотря на то что их интенсивность небольшая, в отличие от специальных рентгеновских трубок, длительное их воздействие на организм человека может привести к негативным последствиям.

1. Диапазон какого электромагнитного излучения назван рентгеновским?
2. Кто из ученых открыл рентгеновские лучи?
3. Каким образом получают рентгеновское излучение?
4. Каковы основные свойства рентгеновских лучей?







5. Можно ли изменить частоту рентгеновского излучения и каким образом?
6. Чем отличается характеристический спектр рентгеновского излучения от сплошного?
7. Где применяют рентгеновские лучи?
8. Каким образом можно измерить длину волны рентгеновского излучения?

## § 69. Квантовые генераторы. Лазеры и их применение

Как уже отмечалось, атом не может длительное время находиться в возбужденном состоянии – через некоторое время (приблизительно на протяжении  $10^{-8}$  с) он перейдет в условно стабильное или абсолютно стабильное состояние. Такой самопроизвольный его переход из одного энергетического состояния в другое сопровождается, как правило, спонтанным излучением кванта света определенной частоты. Поскольку это происходит произвольно с каждым атомом, то в обычных условиях наблюдается *спонтанное излучение* света атомами, являющееся в совокупности разночастотным, немонохроматическим и некогерентным по своей природе.

216



Электромагнитное излучение определенной частоты (длины волны) называется **монохроматическим**; излучение, имеющее одинаковую фазу, называется **когерентным**.

В 1917 г. А. Эйнштейн предположил, что излучение при определенных условиях может быть вынужденным. В частности, если электрон в атоме переходит с одного энергетического уровня на другой под действием внешнего электромагнитного поля, частота которого совпадает с собственной частотой квантового перехода электрона  $\nu = \frac{E_m - E_n}{h}$ , то излучение будет **индуцированным**.



Индуцированное электромагнитное излучение является **монохромным и когерентным**.

Особенностью данного излучения является то, что оно распространяется в том же направлении, что и падающий свет, оно монохромно и когерентно с ним, т. е. не отличается от поглощенной атомом электромагнитной волны ни частотой, ни фазой, ни поляризацией. Следовательно, в результате распространения электромагнитной волны в веществе может про-



изойти когерентное усиление света за счет индуцированного излучения фотонов (рис. 5.12).

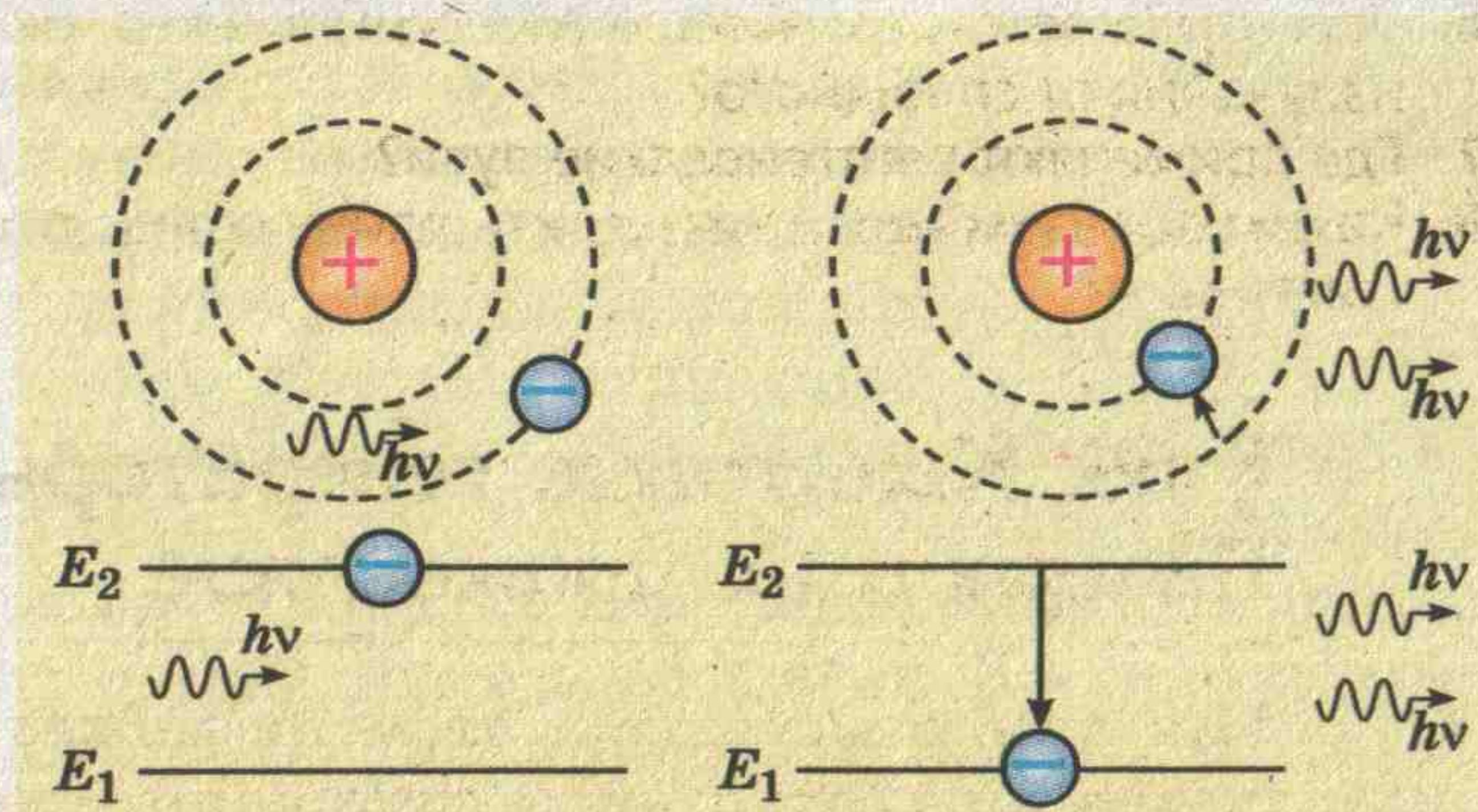


Рис. 5.12. Усиление света вынужденным излучением

Такое усиление возможно лишь в том случае, если большинство атомов вещества пребывает в возбужденном метастабильном состоянии. С этой целью могут использоваться различные способы активизации атомов вещества. В частности, в кристалле рубина это достигается при помощи мощной лампы, которая вынуждает электрон осуществить квантовый переход на более высокий уровень за счет поглощения фотона. В таком состоянии атом может находиться недолго, поэтому через некоторое время он возвращается в стабильное состояние, излучая при этом световой квант с частотой падающего излучения:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}.$$

Данное явление, предсказанное А. Эйнштейном, по-

ложено в основу принципа действия квантовых генераторов и усилителей.

В 1954 г. русские ученые Н.Г. Басов и А.Н. Прохоров и независимо от них в 1955 г. американский физик Ч. Таунс создали первый квантовый усилитель электромагнитного излучения в диапазоне радиоволн – так называемый мазер. За это открытие и фундаментальные работы в области квантовой электроники они в 1964 г. были удостоены Нобелевской премии. В 1960 г. американский физик Т. Мейман создал на кристалле рубина первый квантовый генератор оптического диапазона, названный *лазером*.

**Лазер** – аббревиатура слов английского выражения «*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*», что значит «усиление света при помощи вынужденного излучения».



Рубиновый лазер состоит из кристалла рубина (оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с примесью хрома), сделанного в форме стержня 1 с



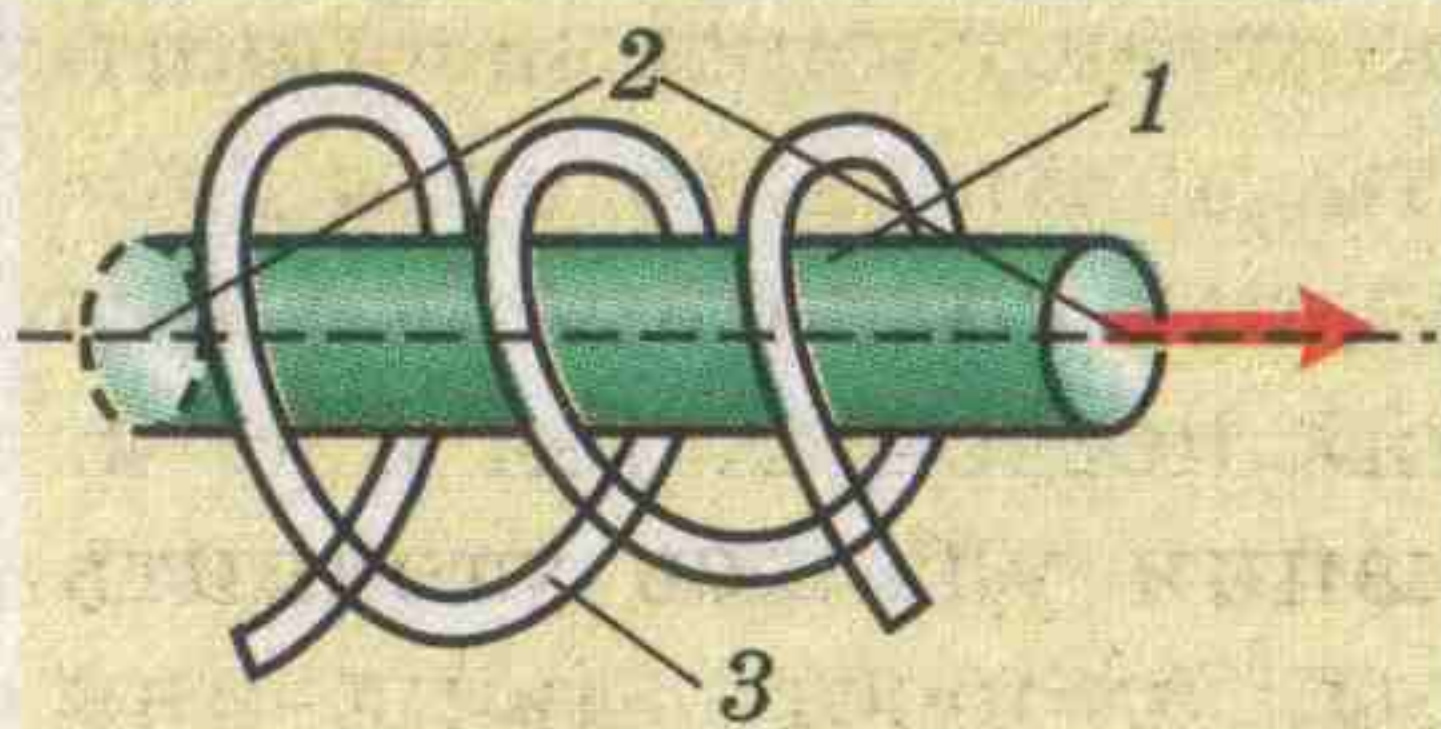


Рис. 5.13. Строение лазера

плоскопараллельными торцевыми сторонами 2 (рис. 5.13). Один из торцов имеет зеркальную поверхность, а второй – полупрозрачен. Вокруг рубинового стержня размещена спиральная газоразрядная лампа 3 импульсного режима, в спектре излучения которой имеется частота, которая соответствует активации атомов рубина.

Атом хрома в кристалле рубина, поглощая квант света длиной волны 560 нм, возбуждается и переходит из основного, стабильного состояния  $E_1$  на более высокий уровень с энергией  $E_3$  (рис. 5.14). В данном состоянии он находится недолго (приблизительно  $10^{-8}$  с), после чего самопроизвольно переходит на метастабильный уровень  $E_2$ , в котором пребывает

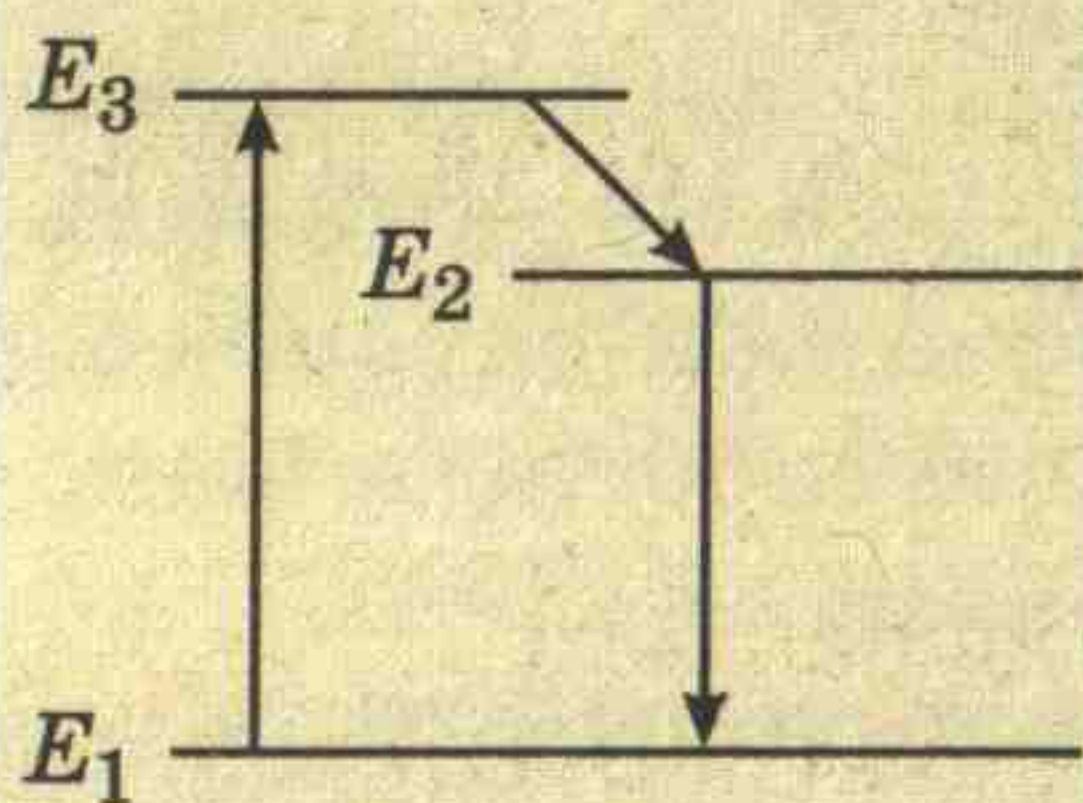


Рис 5.14.

Трехуровневая система возбуждения рубинового кристалла

дольше (приблизительно  $10^{-3}$  с). Такая трехуровневая система активизации рубина позволяет насыщать его метастабильный энергетический уровень. Благодаря тому, что большинство атомов хрома находится в возбужденном состоянии, становится возможным усиление света за счет вынужденного электромагнитного излучения в результате квантового перехода атома с метастабильного энергетического уровня  $E_2$  на основной с энергией  $E_1$ .

В усилении излучения основную роль играют волны, идущие вдоль оси стержня. Многократно отражаясь от плоскопараллельных торцов, они создают интенсивное монохромное когерентное излучение.

Лазерное излучение света обладает свойствами, выделяющими его среди других источников света. Прежде всего это узконаправленный луч с малым углом расхождения (до  $10^{-5}$  рад). Благодаря этому становится возможной локализация луча и его выборочное действие на освещаемую поверхность. Например, воздействуя на атомы, ионы, молекулы фотоматериалов, он вызывает фотохимические реакции, фотодиссоциацию и другие фотоэлектрические явления, используемые в лазерной химии, в технологиях записи информации на дисках, при лечении зрения и т. д.



