

А. В. Попов

# ЕГЭ

## СУПЕРМОБИЛЬНЫЙ СПРАВОЧНИК

# ФИЗИКА



**QR-коды**

QR-коды с подробными ответами  
к заданиям и дополнительной  
информацией по каждой теме



А. В. Попов

**ЕГЭ**

**СУПЕРМОБИЛЬНЫЙ  
СПРАВОЧНИК**

**ФИЗИКА**



**МОСКВА  
2019**

**Попов, Анатолий Васильевич.**

**Физика / А. В. Попов. — Москва : Эксмо, 2019. — 288 с. — (ЕГЭ. Супермобильный справочник).**

Справочник содержит систематизированное изложение всех тем, проверяемых на ЕГЭ по физике, и тренировочные задания для самоконтроля. К каждой теме приводятся QR-коды с дополнительной информацией для углублённого изучения и подробными ответами ко всем заданиям. Использование QR-кодов значительно упростит процесс подготовки к ЕГЭ и позволит учащимся получить большой объём информации, сэкономив время на её поиске.

Адресовано учащимся 10—11-х классов для подготовки к ЕГЭ по физике.

УДК 53(03)

ББК 22.3я2

Все права защищены. Книга или любая ее часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от издателя. Копирование, воспроизведение и иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

Справочное издание / анықтамалық баспа

Для старшего школьного возраста / мектеп жасындағы ересек балаларға арналған

ЕГЭ. СУПЕРМОБИЛЬНЫЙ СПРАВОЧНИК

**Попов Анатолий Васильевич**

**ФИЗИКА**

(орыс тілінде)

Ответственный редактор **А. Жилинская**. Ведущий редактор **Т. Судакова**

Научный редактор **М. Фёдоров**. Художественный редактор **Е. Бринчик**

ООО «Издательство «Эксмо»

123308, Россия, Москва, ул. Зорге, д. 1. Тел.: 8 (495) 411-68-66.

Home page: [www.eksmo.ru](http://www.eksmo.ru) E-mail: [info@eksmo.ru](mailto:info@eksmo.ru)

Фабрици: «ЭКСМО» АҚБ Баспасы, 123308, Мәскеу, Ресей, Зорге көшесі, 1. Үйі.

Тел.: 8 (495) 411-68-66.

Home page: [www.eksmo.ru](http://www.eksmo.ru) E-mail: [info@eksmo.ru](mailto:info@eksmo.ru).

Taypar belgisi: «Эксмо»

Интернет-магазин: [www.book24.kz](http://www.book24.kz)

Интернет-дүкен: [www.book24.kz](http://www.book24.kz)

Импортёр в Республику Казахстан ТОО «РДЦ-Алматы».

Қазақстан Республикасындағы импорттаушы «РДЦ-Алматы» ЖШС.

Дистрибутор и представитель по приему претензий на продукцию,

в Республике Казахстан: ТОО «РДЦ-Алматы».

Қазақстан Республикасындағы дистрибутор және анықтамалық арыз-талпауларды

қабылдаушысы «РДЦ-Алматы» ЖШС.

Алматы қ., Дембровский көш., 3-а, литер Б, офис 1.

Тел.: 8 (727) 251-59-90/91/92; E-mail: [RDC-Almaty@eksmo.kz](mailto:RDC-Almaty@eksmo.kz)

Филиалдарымыз, меркәзі шетелдегі.

Сертификация туралы ақпарат: [www.eksmo.ru/certification](http://www.eksmo.ru/certification)

Сведения о подтверждении соответствия издания согласно законодательству РФ

о техническом регулировании можно получить на сайте Издательства «Эксмо»

[www.eksmo.ru/certification](http://www.eksmo.ru/certification)

Өңделген мемлекет: Ресей. Сертификация қарастырылған

EKSMO.RU

новинки издательства



BOOK24.RU



BOOK24.RU



Продукция соответствует требованиям ТР ТС 007/2011

Дата изготовления / Подписано в печать 14.05.2019. Формат 75х108<sup>1/32</sup>.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,5.

Тираж

экз. Заказа

ISBN 978-5-04-097500-6



ISBN 978-5-04-097500-6

© Попов А.В., 2019

© Оформление.

ООО «Издательство «Эксмо», 2019





## УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

В ваших руках — современный справочник по физике, который поддержит вас при обучении в 7—11 классах, поможет сдать экзамены в школе и поступить в вуз. В справочнике дан краткий разбор всех тем, изучаемых в школьном курсе физики. По каждой теме приводятся определения и законы с кратким комментарием. В справочнике представлено 160 задач, предназначенных для самостоятельного решения