**Лазерный луч, направленный с Земли на Луну, высвечивает на ее поверхности точку диаметра 3 см.**



Исключительная монохромность и когерентность лазерного излучения позволяет использовать его при создании стандартов частоты, в спектроскопии, голографии, волоконной оптике, при астрофизических исследованиях небесных тел и т. п. Например, при помощи лазерной локации удалось уточнить параметры движения Луны и Венеры, скорость движения Меркурия по орбите, наличие атмосфер у планет.

При помощи лазеров можно достичь интенсивности кратковременных импульсов  $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>, которая превышает излучение Солнца в  $10^{10}$  раз.



Высокая концентрация энергии лазерного луча позволяет достичь значительной интенсивности излучения, сверхвысоких температур и давлений, которые используются при сварке и плавлении металлов, при получении сверхчистых материалов, в лазерной хирургии, для термоядерного синтеза.

С появлением лазеров в физике образовались такие новые разделы, как нелинейная оптика и голография.

219

1. Какое излучение называют индуцированным?
2. Чем отличается спонтанное излучение от индуцированного?
3. В чем проявляется механизм усиления света за счет вынужденного излучения?
4. Каков принцип действия рубинового лазера?
5. Каковы основные свойства лазерного излучения?
6. Приведите примеры лазерных технологий.



### Упражнение 30

1. Вычислить кинетическую, потенциальную и полную энергию электрона атома Гидрогена, если радиус его орбиты равен  $5,29 \cdot 10^{-11}$  м.

2. Во время квантового перехода энергия атома изменилась на 2,5 эВ. Чему равны частота и длина волны излучения?

3. Какова длина волны света, который излучает атом Гидрогена при квантовом переходе с пятого на второй уровень?

4. Найти минимальную энергию возбуждения атома Гидрогена, если его энергия в невозбужденном состоянии равна 13,55 эВ.

## § 70. Атомное ядро

Открытие в 1896 г. французским физиком А. Беккерелем естественной радиоактивности солей урана и дальнейшее исследование данного явления П. Кюри и М. Склодовской-Кюри положило начало развитию ядерной физики.





Для ядерной физики характерны расстояния, соизмеримые с размером ядра ( $\sim 10^{-15}$  м), и энергии от мегаэлектрон-вольт (МэВ) до гигаэлектрон-вольт (ГэВ).

Опыты Э. Резерфорда, обосновавшие ядерную модель атома, показали, что практически вся масса атома сосредоточена в его ядре, которое имеет положительный заряд. Дальнейшие его исследования взаимодействия альфа-частиц с атомами азота привели к открытию протона – второй элементарной частицы, открытой после электрона. Со временем выяснилось, что в составе атомного ядра имеется еще одна элементарная частица – нейтрон.



**Протон** (от греч. *prótos* – первый) – элементарная частица, которая образует ядро атома Гидрогена и имеет положительный заряд, равный заряду электрона.

220

Изучение свойств протона показало, что он имеет положительный заряд, численно равный заряду электрона  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл; его масса  $m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27}$  кг. Поскольку в ядерной физике принято пользоваться атомной единицей массы (а. е. м.) и ее энергетическим эквивалентом – электрон-вольт (эВ), то масса покоя протона равна соответственно  $m_p = 1,007276470$  а. е. м. = 938,2796 МэВ.



**Изотопы** (от греч. *isos* – одинаковый и *tópos* – место) – разновидности одного и того же химического элемента, отличающегося атомными массами.

Открытие в начале XX в. изотопов установило, что их атомные массы кратны массе ядра Гидрогена. В этой связи Э. Резерфорд предположил, что ядра всех химических элементов состоят из протонов. Протонно-электронная модель атома хорошо согласовалась с экспериментальными данными, касающимися свойств Гидрогена. Однако ученые столкнулись с рядом трудностей при объяснении строения ядер более тяжелых химических элементов. Поэтому Э. Резерфорд выдвинул гипотезу о существовании других элементарных частиц – *нейтронов*, которые входят в состав ядра, но не обладают электрическим зарядом.



**Нейтрон** (от лат. *neutron* – не принадлежащий ни к тому ни к другому), т. е. такой, что не имеет электрического заряда.

В 1932 г. английский физик Дж. Чедвик, исследуя свойства излучения, возникающего во время бомбардирования бериллия альфа-частицами, установил, что это поток нейтральных частиц,



масса которых приблизительно равна массе протона. Измерения показали, что масса покоя нейтрона  $m_n = 1,6749543 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,008665012 \text{ а. е. м.} = 939,5731 \text{ МэВ}$ .

Украинский ученый Д.Д. Иваненко (родился в г. Полтаве) и немецкий физик В. Гейзенберг независимо друг от друга предложили *протонно-нейтронную модель ядра*. Они высказали предположение, что атомное ядро образуют *нуклоны* – протоны и нейтроны, которые группируются внутри него, образуя ядерные оболочки. Каждый нуклон, находясь в такой оболочке, пребывает в некотором квантовом состоянии. Его характеризуют энергия и набор квантовых величин (спин, орбитальный момент, четность состояния), которые однозначно его определяют.

**В современной физике протоны и нейтроны, находящиеся в ядре, называются нуклонами (от лат. *nukleus* – ядро).**

В соответствии с данной моделью общее количество нуклонов, т. е. сумма протонов и нейтронов, равно массовому числу  $A$ ; количество протонов соответствует заряду ядра  $Z$ , а количество нейтронов  $N = A - Z$ . В ядерной физике изотоп любого химического элемента  $X$  принято обозначать соответствующим символом, указывая при этом его массовое число  $A$  (слева сверху) и зарядовое число  $Z$  (слева снизу), т. е. в виде  ${}^A_ZX$ . Например, самый легкий изотоп Гидрогена – Протий, ядро которого состоит из одного протона, обозначается  ${}^1_1\text{H}$ ; альфа-частицу, представляющую собой ядро атома Гелия, обозначают  ${}^4_2\text{He}$  и т. д.

Заполнение ядерных оболочек подчиняется определенной закономерности – *принципу Паули*: два одинаковых нуклона не могут одновременно пребывать в одном и том же квантовом состоянии, т. е. характеризоваться одним и тем же набором квантовых величин. Поэтому существует ряд чисел – 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, называемых магическими, которые определяют максимальное количество нуклонов в заполненных ядерных оболочках.

**Принцип Паули вначале был предложен для объяснения закономерностей заполнения электронных орбит в атоме, а затем перенесен на формирование ядерных оболочек.**

Переход ядра из одного состояния в другое, например из стабильного в возбужденное или наоборот, объясняется оболочечной моделью ядра как квантовый переход нуклона из одной оболочки в другую. Каждый раз, когда количество протонов или



нейтронов в данной оболочке достигает магического числа, происходит скачкообразное изменение величин, характеризующих свойства ядра. Этим, в частности, объясняется существование периодичности в свойствах химических элементов, отраженное Периодической системой элементов Д.И. Менделеева.



**Принцип Паули раскрывает физическую сущность периодического закона Д.И. Менделеева.**

Оболочечная модель атомного ядра является одной из самых продуктивных в ядерной физике, в частности при объяснении периодичности свойств химических элементов и механизма ядерных реакций. Однако она не единственная и также имеет свои ограничения, поскольку не в состоянии объяснить все типы взаимодействия нуклонов в ядре и истолковать свойства тяжелых ядер. Поэтому существуют и другие модели атомных ядер, например капельная, в представлении которой атомное ядро – это капля особой квантовой жидкости, задающая свойства ядра.

222



1. Какие открытия дали толчок развитию ядерной физики?
2. Дайте краткую физическую характеристику протону и нейтрону. Чем они отличаются друг от друга?
3. Что представляют собой изотопы?
4. Что такое нуклон? Каким образом можно найти число протонов и нейтронов, воспользовавшись Периодической таблицей элементов Д.И. Менделеева?
5. Дайте описание оболочечной модели ядра.
6. В чем состоит суть принципа Паули?

## § 71. Ядерные силы и энергия связи атомных ядер

Нуклоны в ядре удерживаются в связанном состоянии благодаря ядерным силам, являющимся проявлением одного из четырех фундаментальных взаимодействий – сильного взаимодействия. По своей природе они краткодействующие ( $r \sim 10^{-15}$  м), но очень интенсивные. В самом ядре они приблизительно в 100 раз сильнее кулоновского взаимодействия двух протонов и в  $10^{38}$  раз превышают силу их гравитационного взаимодействия. Однако за пределами атомного ядра они настолько малы, что их действием можно пренебречь.

Ядерные силы действуют между всеми нуклонами, независимо от наличия у них электрического заряда. Благодаря этому в атомном ядре удерживаются электрически нейтральные



нейтроны и не разлетаются одноименно заряженные протоны. Экспериментальные исследования сил ядерного взаимодействия протон-протонных, протон-нейтронных и нейтрон-нейтронных пар показали, что во всех этих случаях они одинаковые и не зависят от вида нуклона.

**Ядерные силы – краткодействующие, поскольку проявляют себя на расстояниях в пределах размеров атомного ядра ( $\sim 10^{-15}$  м).**



В 1935 г. японский физик Х. Юкава высказал предположение, что природа ядерных сил проявляется в обменном их характере. Т. е. наличие ядерных сил обуславливает частица ненулевой массы, которой обмениваются нуклоны между собой во время их взаимодействия в ядре.

Позднее, в 1947 г. такая частица была экспериментально обнаружена и названа *пи-мезоном*. Было выявлено, что в зависимости от типа взаимодействующей пары нуклонов (протон-протон, нейтрон-нейтрон, протон-нейтрон, нейтрон-протон) существует три вида пи-мезонов – положительный ( $\pi^+$ ), отрицательный ( $\pi^-$ ) и нейтральный ( $\pi^0$ ). Два первых имеют массу покоя, равную 274 массам электрона  $m_e$ , приблизительно эквивалентную 140 МэВ; масса покоя нейтрального пи-мезона равна 264  $m_e$ , что соответствует приблизительно 135 МэВ.

223

**Пи-мезоны иногда называют пионами.**



**Пи-мезоны – это кванты ядерного поля, подобно фотонам, которые являются квантами электромагнитного поля.**



Пи-мезоны не являются частицами, входящими в состав протонов и нейтронов. Они лишь проявляют себя в ядерном взаимодействии как обменные частицы, благодаря которым осуществляется сильное взаимодействие в атомном ядре.

Сильное взаимодействие является причиной объединения нуклонов в атомное ядро. Связанное состояние нуклонов в ядре характеризуется *энергией связи*, необходимой для того, чтобы удерживать протоны и нейтроны в таком состоянии.

**Энергия связи – это та минимальная энергия, которую необходимо израсходовать, чтобы разъединить ядро на отдельные нуклоны, которые его составляют.**



Если сравнить массу атомных ядер с суммой масс нуклонов, составляющих его по отдельности, то выяснится, что они отли-



чаются между собой: масса ядра всегда меньше суммарной массы свободных нуклонов. Т. е. если сложить массу всех  $Z$  протонов и  $N$  нейтронов, входящих в состав ядра, и сравнить ее с массой самого ядра  $m_{\text{я}}$ , то возникнет *дефект масс*  $\Delta m$ :

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}}.$$



**Точные измерения масс атомных ядер показали, что**  
 $m_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n$ .

Причина его возникновения состоит в том, что для образования ядра из отдельных свободных протонов и нейтронов необходимо выполнить работу, которая расходуется на их объединение. Она равна энергии связи, которая, учитывая формулу взаимосвязи массы и энергии, характеризуется дефектом масс  $\Delta m$ :

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2 = (Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}})c^2.$$



Отношение  $\frac{E_{\text{св}}}{A}$  называется *удельной энергией связи*.

Естественно, что энергия связи ядер у разных атомов неодинакова. Если воспользоваться понятием удельной энергии связи, т. е. разделить ее на количество нуклонов в ядре, то можно убедиться в существовании определенной ее зависимости от массового числа  $A$  (рис. 5.15).

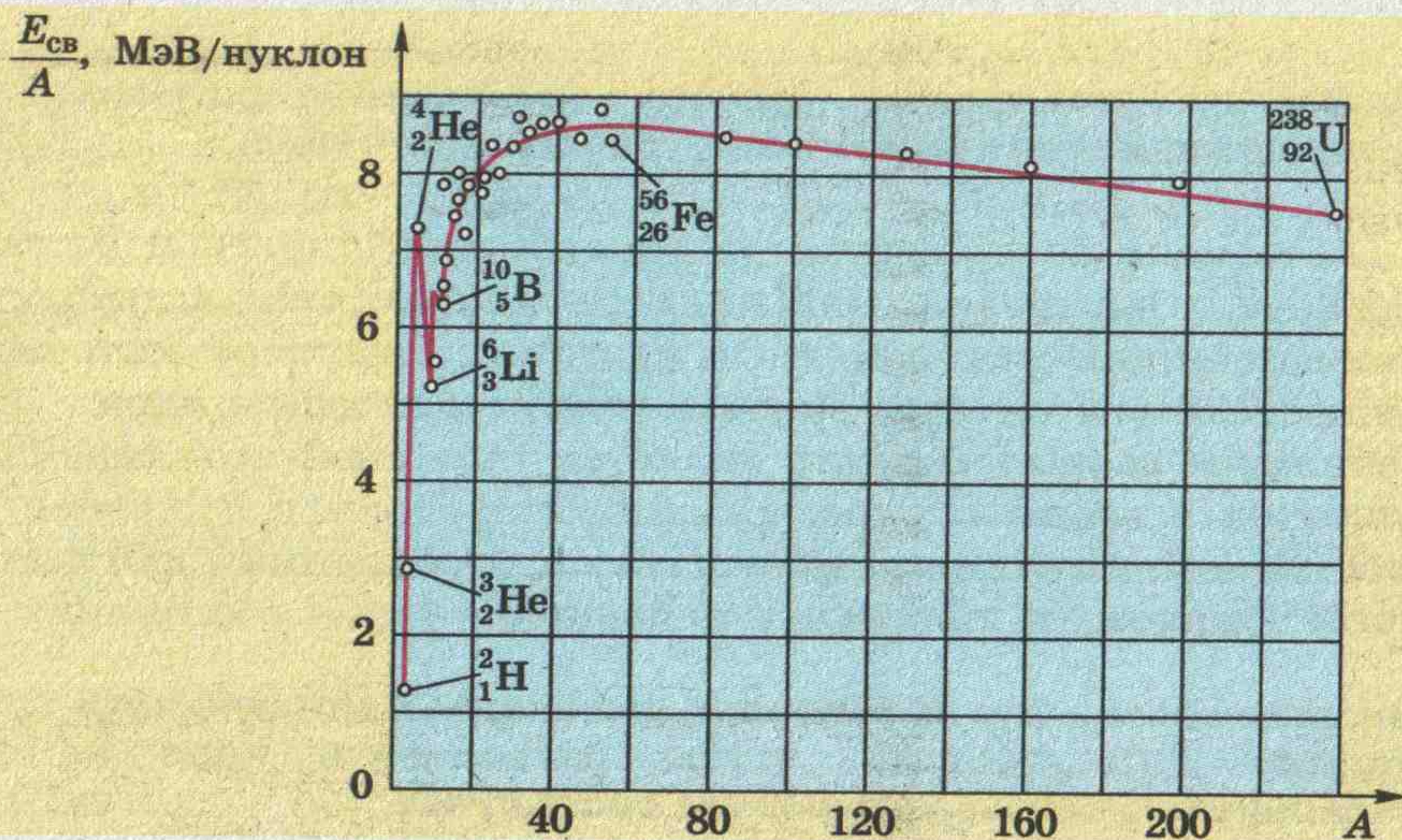


Рис. 5.15. Зависимость удельной энергии связи нуклонов в ядре от массового числа  $A$



Как видно из графика, сначала кривая резко возрастает и достигает максимума  $\left(8,6 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}\right)$  у изотопов химических элементов с массовым числом от 50 до 60 (Феррум и близкие к нему элементы). Далее, с возрастанием массового числа, кривая начинает плавно снижаться, достигая значения  $7,6 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$  у Урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$ . Данный вид кривой обусловлен закономерностями заполнения ядерных оболочек протонами и нейтронами согласно принципу Паули. Однако оболочечная модель ядра не смогла объяснить закономерности образования всех элементов Периодической системы Д.И. Менделеева. В частности, она оказалась беспомощной в отношении тяжелых элементов трансурановой группы и далее, где существенно проявляются силы кулоновского взаимодействия протонов.

1. Из каких частиц состоят атомные ядра? Чем они отличаются друг от друга? Какие парные взаимодействия нуклонов характерны для ядер?
2. Какие виды фундаментальных взаимодействий проявляются в атомном ядре? Каков их вклад в создание стабильного ядра?
3. Какова природа ядерных сил? Что является квантом сильного взаимодействия?
4. Почему возникает дефект масс? Чем это можно объяснить?
5. Какая зависимость существует между удельной энергией связи нуклонов в ядре и массовым числом?

225



## § 72. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада

Изучение свойств различных изотопов показало, что в природе существуют стабильные и нестабильные ядра химических элементов. Данное их качество обусловлено значением энергии связи ядер и соотношением у них числа протонов и нейтронов. Например, среди изотопов легких элементов стабильными являются те, что имеют приблизительно одинаковое количество протонов и нейтронов.

**Если в ядре преобладают протоны, то на его стабильность влияет также энергия кулоновского взаимодействия.**



Ядра тяжелых элементов, как правило, нестабильны, поскольку у них значительно преобладают нейтроны, а их излишек ве-



дет к возрастанию энергии ядра (ведь  $m_n > m_p$ ), которую оно пытается высвободить. Поэтому ядра отдельных изотопов могут самопроизвольно превращаться в другие химические элементы в результате излучения микрочастиц либо путем деления на более устойчивые образования. Такая их способность к самопроизвольным преобразованиям называется *радиоактивностью*.



**Радиоактивность** – от лат. *radio* – излучаю, *activus* – деятельный.

Радиоактивность бывает естественной, которая наблюдается при обычных условиях в природе, и искусственной, когда радиоактивные превращения происходят в результате внешнего воздействия, например при бомбардировке ядер стабильных изотопов протонами, нейтронами, другими частицами или ядрами химических элементов. С физической точки зрения принципиального отличия между ними не существует – механизм радиоактивных превращений у них одинаковый.

226



**Обозначения микрочастиц:**

${}^4_2\text{He}$  – альфа-частица

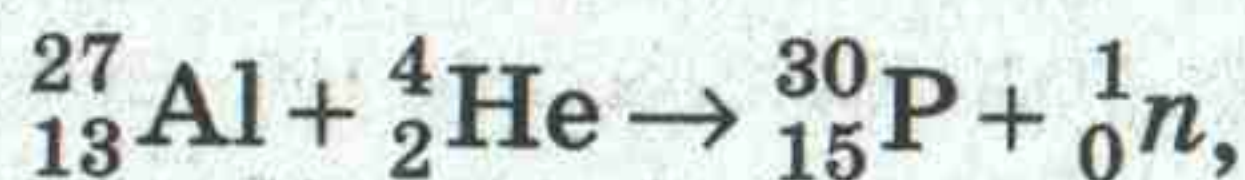
${}_0^1n$  – нейтрон

${}_1^1p$  – протон

${}_{-1}^0e$  – электрон

${}_1^0e$  – позитрон

Естественную радиоактивность солей урана впервые наблюдал А. Беккерель, а затем изучали М. Склодовская-Кюри и П. Кюри. Искусственную радиоактивность впервые получили в 1934 г. французские физики Фредерик и Ирен Жолио-Кюри. Они облучали альфа-частицами ядра изотопа алюминия  ${}^{27}_{13}\text{Al}$ , в результате чего получили нестабильный изотоп Фосфора  ${}^{30}_{15}\text{P}$ , который вследствие радиоактивного превращения испускал элементарную частицу, названную позитроном  ${}_1^0e$ :

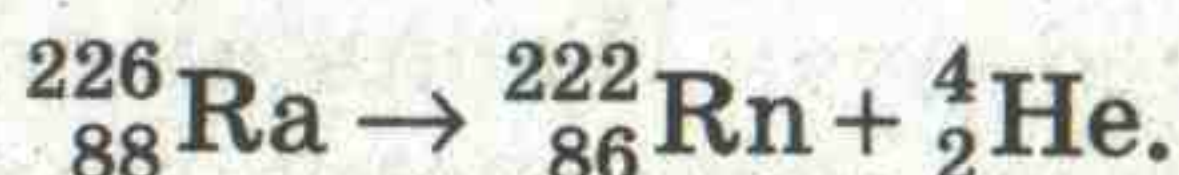


**Позитрон** – это элементарная частица, имеющая массу электрона и равный ему заряд, но противоположный по знаку.

Наиболее распространенными радиоактивными превращениями являются *альфа-распад*, *бета-распад* и *спонтанное деление ядер*.



**Альфа-распад** – это превращение нестабильного изотопа в иной химический элемент, сопровождающееся испусканием альфа-частицы. Например, в результате альфа-распада происходит превращение радия в радон:



Во время альфа-распада ядра его зарядовое число  $Z$  уменьшается на 2, а массовое число  $A$  – на 4, т. е. при образовании нового элемента  $Y$  выполняется правило смещения. Энергия, выделяемая за счет альфа-распада, распределяется между альфа-частицей и ядром созданного нового элемента. Данное превращение может сопровождаться также гамма-излучением.

**Бета-распад** – это превращение нейтрона в протон или протона в нейтрон, которое происходит в ядре и сопровождается образованием нового химического элемента. Существует две разновидности бета-распада:

1)  $\beta^-$ -распад, в результате которого высвобождается позитрон  ${}_{-1}^0e$  и образуется ядро элемента, количество протонов которого на 1 больше. Например:  ${}_{6}^{14}\text{C} \rightarrow {}_{7}^{14}\text{N} + {}_{-1}^0e + {}_0^0\tilde{\nu}_e$ .

Простейшим видом  $\beta^-$ -распада является распад свободного нейтрона, сопровождаемый испусканием элементарной частицы, названной антинейтрино:



2)  $\beta^+$ -распад, в результате которого высвобождается позитрон  ${}_1^0e$  и образуется ядро элемента, количество протонов которого на 1 меньше. Например:  ${}_{6}^{11}\text{C} \rightarrow {}_{5}^{11}\text{B} + {}_1^0e + {}_0^0\nu_e$ .

Микрочастицу, которая сопровождает  $\beta$ -распад с высвобождением позитрона, назвали нейтрино (обозначается  ${}_0^0\nu_e$ ). Существует также антинейтрино (обозначается  ${}_0^0\tilde{\nu}_e$ ), которая сопровождает электронный  $\beta^-$ -распад.



У тяжелых элементов при определенных условиях может произойти спонтанное деление ядер на несколько более легких ядер-осколков. Впервые данный вид радиоактивности выявили у ядер Урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , которые без какого-либо внешнего вмешательства делятся на более стойкие изотопы, как правило, средней части Периодической системы элементов Д.И. Менделеева. Например, ядро Урана может разделиться на два неодинаковых осколка – ядро Бария ( $Z = 56$ ) и ядро Криптона ( $Z = 36$ ), которые разлетаются в разные стороны, обладая значительной кинетической энергией.





Самопроизвольное деление ядер Урана  $^{235}_{92}\text{U}$  открыли в 1940 г. русские ученые Г.М. Флеров и К.А. Петржак.

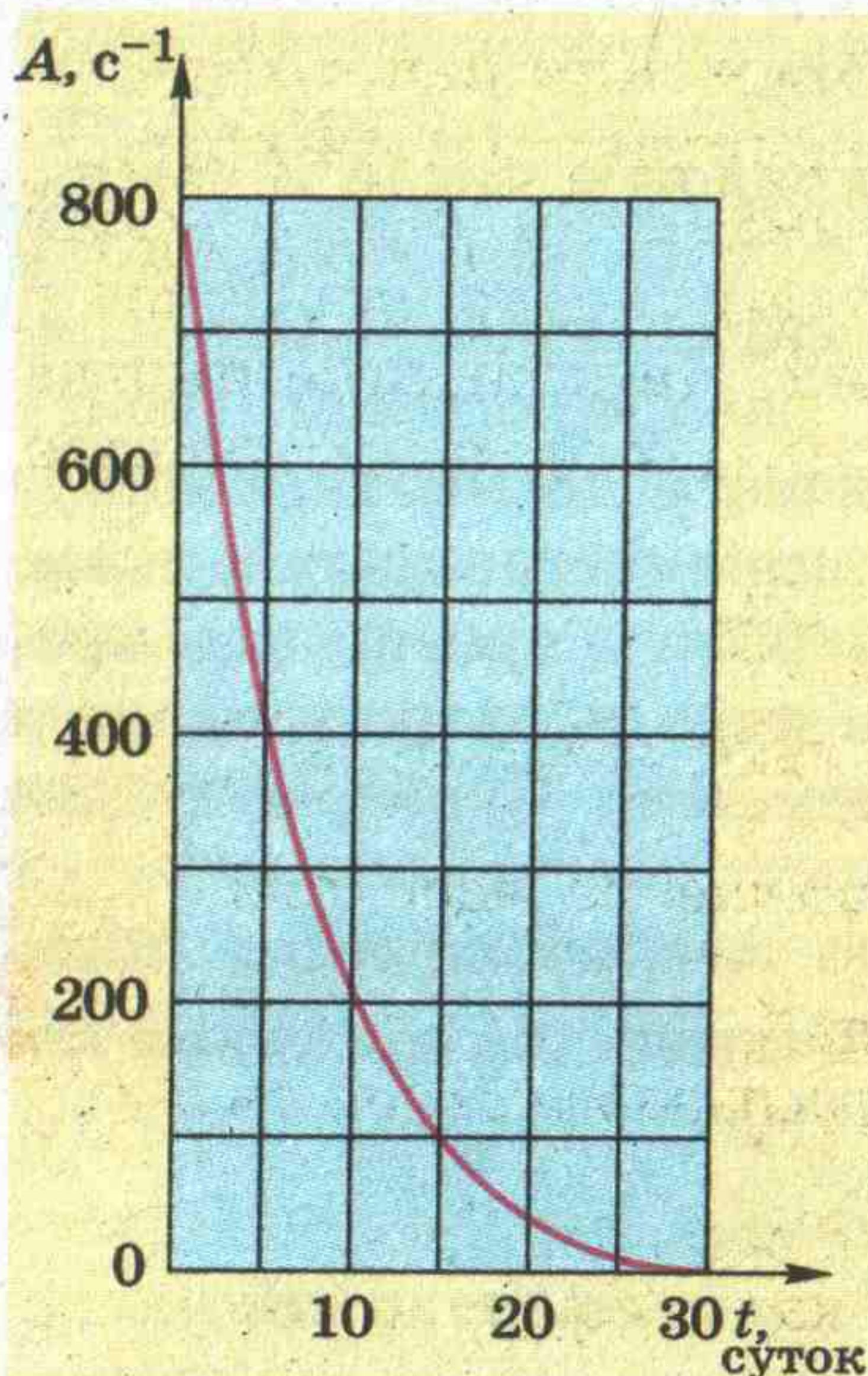


Рис. 5.16. Изменение количества ядер радиоактивного элемента со временем

Поскольку радиоактивные ядра все время распадаются, то их количество постоянно изменяется. Время жизни радиоактивных изотопов характеризуется *периодом полураспада*  $T$ . Это такое время, за которое количество ядер радиоактивного изотопа уменьшается в 2 раза (рис. 5.16). Объясним физический смысл данной величины детальнее. Если в начальный момент времени ( $t = 0$ ) было  $N_0$  радиоактивных ядер, то за период полураспада  $T$  их количество уменьшится в 2 раза и будет равно  $\frac{N_0}{2}$ ; еще через такое

же время  $T$  их уже будет  $\frac{N_0}{4}$  и т. д.

Т. е. за  $n$  периодов полураспада (где  $n = \frac{t}{T}$ ) останется только  $N$  ядер:

$$N = N_0 \frac{1}{2^n} = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}.$$

Данное математическое выражение отражает *закон радиоактивного распада*.



Период полураспада Урана  $^{238}_{92}\text{U}$  равен 4,5 млрд лет, Радия  $^{226}_{88}\text{Ra}$  – 1600 лет, Полония  $^{218}_{84}\text{Po}$  – лишь 3 мин.

Радиоактивные вещества отличаются между собой периодом полураспада: одни из них распадаются быстрее, другие – медленнее. Поэтому период полураспада  $T$  характеризует такое свойство как *активность радионуклида*. Данная величина указывает на интенсивность радиоактивных превращений, т. е. на количество радиоактивных распадов атомных ядер, происходящих за 1 с. Она прямо пропорциональна числу атомных ядер и обратно пропорциональна периоду полураспада, если он значительно больше времени наблюдения:

$$A = \frac{0,693 N}{T}.$$



Величина  $\frac{0,693}{T}$  называется постоянной распада радионуклида, а обратная ей величина  $\frac{T}{0,693}$  является временем жизни радионуклида. Она показывает, на протяжении какого времени количество ядер радионуклида уменьшится в 1,44 раза.

Активность радионуклида  $A$  в СИ измеряется в беккерелях (Бк). 1 беккерель равен активности такого радионуклида, у которого за 1 с происходит один распад. На практике иногда используют также единицу активности, которая называется кюри (Ки):

$$1 \text{ Ки} = 3,700 \cdot 10^{10} \text{ Бк.}$$

1. Какое явление называют радиоактивностью? Какие бывают виды радиоактивности?
2. Чем обусловлено радиоактивное превращение ядер при альфа-распаде?
3. В чем проявляется механизм бета-распада?
4. Каков физический смысл периода полураспада ядер? Что он характеризует?
5. В чем состоит суть закона радиоактивного распада?
6. Что такое активность радионуклида? В каких единицах она измеряется?

## § 73. Виды радиоактивного излучения. Дозиметрия

Открытие А. Беккерелем радиоактивного излучения солями Урана дало толчок разносторонним исследованиям данного явления другими учеными. В частности, сначала экспериментально выяснили его составляющие.

Различные радиоактивные элементы помещали в контейнер К с узкой щелью (рис. 5.17). За контейнером на пути лучей помещали фотопластинку Ф, при помощи которой можно было фиксировать их распространение. На выходе из контейнера создавали сильное магнитное поле, линии индукции которого были перпендикулярны к направлению распространения радиоактивных лучей.

Опытным путем было установлено, что в магнитном поле пучок радиоактивного излучения от разных источников распространяется неодинаково. В одних случаях радиоактивные лучи под дей-

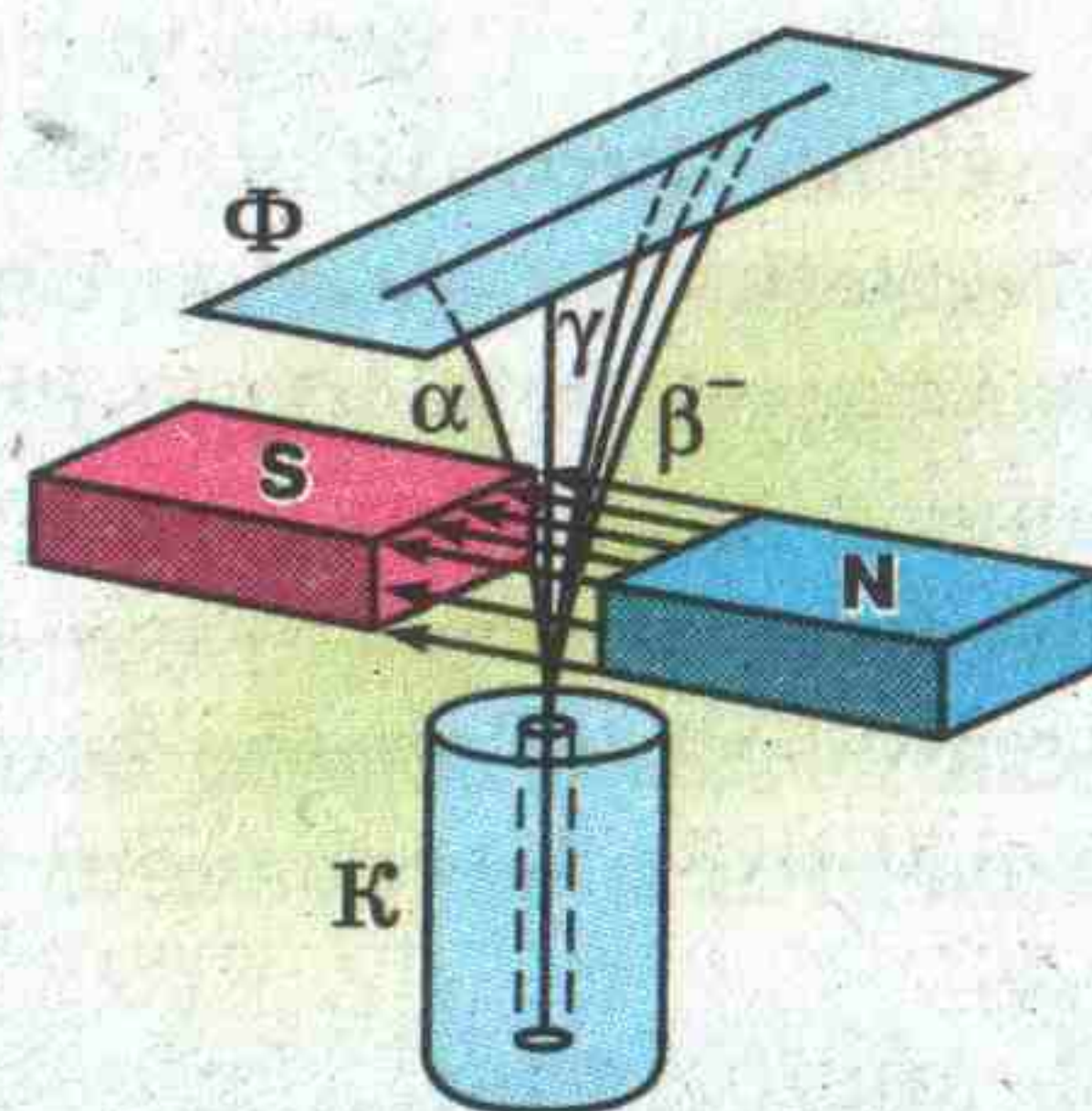


Рис. 5.17. Альфа-, бета-гамма-лучи



ствием магнитного поля отклоняются в разные стороны и на разные расстояния. В других – они распространяются прямолинейно, без отклонения. На основе данных опытных фактов можно сделать вывод, что существуют разные виды радиоактивного излучения: два из них являются потоком частиц, имеющих противоположные электрические заряды, а один – электрически нейтрален.

Выяснено, что радиоактивное излучение, которое несет положительный заряд и меньше всего отклоняется в магнитном поле, фактически является потоком альфа-частиц, т. е. ядер атома Гелия  ${}^4_2\text{He}$ . Его называли альфа-излучением.

**Альфа-, бета- и гамма-лучи представляют собой разновидности радиоактивного излучения.**

Те лучи, которые в магнитном поле отклоняются в разные стороны, но на одинаковое расстояние, являются потоком электронов и позитронов. Их называли бета-лучами. Электрически нейтральное излучение, которое распространяется в магнитном поле прямолинейно, без отклонений, названо гамма-лучами. Оно представляет собой электромагнитное излучение коротковолнового диапазона с длиной волны  $\lambda < 10^{-10}$  м.

Каждый из видов радиоактивного излучения отличается своими свойствами, в частности ионизационной и проникающей способностью, влияет на среду, в которой они распространяются. Проникая в вещество, они взаимодействуют с электронными оболочками и ядрами атомов, возбуждая их либо вызывая диссоциацию молекул, ядерные реакции, искусственную радиоактивность.

**В воздухе альфа-частица с энергией 4 МэВ имеет длину пробега 2,5 см; бета-частица с энергией 2 МэВ имеет длину пробега в алюминии лишь 3,5 мм.**

Альфа- и бета-частицы имеют малую длину пробега в веществе, поскольку во время их столкновений с электронными оболочками атомов они практически не отклоняются и теряют значительную часть своей энергии. Даже плотная ткань одежды почти полностью поглощает бета-излучение и совсем не пропускает альфа-лучи. Однако за счет своей энергии они легко возбуждают атомы вещества и поэтому очень опасны при проникновении в человеческий организм – легкие, желудок, на кожу.

**Гамма-излучение, несущее квант энергии 0,5 МэВ, ослабляется в 10 раз слоем воды толщиной 24 см, бетона – 12 см, свинца – 1,3 см.**



Гамма-лучи, взаимодействуя с электронными оболочками атома, способствуют образованию быстрых электронов, которые ионизируют окружающую среду. Они имеют большую проникающую способность и поэтому являются наиболее опасными для человеческого организма.

С целью определения влияния любого вида излучения на вещество применяют дозиметрические величины. Отношение энергии, которая передается веществу ионизирующим излучением, к массе данного вещества называется *поглощенной дозой излучения*:

$$D = \frac{E}{m}.$$

Поглощенная доза излучения в СИ измеряется в *грэях* (Гр): 1 Гр – это такая доза излучения, которая сообщает 1 кг вещества энергию ионизирующего излучения 1 Дж:

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}.$$

Существует внесистемная единица поглощенной дозы излучения – *рад*:

$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}.$$



231

Поглощенная доза излучения имеет свойство накапливаться со временем: при одинаковых условиях она тем больше, чем больше время облучения. Поэтому в дозиметрии используют также понятие *мощность дозы*, т. е. отношение ее к единице времени:

$$\dot{D} = \frac{D}{t}.$$

Интенсивность радиоактивного излучения оценивают также по его ионизирующей способности, поскольку физическое воздействие любого излучения на среду прежде всего связано с ионизацией атомов и молекул вещества. Данная характеристика называется *экспозиционной дозой*. В СИ она измеряется

в *кулонах на килограмм*  $\left(\frac{\text{Кл}}{\text{кг}}\right)$ :  $1 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$  равен экспозиционной дозе излучения, при воздействии которого в сухом атмосферном воздухе массой 1 кг создаются ионы, суммарный электрический заряд которых каждого знака равен 1 Кл.

На практике продолжают также использовать внесистемную единицу экспозиционной дозы – *рентген* (Р):

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}.$$

При дозе 1 Р в одном кубическом сантиметре сухого воздуха при нормальных условиях образуется  $2,08 \cdot 10^9$  пар ионов.





Биологическое действие различных видов радиоактивного излучения на живые организмы неодинаковое даже при равной поглощенной дозе. Поэтому для оценивания радиоактивной опасности следует также учитывать вид ионизирующего излучения и его мощность. В дозиметрии принято их сравнивать с рентгеновским или гамма-излучением, введя единицу, которая получила название *биологического эквивалента рентгена* (сокращенно – бэр). В зависимости от вида излучения вводят коэффициент биологической эффективности, значение которого определяют экспериментально, учитывая энергию частиц.



**Для рентгеновского и гамма-излучений:**

$$1 \text{ бэр} = 1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр.}$$

232

Влияние радиоактивного излучения на живые организмы вызвано не столько значением энергии, передаваемой веществу, сколько его ионизирующим воздействием на живые клетки. В результате ионизации в них происходят биологические изменения, вызванные образованием новых радикалов, которыми не обладают обычные клетки. Поэтому нарушается функция ее деления, которое может вызвать раковое перерождение клетки.

Смертельной для человеческого организма считается доза, эквивалентная 6 Гр гамма-излучения или 600 бэрам. При этом необходимо учитывать время, в течение которого данная доза получена, а также качественные параметры излучения (вид излучения, энергию частиц и т. д.). Данная доза будет меньше, если облучение кратковременное и действует на весь человеческий организм.



**Для населения предельно допустимой дозой систематического облучения принята эквивалентная доза 0,5 бэр в час.**

Вместе с тем такая доза, полученная на протяжении всей жизни, считается неопасной, поскольку не ведет к ощутимым изменениям организма. Ведь благодаря естественному радиационному фону (космические лучи, радиоактивные изотопы земной коры, радоновое излучение в атмосфере, промышленные радиоактивные загрязнения и т. д.) все живое на планете Земля постоянно находится под действием радиоактивного излучения. Например, радиационный фон в Украине характеризуется мощностью излучения от 0,1 до 0,3 мР/ч.

Следует отметить, что влияние радиоактивного излучения на живые организмы приводит не только к негативным последствиям. В малых дозах его применяют при лечении на микробиологическом уровне, в агротехнологиях выращивания расте-



ний и животных, когда благодаря облучению вызывают мутацию генов, в медицинской диагностике и т. п. Более того, опыты по выращиванию растений в условиях ограниченной радиации показали, что их развитие замедляется и продуктивность снижается. Т. е. на Земле под действием естественного радиационного фона происходила эволюция живой природы таким образом, что отсутствие радиации негативно отражается на развитии организмов.

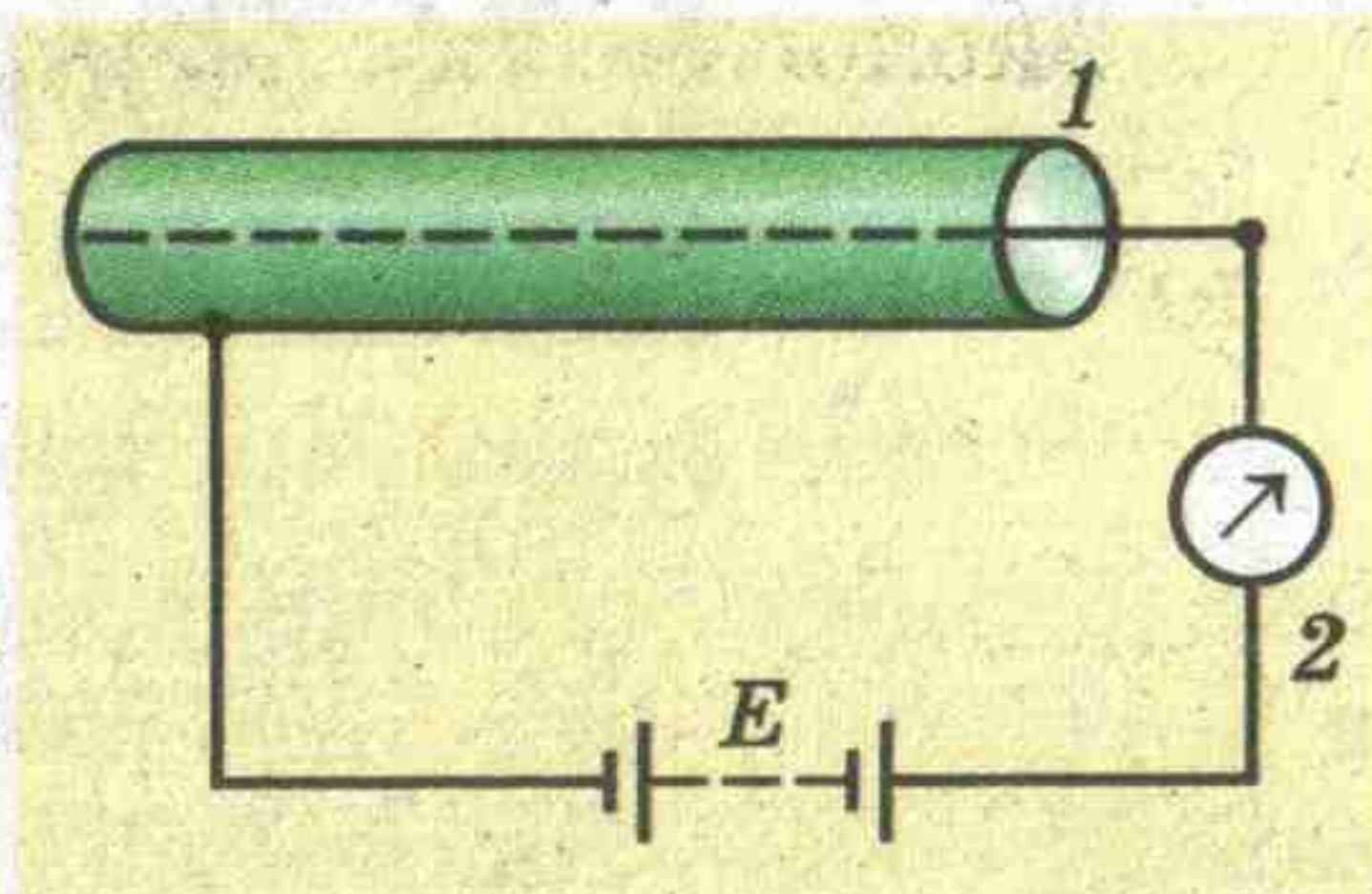


Рис. 5.18. Схема дозиметра

Измерение характеристик радиоактивного излучения производят при помощи дозиметрических приборов – *дозиметров*. Основным их конструктивным элементом (рис. 5.18) являются устройства для регистрации ионизирующего излучения – детекторы. Чаще всего с этой целью используют ионизационные детекторы (ионизационные камеры, счетчики Гейгера и т. д.). Это, как правило, цилиндрические конденсаторы, заполненные воздухом или газом, на электроды которых подано напряжение. Частица, попадая в пространство между обкладками конденсатора, ионизирует находящийся там газ, в результате чего в цепи возникает импульс тока. В цепь детектора 1 включен измерительный прибор 2, фиксирующий интенсивность ионизирующего излучения по силе тока. Шкала дозиметра градуируется таким образом, чтобы преобразовать значение силы тока в соответствующие дозиметрические величины – активность радионуклида, экспозиционную или эквивалентную дозу излучения, мощность дозы и т. п.

1. Какие разновидности лучей присутствуют в радиоактивном излучении? Что они собой представляют?
2. Какое влияние оказывает радиоактивное излучение на вещество?
3. Какие дозиметрические величины характеризуют радиоактивное излучение? В каких единицах они измеряются?
4. Чем объясняется различное действие альфа-, бета- и гамма-лучей на живые организмы?
5. Почему существует опасность при радиоактивном облучении человека? Каковы допустимые нормы облучения для населения?
6. Как устроены дозиметрические приборы? Что является основным конструктивным элементом таких приборов?



## § 74. Ядерные реакции. Деление ядер Урана

Одним из наиболее удивительных следствий ядерной физики стало превращение атомных ядер одних элементов в другие в результате взаимодействия с микрочастицами либо между собой. Данное явление получило название *ядерной реакции*. Впервые его наблюдал Э. Резерфорд в 1919 г. во время бомбардирования альфа-частицами ядер Азота. Однако особое значение оно приобрело позже, когда выяснилась возможность использования ядерных реакций в энергетике.

**Исторически первая ядерная реакция:**



В отличие от радиоактивного распада, который протекает самопроизвольно, ядерные реакции происходят в результате внешнего воздействия, например бомбардирования ядер микрочастицами. Ядерная реакция может произойти лишь при определенных условиях – при сближении частиц на расстояние действия ядерных сил ( $10^{-15}$  м) и преодолении ими энергетических барьеров. Для положительно заряженных частиц необходимо преодолеть также силы отталкивания кулоновского взаимодействия; незаряженные частицы могут проникнуть в ядро, имея незначительную кинетическую энергию.

**В результате ядерной реакции образуется новое ядро – продукт реакции, а также излучаются частицы и гамма-кванты.**

Механизм ядерных реакций состоит в поглощении частицы ядром, в результате которого оно возбуждается. Сначала происходит перераспределение переданной ядру энергии между всеми нуклонами. Такое ядро становится неустойчивым и со временем распадается. Может случиться так, что один из нуклонов либо их группа вследствие перераспределения приобретает энергию, большую энергии связи ядра. Тогда становится возможным выброс данного нуклона или их группы из ядра, т. е. ядерная реакция сопровождается испусканием либо протона, либо нейтрона, либо альфа-частицы.

Во время ядерных реакций выполняются законы сохранения энергии, импульса, момента импульса, зарядового числа, которые определяют конечные продукты реакции и ее энергетический выход. Они происходят с поглощением или выделением энергии, в миллионы раз превышающей энергетические последствия химических реакций.



**Момент импульса атомных ядер отображается квантовым числом, которое имеет название спин.**



Энергетически выгодными являются реакции, в результате которых энергия выделяется. *Энергетический выход* таких реакций вычисляется как разность энергий ядер и частиц до реакции и после нее: если она положительная, то энергия выделяется.

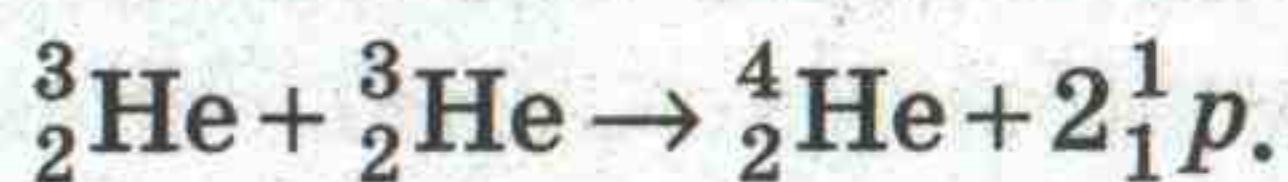
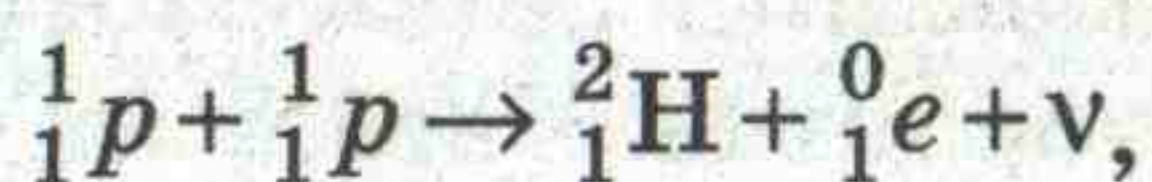
Во время ядерных реакций может произойти слияние ядер (реакция синтеза) либо их деление. Реакция синтеза легких ядер называется *термоядерной реакцией*. Чтобы произошла «перестройка» легких ядер вследствие их парных столкновений, необходимо преодолеть кулоновское отталкивание между ними и сблизить их на расстояние действия ядерных сил. Поэтому термоядерные реакции требуют высоких энергий взаимодействующих ядер либо высоких температур ( $10^8$  К и выше). В обычных земных условиях достичь таких температур можно лишь при помощи ядерного взрыва (такая реакция будет неуправляемой) или в мощном импульсе лазерного излучения (управляемая термоядерная реакция синтеза).

235

**Первая термоядерная реакция была осуществлена в 1932 г. на быстрых протонах:**



В естественных условиях термоядерные реакции синтеза происходят в недрах звезд и являются основным источником их энергии. Например, у Солнца основным является превращение четырех протонов в ядро Гелия, сопровождаемое выделением энергии свыше 26 МэВ за один цикл:



Ядерную реакцию деления атомных ядер впервые осуществили в 1939 г. немецкие ученые О. Ган и Ф. Штрассман. Они выяснили, что при бомбардировке ядер Урана нейтронами те делятся на два приблизительно равных осколка (рис. 5.19). При каждом таком делении высвобождается 2–3 нейтрона и приблизительно 200 МэВ энергии. Ф. Жолио-Кюри предположил, что благодаря потоку высвободившихся нейтронов ядерная реакция деления ядер Урана может развиваться как *цепная*.

Для того чтобы цепная реакция развивалась, необходимо поддерживать неизменным поток нейтронов и создавать условия,



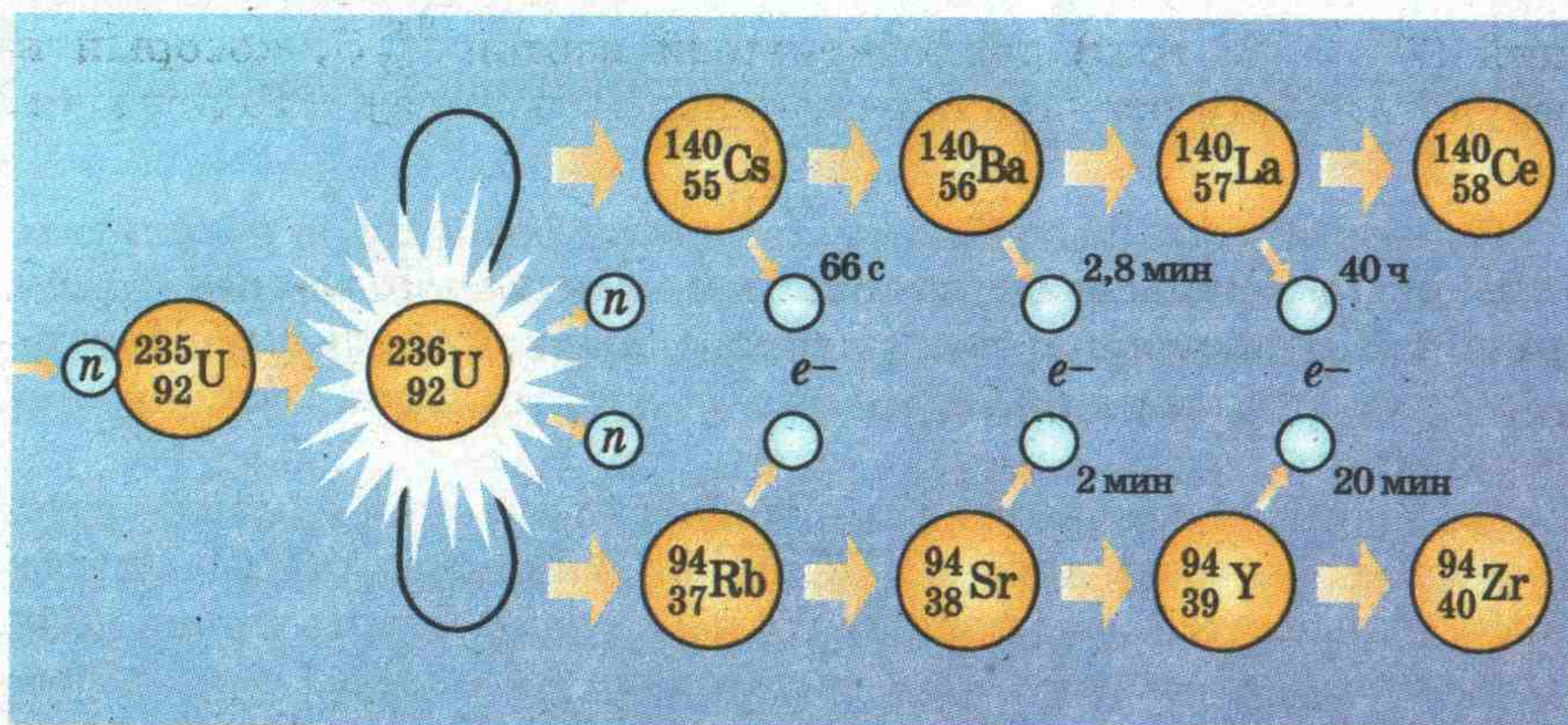


Рис. 5.19. Реакция деления ядер Урана

236

при которых они проникают в ядра Урана. С этой целью требуется определенная масса Урана, помещенная в ограниченное пространство. Тогда нейтроны не смогут пролетать мимо ядер, будут проникать в них, вызывая дальнейшее деление. Минимальная масса, при которой цепная реакция будет протекать самопроизвольно, называется *критической массой*.

**Для Урана-235 критическая масса равна приблизительно 50 кг. Радиус сферы такой массы равен около 8,5 см.**

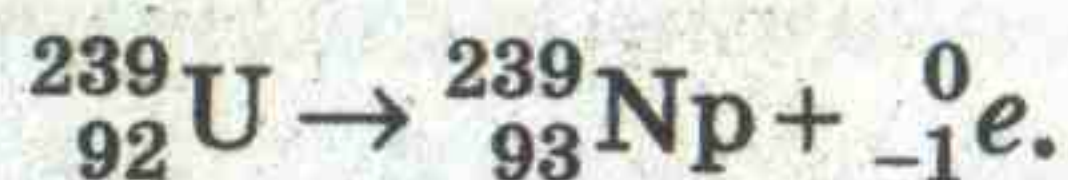
Осуществление цепной реакции деления ядер Урана — достаточно сложный процесс. Ведь медленные нейтроны, высвобождаемые в процессе ядерной реакции, могут вызывать деление только ядер Урана  $^{235}_{92}\text{U}$ ; для деления ядер  $^{238}_{92}\text{U}$  нужны быстрые нейтроны с энергией выше 1 МэВ. Поскольку добываемый уран состоит из двух изотопов — 99,3 % Урана-238 и 0,7 % Урана-235, то для поддержания цепной ядерной реакции необходимо удовлетворить хотя бы двум условиям — достичь критической массы и обеспечить, чтобы число высвободившихся нейтронов было достаточным для поддержания реакции, а их поток не уменьшался со временем.

**Трансурановые элементы** — это химические элементы, находящиеся в Периодической таблице Д.И. Менделеева после Урана ( $Z > 92$ ).

Медленные нейтроны не вызывают деления ядер  $^{238}_{92}\text{U}$ . Однако их захват данным изотопом ведет к образованию *трансурановых элементов*. Сначала возникает короткоживу-



щий ( $T_{0,5} = 23$  мин) радиоактивный изотоп  $^{239}_{92}\text{U}$ , который в результате бета-распада образует новый элемент – Нептуний:



В свою очередь неустойчивый изотоп Нептуния  $^{239}_{93}\text{Np}$  (рис. 5.20) превращается в относительно стабильный Плутоний  $^{239}_{94}\text{Pu}$  ( $T_{0,5} = 24\,000$  лет):

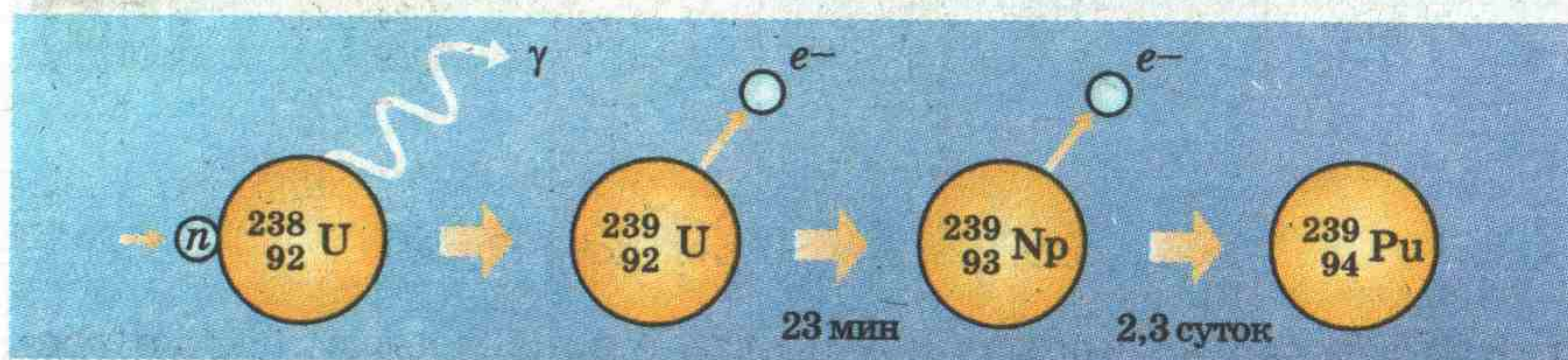


Рис. 5.20. Превращение Урана-238 в Плутоний-239

Ядерная реакция получения Плутония в настоящее время широко используется в современных ядерных реакторах-размножителях.

237

1. Какое явление получило название ядерной реакции? Чем оно отличается от радиоактивного распада?
2. Что такое энергетический выход ядерной реакции?
3. Какие бывают виды ядерных реакций? Приведите их примеры.
4. Каковы условия возникновения и поддержания цепной ядерной реакции?
5. Что представляют собой трансурановые элементы?



## § 75. Ядерный реактор.

### Ядерная энергетика и экологическая безопасность

Человечество сделало существенный шаг вперед, когда смогло укротить ядерную энергию. В 1942 г. под руководством Э. Ферми в США был построен первый ядерный реактор, благодаря которому цепная реакция деления ядер Урана стала управляемой. Это послужило толчком к бурному развитию атомной (ядерной) энергетики.

Ядерный реактор состоит из активной зоны, где собственно и происходит ядерная реакция, отражателей и замедлителей нейтронов, защитного кожуха. Для получения электроэнергии на атомных электростанциях ядерный реактор объединяют с



парогенератором, турбиной и электрическим генератором (рис. 5.21). В основу принципа действия атомной электростанции положено использование выделяемой в результате ядерной реакции энергии для производства электрической энергии.

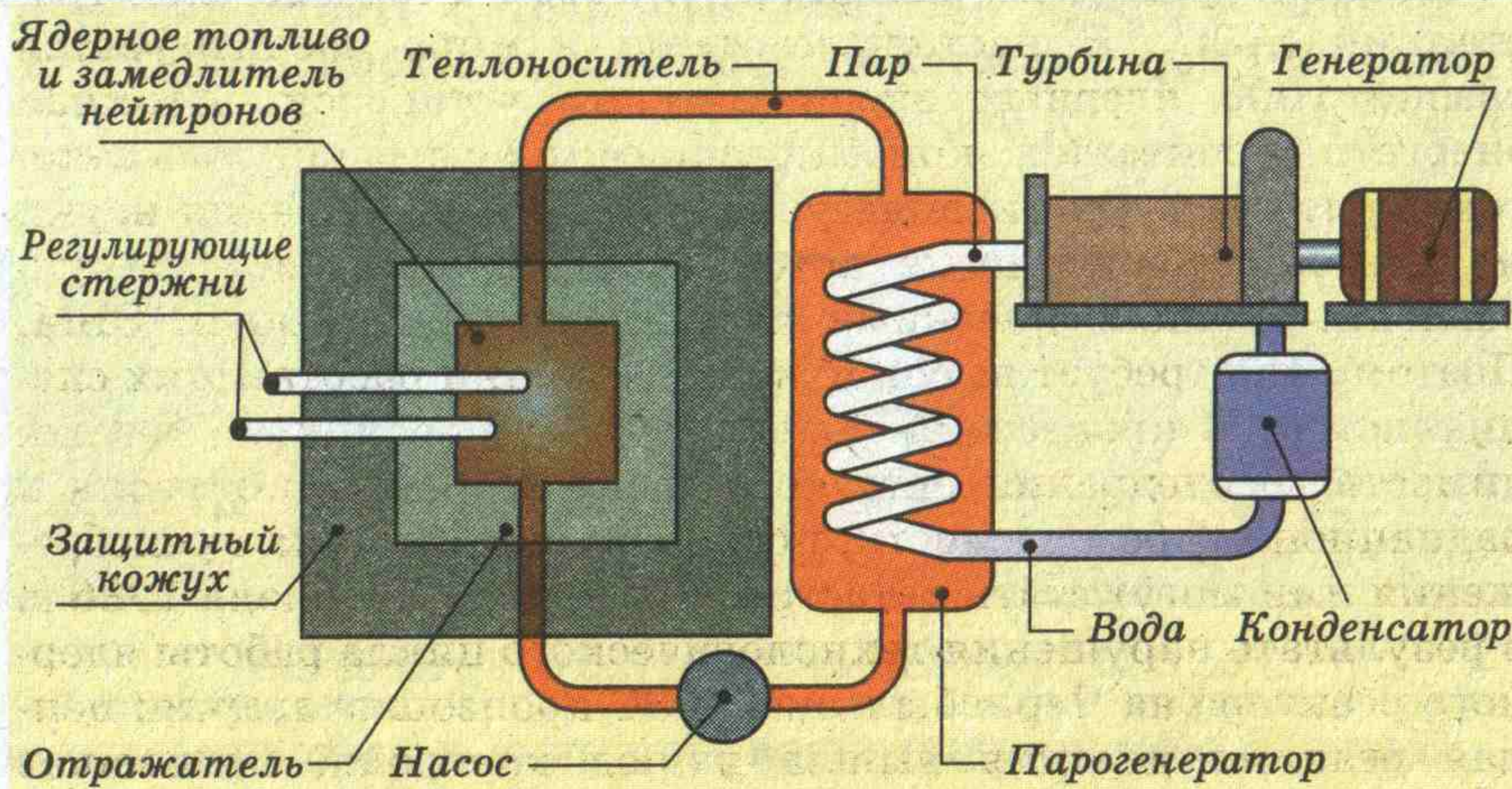


Рис. 5.21. Схема атомной электростанции

**Первый в Европе ядерный реактор был построен в 1946 г. под руководством И.В. Курчатова в Обнинске (Россия).**

В активную зону реактора загружают ядерное топливо — обогащенный Уран-235 в виде тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) и вещество, замедляющее нейтроны (графит или так называемую тяжелую воду), поскольку ядра изотопа Урана-235 лучше захватывают медленные нейтроны.

Чтобы цепная реакция была управляемой, необходимо регулировать количество нейтронов в активной зоне. С этой целью в нее вводят регулирующие стержни из металла, хорошо поглощающего нейтроны (Кадмий или Бор). Изменяя глубину их введения, можно влиять на поток нейтронов, следовательно, управлять протеканием цепной реакции.

**Мощность ядерного реактора, равная 1 МВт, соответствует такой цепной реакции, в результате которой за 1 с происходит  $3 \cdot 10^{16}$  актов деления ядер.**

Энергия, выделяемая в результате деления ядер Урана, при помощи теплоносителя передается парогенератору. Выработанный им водяной пар направляется на лопасти паровой турбины, к которой присоединен электрогенератор, выраба-



тывающий электроэнергию. Таким образом, в результате нескольких преобразований энергия, выделяемая за счет деления атомных ядер, превращается в электрическую. Благодаря электросетям она поступает потребителям.

Ядерные реакторы являются основой атомных электростанций (АЭС). В настоящее время в мире насчитывается свыше 1000 ядерных энергетических установок. Атомная энергетика считается экономически самой выгодной и высокотехнологичной. Она использует последние достижения науки и техники, современные автоматизированные системы управления технологическими процессами при помощи ЭВМ. Поэтому она требует высокой квалификации работающих специалистов. В процессе эксплуатации АЭС возникает необходимость во внедрении широкого спектра средств контроля и радиационной безопасности, поскольку последствия пренебрежения ими могут стать катастрофическими. 26 апреля 1986 г. в результате нарушения технологического цикла работы ядерного реактора на Чернобыльской АЭС произошла авария: цепная реакция деления вышла из-под контроля, произошел взрыв. Устранение последствий катастрофы унесло множество жизней людей, а ее экологические последствия ощущаются до сих пор.

239

С 2001 г. Чернобыльская АЭС не работает, ее вывели из эксплуатации, но продолжают работы по консервации разрушенного блока, строительству над ним защитного укрытия.



1. Каково назначение ядерного реактора? Из каких конструктивных элементов он состоит?
2. Каким образом достигается управляемость цепной ядерной реакции?
3. Что вам известно о Чернобыльской катастрофе?



## § 76. Элементарные частицы

С давних времен ученые пытались найти наименьшие «кирпичики» материи, при помощи которых можно понять иерархическую структуру строения вещества. Сначала у древних греков (Демокрит, Эпикур) такими неделимыми частицами считались атомы, из которых, по их убеждениям, состоят все тела. В начале XIX в. данное понятие конкретизировали химики, которые считали атомы наименьшими частицами вещества, определяющими его химические свойства (Я. Берцелиус, Дж. Дальтон, А. Авогадро).





**История физики отображает сложный путь развития взглядов на строение материального мира, поиск элементарных частиц, из которых он состоит.**

В конце XIX в., после открытия электрона (Дж. Томсон) и исследования явления радиоактивности (А. Беккерель, М. Склодовская-Кюри, П. Кюри), ученые подвергли сомнению элементарность атома и предположили, что он также имеет сложное строение. В начале XX в. Э. Резерфорд подтвердил это экспериментально и предложил ядерную модель атома, которая считает ядро также сложным образованием. В 1919 г. он открыл протон – нуклон, имеющий положительный заряд. Другая частица – нейтрон, входящая в состав ядра, была открыта в 1932 г. Дж. Чедвиком.

240

Для объяснения обменного характера сильного взаимодействия нуклонов в ядре Х. Юкава в 1935 г. выдвинул гипотезу о существовании пи-мезонов, которые были обнаружены в 1947 г. в космических лучах (С. Пауэл). Немного раньше, в 1932 г. в составе космического излучения была обнаружена первая античастица – позитрон (К. Андерсон). В целом, исследования космического излучения в 40–50-х годах XX в., которые выявили множество новых микрочастиц, побудило ученых иначе посмотреть на проблему их элементарности. Согласно современным представлениям – это не просто первоначальные неделимые частицы, составляющие вещество, а специфические объекты, которым кроме всего прочего присуще *слабое взаимодействие* как особый вид фундаментального взаимодействия.



**В настоящее время известно более 350 элементарных частиц и их количество продолжает расти.**

По своей интенсивности слабое взаимодействие во много раз меньше сильного и электромагнитного взаимодействия. Однако оно значительно сильнее гравитационного притяжения, поскольку массы элементарных частиц очень малы и радиус их взаимодействия равен лишь  $10^{-18}$  м.



**По сравнению с другими видами фундаментальных взаимодействий слабое взаимодействие вызывает процессы, которые протекают медленнее (приблизительно  $10^{-10}$  с).**

Все элементарные частицы обладают малыми размерами (у большинства из них  $\sim 10^{-15}$  м) и незначительными массами. Это обуславливает квантовую специфику их поведения – они подчиняются квантовым закономерностям. Они образуются



(излучаются) или исчезают (поглощаются) в результате взаимодействия.

Общими характеристиками элементарных частиц является их *масса  $m$ , электрический заряд  $q$ , спин  $j$  и время жизни  $\tau$* . Отдельные из них характеризуются также особыми величинами, например, лептонный заряд, барионный заряд и т. п. Как правило, их отображают в относительных единицах, кратных определенным значениям, например, массе или электрическому заряду электрона, постоянной Планка или др.

**Массу элементарных частиц выражают в электрон-вольтах либо числом, кратным массе электрона  $m_e$ ; электрический заряд – в единицах, кратных заряду электрона  $e$ ; спин – кратный значению постоянной Планка  $\hbar$ .**



Таким образом, каждая элементарная частица обладает набором дискретных квантовых чисел, которые однозначно определяют ее специфические свойства. На их основе элементарные частицы можно определенным образом классифицировать (см. таблицу на форзаце).

В зависимости от присущего им типа взаимодействия все элементарные частицы, кроме фотона, делятся на две основные группы: *адроны*, участвующие во всех типах взаимодействий – гравитационном, электромагнитном, сильном и слабом, и *лептоны*, которые характеризуют только сильное взаимодействие.

По времени жизни элементарные частицы делят на *стабильные* (фотон, электрон, протон, нейтрино, нейтрон как относительно стабильный), *квазистабильные* ( $\tau > 10^{-20}$  с), которые распадаются вследствие электромагнитного или слабого взаимодействия, и *нестабильные* ( $\tau < 10^{-22}$  с), которые распадаются благодаря сильному взаимодействию.

В физике имеют место и другие классификации элементарных частиц. В частности, по знаку заряда их можно разделить на частицы и античастицы (электрон–позитрон, нейтрино–антинейтрино); по значению спинового квантового числа, которое может быть целым или полуцелым, адроны делятся на *бозоны* и *барионы*. Бозоны с нулевым спином называют мезонами. Данную классификацию можно продолжить, основываясь на различных квантовых числах.

В последние годы исследование элементарных частиц высоких энергий ( $\sim 10$  ГэВ) с помощью ускорителей показало, что лептоны не имеют какой-либо структуры. Т. е. это действительно элементарные частицы. Вместе с тем адроны проявили свойства, указывающие на то, что они имеют некоторую структуру и состоят из нескольких «более элементарных» частиц. В 1964 г. американские ученые М. Гелл-Манн и Дж. Цвейг независимо друг от друга предложили кварковую



модель адронов. Они считали, что все адроны можно представить как комбинацию трех кварков (для барионов) либо кварка и антикварка (для мезонов). Первым трем кваркам были присвоены имена:  $u$ ,  $d$ ,  $s$ .



Названия кварков происходят от английских слов *up* – вверх, *down* – вниз, *strange* – удивительный, *charm* – очарование, *beauty* – привлекательный, красивый, *truth* – истина.

Позже выяснилось, что построить все разнообразие элементарных частиц с помощью трех кварков не удастся, и поэтому их набор дополнили еще тремя –  $c$ ,  $b$ ,  $t$ . Совокупность из шести кварков и их антикварков позволяет раскрыть сложную структуру всех известных сегодня адронов.

Таким образом, исследования элементарных частиц и объяснение механизмов их превращения в результате слабого взаимодействия позволяют целостно представить современную физическую картину мира на основе четырех фундаментальных взаимодействий. Вместе с тем попытки их объединения в единую физическую теорию (так называемое «Большое объединение»), которая бы смогла дать целостное толкование законов физического мира, не увенчались успехом, хотя отдельные сдвиги в данном направлении имеются. Например, в конце XX в. была создана единая теория электромагнитного и слабого (электрослабого) взаимодействия. Квантовое описание гравитационного взаимодействия на основе гипотетических частиц – гравитонов приближает ученых к целостному пониманию картины мира как единой физической сущности природы.

242



1. Каким образом в физике развивались представления об иерархической структуре вещества с точки зрения поиска его наименьших частиц?
2. Какой тип фундаментального взаимодействия характерен для элементарных частиц? Дайте его краткую характеристику.
3. Набор каких величин определяет свойства элементарных частиц?
4. На какие две основные группы делятся элементарные частицы? Какие еще классификации элементарных частиц могут быть?
5. В чем состоит сущность кварковой модели элементарных частиц?

### Упражнение 31

1. Каков состав ядер атомов Al, Au, Cs?
2. Чем отличается ядро атома Урана-235 от ядра атома Урана-238?
3. Найти энергию связи ядра Лития, если масса его ядра равна  $11,6475 \cdot 10^{-27}$  кг.



4. Атомная масса Хлора равна 35,45 а. е. м. Хлор имеет два изотопа:  $^{35}_{17}\text{Cl}$  и  $^{37}_{17}\text{Cl}$ . Какое их процентное соотношение?

5. Найти дефект масс ядра Неона и энергию связи его ядра (в джоулях и МэВ), приходящуюся на 1 нуклон, если масса его ядра равна  $m_{\text{Ne}} = 33,1888 \cdot 10^{-27}$  кг.

6. Изотопы каких элементов образуются из радиоактивного изотопа  $^7_3\text{Li}$  в результате его бета-электронного распада и последующего альфа-распада? Записать эти реакции.

7. Активность радиоактивного элемента за 8 суток уменьшилась в 4 раза. Какой он имеет период полураспада?

8. Период полураспада радиоактивного Купрума составляет 10 мин. Какая часть от начального его количества останется через 1 ч?

9. Какие ядра рождаются из радиоактивного Радия в результате пяти последовательных альфа-распадов и четырех бета-электронных распадов?

10. Сколько энергии выделяется во время синтеза 1 г Гелия из Дейтерия и Трития? Сколько угля надо сжечь, чтобы получить такую же энергию? Удельная теплота сгорания угля равна  $30 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ .

11. Мощность дозы гамма-излучения в зоне радиоактивного заражения равна  $0,2 \frac{\text{мГр}}{\text{ч}}$ . Сколько времени может находиться человек в данной зоне, если предельная доза равна 0,25 Гр?

12. Сравните энергии гравитационного, кулоновского и сильного взаимодействия между двумя протонами в ядре.



## Главное в разделе 5

1. Экспериментальные исследования Э. Резерфорда и его сотрудников, теоретические обобщения Н. Бора, Р. Шредингера, Л. де Бройля, В.К. Гейзенберга и других ученых создали фундамент для развития в начале XX в. атомной физики как квантовой теории. Этому предшествовали открытия X-лучей В.К. Рентгеном и И. Пулюем (1895 г.), названных позже рентгеновскими, радиоактивности А. Беккерелем (1896 г.), электрона Дж. Томсоном (1897 г.).

В 1911 г. Э. Резерфорд, опираясь на полученные им экспериментальные факты, предложил ядерную модель атома: *атом состоит из позитивно заряженного ядра, вокруг которого вращаются электроны.*

2. В 1913 г. Н. Бор сформулировал квантовые постулаты:

- атомы находятся в определенных стационарных состояниях, в которых они не излучают электромагнитные волны;
- при переходе атома из одного стационарного состояния, характеризуемого энергией  $E_n$ , в другое с энергией  $E_m$  он излучает или поглощает квант, равный  $h\nu = E_n - E_m$ .

Данные постулаты связали между собой ядерную модель атома Резерфорда, построенную на классической теории, и квантовый характер изменений, которому подчиняется внутреннее состояние атома. Все это было подтверждено экспериментально. Первый постулат был подтвержден опытами Д. Франка и Г. Герца. Второй постулат объяснил закономерности линейчатых спектров, природу которых классическая физика не могла объяснить.

3. В общем спектры электромагнитных волн разделяют на спектры излучения, спектры поглощения, спектры рассеивания и спектры отражения. Они могут быть сплошными, охватывая широкий диапазон длин волн, линейчатыми, состоящими из отдельных спектральных линий определенной длины волны  $\lambda$ , и полосатыми, т. е. набором отдельных полос, принадлежащих некоторому интервалу длин волн.

Механизм образования сплошных оптических спектров в силах могла объяснить классическая физика: поглощенное электромагнитное излучение возбуждает в веществе волны, частота которых соответствует частоте падающего света. Однако она оказалась бессильной при объяснении линейчатых и полосатых спектров. Их природу можно понять лишь на основе квантовых постулатов Н. Бора: *атом или молекула излучают либо поглощают свет в результате их квантового перехода из одного состояния в другое; частота излучения определя-*



ется разностью значений энергии между энергетическими уровнями атомов и молекул:  $\nu = \frac{E_m - E_n}{h}$ .

4. Самопроизвольный переход атомов или молекул из одного энергетического состояния в другое сопровождается, как правило, спонтанным излучением кванта света определенной частоты. Поскольку это происходит произвольно с каждым атомом, то обычно *спонтанное излучение света атомами в совокупности является разночастотным, немонохроматичным и некогерентным по своей природе.*

Вместе с тем при определенных условиях излучение может быть вынужденным, **индуцированным**, если электрон в атоме перейдет из одного энергетического уровня на другой под действием внешнего электромагнитного поля, частота которого совпадает с собственной частотой квантового перехода электрона. Индуцированное излучение является монокроматическим и когерентным. На данном его свойстве основывается действие квантовых генераторов – лазеров и мазеров.

Благодаря монокромности и когерентности излучения лазеры нашли широкое практическое применение в спектроскопии, голографии, волоконной оптике, в астрофизических исследованиях и т. д. Высокая концентрированность энергии лазерного луча позволяет достичь значительной интенсивности излучения, сверхвысоких температур и давлений, используемых в настоящее время во время сварки и плавления металлов, при получении сверхчистых материалов, в лазерной хирургии, для осуществления термоядерного синтеза.

5. Ядерная модель атома, предложенная Э. Резерфордом, предполагает, что практически вся его масса сосредоточена в ядре. Одной из самых распространенных в физике является **оболочечная протонно-нейтронная модель ядра атома**: атомное ядро состоит из нуклонов – протонов и нейтронов, которые определенным образом группируются, образуя ядерные оболочки. *Общее количество нуклонов равно массовому числу  $A$ ; число протонов равно заряду ядра  $Z$ , число нейтронов  $N = A - Z$ .* Ядерные оболочки заполняются согласно **принципу Паули**: *два нуклона не могут одновременно пребывать в одинаковом квантовом состоянии, т. е. характеризоваться одним и тем же набором квантовых величин.*

Нуклоны удерживаются в ядре благодаря ядерным силам, являющимся проявлением сильного взаимодействия. По своей природе оно короткодействующее ( $r \sim 10^{-15}$  м), однако очень интенсивное. Связанное состояние нуклонов в ядре характеризуется энергией связи:

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2 = (Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}})c^2.$$



6. Ядра тяжелых элементов, как правило, нестабильны. Поэтому они являются радиоактивными изотопами и могут самопроизвольно превращаться в другие химические элементы в результате излучения микрочастиц либо путем деления на более устойчивые образования. Существует три вида радиоактивного излучения: альфа-, бета- и гамма-лучи. Они образуются вследствие радиоактивных превращений:

– **альфа-распада**, когда превращение неустойчивого изотопа в иной химический элемент сопровождается излучением альфа-частицы ( ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$ );

– **бета-распада** – излучения ядром электрона или позитрона, сопровождаемое образованием нового химического элемента ( ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^0_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu}_e$ ;  ${}^{11}_6\text{C} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + {}^0_1e + {}^0_0\nu$ );

– **спонтанного деления ядер**, когда образуются несколько более легких ядер, например деление ядра Урана на ядро Бария ( $Z = 56$ ) и ядро Криптона ( $Z = 36$ ).

7. Характерным свойством радиоактивных изотопов является их **период полураспада**  $T$  – время, в течение которого количество ядер уменьшается в 2 раза. Радиоактивный распад происходит согласно закону:

$$N = N_0 \frac{1}{2^n} = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}.$$

Период полураспада  $T$  характеризует **активность радионуклида**  $A$ , т. е. количество распадов атомных ядер за 1 с.

8. С целью определения влияния радиоактивного излучения на вещество используют дозиметрические величины:

– **поглощенную дозу излучения**  $D = \frac{E}{m}$ , т. е. отношение энергии ионизирующего излучения к массе вещества;

– **мощность дозы излучения**  $\dot{D} = \frac{D}{t}$ , т. е. отношение ее к единице времени;

– **экспозиционную дозу излучения**, т. е. его способность ионизировать атомы и молекулы вещества;

– **биологический эквивалент рентгена**, который учитывает эффективность влияния и мощность конкретного вида излучения на живые организмы.

9. Превращение атомных ядер одних элементов в другие в результате внешнего воздействия, например бомбардирования ядер микрочастицами, называется **ядерной реакцией**. Ядерные реакции характеризует **энергетический выход** – разность энергий ядер и частиц до и после реакции. Энергетически выгодными считаются реакции, в результате которых энергия



выделяется, например реакция деления ядер Урана. Благодаря потоку высвобожденных нейтронов она может развиваться как цепная. С этой целью необходимо поддерживать неизменным поток нейтронов и создать условия, чтоб они проникали в ядра. Минимальная масса, при которой цепная реакция протекает самопроизвольно, называется **критической массой**. Цепная реакция деления ядер Урана используется в ядерной энергетике.

**10.** Изучение свойств множества микрочастиц вынудили ученых иначе взглянуть на проблему их элементарности – это не просто неделимые частицы, составляющие вещество, а специфические объекты, которым кроме всего прочего свойственно **слабое взаимодействие**.

Все элементарные частицы обладают малыми размерами (у большинства из них  $\sim 10^{-15}$  м) и незначительными массами. Это обуславливает квантовую специфику их поведения – они подчиняются квантовым закономерностям и им свойственно то, что они образуются (излучаются) или исчезают (поглощаются) в результате взаимодействия. К общим характеристикам элементарных частиц принадлежат их масса  $m$ , электрический заряд  $q$ , спин  $j$ , время жизни  $\tau$ , лептонный заряд  $L$ , барионный заряд  $B$  и т. д. Они отображаются в относительных единицах, кратных массе или электрическому заряду электрона, постоянной Планка и т. п.

Элементарные частицы можно классифицировать согласно различным их признакам. Например, в зависимости от собственного им типа взаимодействия их можно разделить на две основные группы: **адроны**, участвующие во всех типах фундаментальных взаимодействий – гравитационном, электромагнитном, сильном и слабом, и **лептоны**, которые характеризуют сильное взаимодействие. Учеными предложена кварковая модель строения адронов, согласно которой они состоят из комбинации шести различных кварков.

Согласно времени жизни элементарные частицы делят на *стабильные* (фотон, электрон, протон, нейтрино, нейтрон как относительно стабильный), *квазистабильные* ( $\tau > 10^{-20}$  с), которые распадаются вследствие электромагнитного или слабого взаимодействия, и *нестабильные* ( $\tau < 10^{-22}$  с), которые распадаются благодаря сильному взаимодействию.



# Ответы к упражнениям

## К разделу 1

Упражнение 1. 1.  $1,6 \cdot 10^{-6}$  Н. 2. 200 Н/Кл. 3.  $1,5 \cdot 10^{-4}$  Н/Кл.  
4.  $1,2 \cdot 10^{-2}$  м/с. 5.  $32 \cdot 10^{12}$  м/с<sup>2</sup>. 6.  $1,1 \cdot 10^4$  Н/Кл. 7.  $35,54 \cdot 10^{-4}$  м.

Упражнение 2. 1.  $9 \cdot 10^{-3}$  Н. 2. 6 Н. 3. Увеличится в 64 раза.  
4.  $9,23 \cdot 10^{-8}$  Н. 5. На расстоянии 5,5 см от первого. 6. 0,3 м.  
7.  $1,7 \cdot 10^{-3}$  м. 8.  $6,36 \cdot 10^{-2}$  кг. 9.  $0,86 \cdot 10^{-13}$  Кл. 10. Возрастет почти в 18 раз.

Упражнение 3. 1. 1,5 мкДж. 2.  $2 \cdot 10^{-5}$  мкКл. 3.  $2 \cdot 10^{-4}$  Дж.  
4.  $5 \cdot 10^{-4}$  Дж. 5.  $0,24 \cdot 10^{-3}$  м;  $0,47 \cdot 10^{-8}$  с.

Упражнение 4. 1. 30 В. 2.  $9,2 \cdot 10^{-3}$  Дж. 3. 10 м/с. 4.  $1,6 \cdot 10^{-13}$  Дж.  
6. 0,11 Дж.

Упражнение 5. 1.  $0,5 \cdot 10^{-11}$  Ф. 2.  $4,5 \cdot 10^{-9}$  Кл. 3.  $4 \cdot 10^4$  В. 4. Нет.

Упражнение 6. 1.  $2 \cdot 10^{-9}$  Ф. 2.  $3 \cdot 10^{-3}$  Кл. 3.  $2 \cdot 10^3$  Н/Кл.  
4.  $3,2 \cdot 10^{-6}$  Кл.

Упражнение 7. 1. 400 пФ. 2. 26 м<sup>2</sup>. 3. 2,1 мм. 4. 2,8 пФ; 6 кВ.

Упражнение 8. 1. 37 пФ; 1,18 пФ. 2.  $10^2$  пФ. 3.  $8 \cdot 10^{-5}$  Кл; 40 В;  
20 В. 4.  $176 \cdot 10^{-6}$  Кл; 44 В; 176 В.

Упражнение 9. 1. 100 Дж. 2. 1,44 Дж. 3.  $14 \cdot 10^{-10}$  Дж. 4.  $10^3$  В.  
5.  $2 \cdot 10^{-4}$  Ф. 6.  $0,68 \cdot 10^{-5}$  Дж.

Упражнение 10. 1. 1 Ом; 5 Ом. 2. 12 В; 2 Ом. 3. 1 Ом; 6 А. 4. 1 А;  
0,2 А; 1,6 В; 0.

## К разделу 2

Упражнение 11. 1.  $1,2 \cdot 10^{-3}$  Тл. 2. 2 А. 3. 2,5 см.

Упражнение 12. 1. 15 А. 2. 11,3°. 3. 20 мТл. 4.  $1,3 \cdot 10^{-5}$  Н.

Упражнение 13. 1.  $0,64 \cdot 10^{-13}$  Н. 2.  $3,1 \cdot 10^7$  м/с. 4. 0,25 Тл. 5. 0,04.  
6.  $7,6 \cdot 10^6$  м/с.

Упражнение 14. 2.  $5 \cdot 10^{-3}$  В. 3. 100 м/с. 4.  $0,5 \cdot 10^{-2}$  Дж.

Упражнение 15. 1.  $8 \cdot 10^{-4}$  Вб. 2. 0,4 Тл.

Упражнение 16. 1. 1 В. 2.  $78,5 \cdot 10^3$  В. 3.  $6 \cdot 10^{-2}$  Вб/с. 4. 2,3 А.  
5. 1,7 Тл/с.

Упражнение 18. 1. 0,375 Гн. 2. 10 А/с. 3.  $2,5 \cdot 10^{-3}$  Гн. 4. 100 В.

Упражнение 19. 1. 0,56 Дж. 3.  $10^{-2}$  с.

## К разделу 3

Упражнение 20. 1. 1 с; 1 Гц;  $6,28 \text{ с}^{-1}$ . 4.  $\approx 16$  Н/м. 5. 12,7 Гц.

Упражнение 21. 1. 2 с. 2. 25 Гц. 3.  $x = 5 \sin(5t + 0,5)$ ; -0,5 см.  
4. 3 мин 48 с. 5. 1,25 с; 0,8 Гц. 6. 0,05 Гц; 8,5 м. 7. 0,2 Гц. 8. 9 м.

Упражнение 22. 1. 10 м. 2. 20 м/с. 3. 10 м. 4. 2,4 м/с.

Упражнение 23. 1. 160 МГц. 2. 0,15 А. 3. 100 мкс. 4. 118 мкс.

Упражнение 24. 1. Изменится в 9 раз. 2. 200. 3. 200 м. 4. 4 м.  
5. 74 км. 6.  $300 \text{ м} \leq \lambda \leq 900 \text{ м}$ . 7. 1502,7 м. 8.  $14,10^{-6}$  Гн. 9. 31,6 пФ.  
10. 597 м; 0,502 МГц. 11. 83 м. 12. 4. 13. 2350 м.



### К разделу 4

Упражнение 25. 1.  $57,5^\circ$ . 2. Приблизительно половина роста человека. 3. 24 см. 4.  $1/7$  м;  $1/14$  м. 5. 12 см.

Упражнение 26. 1. 1,5. 2.  $19,6^\circ$ . 3.  $26^\circ 43'$ . 4.  $38^\circ$ . 5.  $37^\circ$ . 6.  $2,3 \cdot 10^5$  км/с. 7. 1,135.

Упражнение 27. 1. 12,5 см. 2. 300 см. 3. 21,8 см. 4. 60 или 30 см. 5. 13 см.

Упражнение 28. 1. 0,75 мкм; 0,6 мкм; 0,5 мкм; 0,667 мкм; 0,545 мкм; 0,461 мкм. 2. 14,4 мм. 3. 7,2 м. 4. 20 мкм.

Упражнение 29. 1.  $5 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $2,6 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $1,66 \cdot 10^{-27}$  кгм/с;  $8,7 \cdot 10^{-28}$  кгм/с;  $5,5 \cdot 10^{-36}$  кг;  $2,9 \cdot 10^{-36}$  кг. 2. 1,24 мкм;  $1,78 \cdot 10^{-36}$  кг;  $5,3 \cdot 10^{-28}$  кгм/с. 3.  $1,2 \cdot 10^3$  м/с. 4. 55 фотонов. 5.  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $6,1 \cdot 10^5$  м/с. 6. 650 нм; красный свет. 7. 4,77 эВ;  $7,64 \cdot 10^{-19}$  Дж. 8. Нет. 9. -7,9 В.

### К разделу 5

Упражнение 30. 1.  $2,2 \cdot 10^{-18}$  Дж;  $-4,4 \cdot 10^{-18}$  Дж;  $-2,2 \cdot 10^{-18}$  Дж. 2.  $6 \cdot 10^{14}$  Гц; 500 нм. 3. 437 нм. 4. 10,15 эВ.

Упражнение 31. 1. Al:  $p = 13$ ,  $n = 14$ ; Au:  $p = 79$ ,  $n = 118$ ; Cs:  $p = 55$ ,  $n = 77$ . 2. У Урана-238 нейтронов на 3 больше. 3.  $6,201 \cdot 10^{-12}$  Дж. 4.  ${}^{20}_{10}\text{Ne}$  — 91 %,  ${}^{22}_{10}\text{Ne}$  — 9 %. 5.  $2,832 \cdot 10^{-28}$  кг;  $1,2744 \cdot 10^{-12}$  Дж; 7,39 МэВ. 6.  ${}^7_4\text{Be}$ ;  ${}^3_2\text{He}$ . 7. 4 суток. 8. 1,6 %. 9.  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ . 10.  $4 \cdot 10^{11}$  Дж; 13 300 т. 11. 125 часов. 12.  $E_{\alpha} : E_{\text{кул}} : E_{\text{гр}} \approx 1 : 10^{-2} : 10^{-37}$ .



## Алфавитный указатель

### А

Активность радионуклида 228  
Акцепторные примеси 67  
Альфа-распад 226  
Альфа-частица 204, 226, 230  
Ампер 48  
Амплитуда колебаний 130

### Б

Беккерель 228  
Беккерель А. 219  
Бета-распад 227  
Бор Н. 206  
Бэр (биологический эквивалент рентгена) 231

### В

250 Ватт 50  
Вебер 109  
Вебер В. 109  
Внутреннее сопротивление 52  
Волна де Бройля 191  
– поперечная 142  
– продольная 143  
– электромагнитная 150  
Вольт 27  
Вольта А. 28

### Г

Гамма-лучи 228  
Генератор переменного тока 121  
Генри 116  
Герц Г. 206  
Гипотеза Планка 189  
Гистерезис 97  
Грей 230  
Гюйгенс Х. 167

### Д

Двигатель постоянного тока 90  
Дефект масс 224  
Джоуль Дж. 51  
Диамагнетики 95  
Диод полупроводниковый 68  
Дисперсия света 184  
Дифракция света 182  
Диэлектрики 16, 65  
Диэлектрическая проницаемость 17, 20

Длина волны 143  
Доза излучения поглощенная 231  
– – экспозиционная 231  
Дозиметр 232  
Домены 96  
Донорные примеси 67

### Ж

Жидкие кристаллы 18

### З

Закон Джоуля–Ленца 51  
– Кулона 20  
– Ома для полной цепи 53  
– Ома для участка цепи 49  
– отражения света 166  
– преломления света 172  
– радиоактивного распада 228  
– электромагнитной индукции 111  
Законы фотоэффекта 192  
Заряд ядра атома 221  
Звук 146  
Зеркало 169

### И

Иваненко Д. 221  
Излучение электромагнитное 153  
Изотоп 220  
Импульс фотона 190  
Индуктивность 117  
Индукционное электрическое поле 151  
Индукционный ток 103, 107  
Интерференция света 177  
Инфразвук 147  
Инфракрасное излучение 154, 186  
Источник света 164

### К

Квант 190  
Квантовый генератор 216  
Кварк 240  
Колебания 130  
– вынужденные 135  
– гармонические 131  
– свободные 132  
Колебательный контур 146, 151



Конденсатор 34  
 Корпускулярно-волновой дуализм 164, 189  
 Красная граница фотоэффекта 192  
 Критическая масса 233  
 Кулон 8  
 Кюри 226  
 Кюри П. 226

**Л**

Лазер 218  
 Линза 174

**М**

Магнитная индукция 79, 81  
 – – поля прямого проводника с током 81  
 – проницаемость 94  
 – составляющая силы Лоренца 89  
 Магнитное взаимодействие 78  
 – поле 78  
 Магнитные свойства вещества 96  
 Магнитный поток 109, 122  
 Максвелл Дж. 7, 75  
 Маятник  
 – математический 137  
 – нитяный 137, 140  
 – пружинный 132  
 Механические волны 142  
 Мощность дозы излучения 231  
 – электрического тока 50

**Н**

Напряжение 48  
 Напряженность электрического поля 8  
 Нейтрон 221, 226  
 Нуклон 221

**О**

Оболочечная модель ядра атома 222  
 Ом Г. 48  
 Опыт Роуланда 77  
 – Франка и Герца 206  
 – Эрстеда 76  
 Опыты Резерфорда 204

**П**

Парамагнетизм 95  
 Переменный электрический

ток 121  
 Период колебаний математического маятника 137  
 – полураспада 227  
 Пи-мезон 223  
 Планк М. 189  
 Поглощение света 166  
 Позитрон 226  
 Показатель преломления света 172  
 Полупроводники 65  
 Поляризация света 164  
 Постоянная Планка 189  
 Постулаты Бора 206  
 Потенциал электрического поля 27  
 Правило левой руки 85  
 – Ленца 106  
 – правого винта 80  
 – правой руки 103  
 Преломление света 171  
 Примесная проводимость полупроводников 67  
 Принцип Гюйгенса–Френеля 167  
 – Паули 221  
 – суперпозиции 11  
 – Ферма 167  
 Проводники 14  
 Протон 220, 226  
 Пулюй И. 214

**Р**

Работа выхода 193  
 – электрического поля 24  
 – электрического тока 50  
 Рад 231  
 Радиоактивное излучение 229  
 Радиоактивность 225  
 Радиоволны 156, 158  
 Разность потенциалов 30  
 Рассеивание света 166  
 Резерфорд Э. 203  
 Рентген 231  
 Рентген В.К. 214  
 Рентгеновское излучение 214

**С**

Самоиндукция 116  
 Сверхпроводимость 61  
 Свет 162  
 Сила Ампера 85, 104  
 – Лоренца 89  
 – тока 48  
 Сильное взаимодействие 223



Склодовская-Кюри М. 226  
 Скорость распространения волн 144  
 – света 162  
 Собственная проводимость  
 полупроводников 66  
 Сопротивление проводника 50  
 Спектр излучения 208  
 – линейчатый 209  
 – оптический 208  
 – поглощения 209  
 – полосатый 209  
 – рассеивания 208  
 Спектральный анализ 211  
 Спектрометр 186, 211  
 Спектроскоп 185  
 Спин 233, 239  
 Спонтанное деление ядер 227  
 Столетов А.Г. 192

**Т**

252

Термоядерная реакция 234  
 Тесла 81  
 Тесла Н. 81  
 Томсон Дж. 149, 203  
 Точка Кюри 97  
 Трансурановые элементы 235  
 Трансформатор 122

**У**

Удельное сопротивление 49  
 Уравнение колебаний 131  
 Уравнение Эйнштейна для  
 фотоэффекта 193

**Ф**

Фаза колебаний 132  
 Фарад 32  
 Фарадей М. 94, 100  
 Ферриты 98  
 Ферромагнетики 95  
 Формула линзы 176  
 Фотодиод 195  
 Фотон 162, 190  
 Фотопроводимость 194  
 Фоторезистор 194  
 ФотоЭДС 195  
 Фотоэлектрон 192  
 Фотоэффект 191

**Ц**

Цепная реакция 235

**Ч**

Частота колебаний 131  
 – собственных колебаний 132, 148  
 Чедвик Дж. 221, 238

**Ш**

Шкала электромагнитного  
 излучения 153

**Э**

Эйнштейн А. 193, 215  
 Эквипотенциальная поверхность 29  
 Электрическая цепь 47  
 Электрический заряд 5  
 – ток 47  
 Электрическое поле 7  
 Электродвижущая сила 51, 104  
 – – индукции 110  
 Електроемкость 31  
 – плоского конденсатора 37  
 Электроизмерительный прибор 87  
 Электромагнитная волна 150  
 – индукция 100  
 Электромагнитное поле 75  
 Электрон 59, 66, 226  
 Электрон-вольт 208  
 Электронно-дырочный переход 68  
 Электропроводимость 59  
 Электростатическая индукция 13  
 Элементарные частицы 239  
 Энергия магнитного поля 119, 148  
 – связи ядра атома 223  
 – электрического поля 44  
 Эрстед Г.Х. 76  
 Эффективное значение напряже-  
 ния 121  
 – – силы тока 121

**Я**

Ядерная модель атома 204  
 – реакция 233  
 Ядерный реактор 234  
 Ядерные силы 223



# Содержание

Дорогой друг!.....	3
--------------------	---

## ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

РАЗДЕЛ 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И ТОК .....	5
------------------------------------------	---

§ 1. Электрическое поле заряженных неподвижных тел .....	5
§ 2. Напряженность электрического поля .....	8
§ 3. Принцип суперпозиции электрических полей .....	11
§ 4. Проводники в электрическом поле .....	12
§ 5. Диэлектрики в электрическом поле .....	14
§ 6. Закон Кулона .....	19
§ 7. Работа в электрическом поле .....	23
§ 8. Потенциал электрического поля .....	26
§ 9. Разность потенциалов .....	28
§ 10. Емкость .....	30
§ 11. Конденсатор .....	34
§ 12. Емкость плоского конденсатора .....	37
§ 13. Соединение конденсаторов в батарее .....	40
§ 14. Энергия электрического поля .....	43
§ 15. Влияние электрического поля на живые организмы.....	45
§ 16. Условия возникновения электрического тока .....	47
§ 17. Работа и мощность тока .....	50
§ 18. Электродвижущая сила источника тока .....	51
§ 19. Закон Ома для полной цепи.....	52

Лабораторная работа № 1. Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока.....	56
------------------------------------------------------------------------------------------	----

§ 20. Правила безопасного пользования электрическими приборами .....	58
§ 21. Электрический ток в различных средах .....	58
§ 22. Полупроводники. Собственная и примесная проводимость полупроводников.....	65
§ 23. Полупроводниковый диод. Применение полупроводниковых приборов .....	68

Лабораторная работа № 2. Исследование электрической цепи с полупроводниковым диодом .....	70
-------------------------------------------------------------------------------------------	----

Главное в разделе 1.....	71
--------------------------	----

РАЗДЕЛ 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ .....	75
---------------------------------------	----

§ 24. Магнитное поле .....	75
§ 25. Магнитная индукция .....	78
§ 26. Действие магнитного поля на проводник с током. Сила Ампера .....	83
§ 27. Взаимодействие проводников с током .....	85
§ 28. Использование действия силы Ампера .....	87
§ 29. Сила Лоренца.....	89
§ 30. Магнитные свойства вещества .....	93
§ 31. Свойства ферромагнетиков .....	96



§ 32. Использование магнитных свойств вещества .....	98
§ 33. Электромагнитная индукция .....	100
§ 34. Правило Ленца .....	105
§ 35. Магнитный поток .....	107
§ 36. Закон электромагнитной индукции .....	110
§ 37. Электродинамический микрофон .....	112
<i>Лабораторная работа № 3. Исследование явления электромагнитной индукции</i> .....	114
§ 38. Самоиндукция .....	115
§ 39. Энергия магнитного поля .....	118
§ 40. Переменный ток .....	120
§ 41. Трансформатор. Передача энергии переменного тока .....	122
Главное в разделе 2 .....	126
<b>РАЗДЕЛ 3. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ</b> .....	129
§ 42. Колебательное движение. Свободные колебания .....	129
§ 43. Вынужденные колебания .....	134
§ 44. Математический маятник .....	136
<i>Лабораторная работа № 4. Изготовление маятника и определение периода его колебаний</i> .....	139
§ 45. Энергия колебательного движения .....	140
§ 46. Механические волны. Длина волны .....	141
§ 47. Звуковые волны .....	145
§ 48. Колебательный контур. Возникновение электромагнитных колебаний в колебательном контуре .....	147
§ 49. Образование электромагнитных волн .....	149
§ 50. Шкала электромагнитных излучений .....	153
§ 51. Радиоволны .....	156
Главное в разделе 3 .....	158
<b>РАЗДЕЛ 4. ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА</b> .....	161
§ 52. Свет как электромагнитная волна. Развитие представлений о природе света .....	161
§ 53. Поглощение и рассеивание света. Отражение света .....	165
§ 54. Зеркала. Получение изображений с помощью зеркал .....	168
§ 55. Преломление света. Законы преломления света .....	171
§ 56. Линзы. Построение изображений, получаемых с помощью линз .....	173
§ 57. Интерференция света .....	177
<i>Лабораторная работа № 5. Наблюдение интерференции света</i> .....	179
§ 58. Дифракция света .....	181
<i>Лабораторная работа № 6. Наблюдение дифракции света</i> .....	182
§ 59. Дисперсия света. Спектроскоп .....	184
§ 60. Инфракрасное и ультрафиолетовое излучения .....	186
§ 61. Квантовые свойства света. Фотон .....	188
§ 62. Фотоэффект. Уравнение фотоэффекта .....	191
§ 63. Применение фотоэффекта. Примеры решения задач .....	194
Главное в разделе 4 .....	198



<b>РАЗДЕЛ 5. АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА .....</b>	<b>202</b>
§ 64. История развития учения о строении атома. Ядерная модель атома .....	203
§ 65. Квантовые постулаты Н. Бора .....	205
§ 66. Поглощение и излучение света атомом. Оптические спектры .....	208
§ 67. Спектральный анализ и его применение .....	211
§ 68. Рентгеновское излучение .....	213
§ 69. Квантовые генераторы. Лазеры и их применение .....	216
§ 70. Атомное ядро .....	219
§ 71. Ядерные силы и энергия связи атомных ядер .....	222
§ 72. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада .....	225
§ 73. Виды радиоактивного излучения. Дозиметрия .....	229
§ 74. Ядерные реакции. Деление ядер Урана .....	234
§ 75. Ядерный реактор. Ядерная энергетика и экологическая безопасность .....	237
§ 76. Элементарные частицы .....	239
Главное в разделе 5 .....	244
Ответы к упражнениям .....	248
Алфавитный указатель .....	250



*Навчальне видання*

**КОРШАК Євгеній Васильович  
ЛЯШЕНКО Олександр Іванович  
САВЧЕНКО Віталій Федорович**

## **ФІЗИКА**

**Підручник для 11 класу  
загальноосвітніх навчальних закладів**

*Рівень стандарту*

**Видано за рахунок державних коштів. Продаж заборонено**

**Переклад з української**

**Редактори М. Зубченко, О. Мовчан  
Обкладинка і макет,  
виготовлення ілюстрацій В. Марущинця  
Технічний редактор Ц. Федосіхіна  
Коректори А. Кравченко, Л. Леуська  
Комп'ютерна верстка Л. Ємець, Н. Корсун**

**Формат 60×90/16.**

**Умовн. друк. арк. 16. Обл.-вид. арк. 15,65.**

**Тираж 37 725 пр. Вид. № 1136.**

**Зам. № 11-0202.**

**Видавництво «Генеza», вул. Тимошенка, 2-л, м. Київ, 04212.**

**Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців серія ДК № 3966 від 01.02.2011.**

**Віддруковано з готових позитивів у  
ТОВ «ПЕТ», вул. Ольмінського, 17, м. Харків, 61024.**

**Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців серія ДК № 3179 від 08.05.2008.**



НАБОР ДИСКРЕТНЫХ КВАНТОВЫХ ЧИСЕЛ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Название частицы	Символ		Масса		Спин в единицах $\hbar$	Электрический заряд, кратный заряду электрона $e$ (частица-античастица)	Время жизни, с			
	Частицы	Античастицы	в массах электрона $m_e$	в МэВ						
Фотон	$\gamma$		0	0	1	0	Стабильный			
Лептоны	Электронное нейтрино Мюонное нейтрино Тау-нейтрино	$\nu_e$ $\nu_\mu$ $\nu_\tau$	$\bar{\nu}_e$ $\bar{\nu}_\mu$ $\bar{\nu}_\tau$	0 0 0	0 0 0	$1/2$ $1/2$ $1/2$	0 0 0	Стабильное Стабильное Стабильное		
		Электрон Мюон Тау-лептон	$e^-$ $\mu^-$ $\tau^-$	$e^+$ $\mu^+$ $\tau^+$	1 207 3492	0,511 105,66 1782	$1/2$ $1/2$ $1/2$	-1 -1 -1	1 1 1	Стабильный $2,2 \cdot 10^{-6}$ $1,46 \cdot 10^{-12}$
	Пи-мезоны	$\pi^+$	$\pi^0$	$\pi^-$	264,1 273,1	134,96 139,57	0 0	0 1	-1 -1	$1,83 \cdot 10^{-16}$ $2,6 \cdot 10^{-8}$
	Ка-мезоны	$K^+$ $K^0$	$\bar{K}^-$ $\bar{K}^0$	966,4 974,1	493,67 437,7	0 0	1 0	-1 -1	$1,2 \cdot 10^{-8}$ $K_S^0 - 8,9 \cdot 10^{-11}$ $K_L^0 - 5,2 \cdot 10^{-8}$	
Адроны	Эта-ноль-мезон	$\eta^0$		1074	548,8	0	0	$2,4 \cdot 10^{-19}$		
	Протон Нейтрон	$p$ $n$	$\bar{p}$ $\bar{n}$	1836,1 1838,6	933,28 939,57	$1/2$ $1/2$	1 0	-1 -1	Стабильный (?) $10^3$	
		Лямбда-гиперон	$\Lambda^0$	$\bar{\Lambda}^0$	2183,1	1115,6	$1/2$	0	$2,63 \cdot 10^{-10}$	
	Сигма-гипероны		$\Sigma^+$ $\Sigma^0$ $\Sigma^-$	$\bar{\Sigma}^+$ $\bar{\Sigma}^0$ $\bar{\Sigma}^-$	2327,6 2333,6 2343,1	1189,4 1192,5 1197,4	$1/2$ $1/2$ $1/2$	1 0 -1	-1 -1 1	$8 \cdot 10^{-11}$ $5,55,8 \cdot 10^{-20}$ $1,48 \cdot 10^{-10}$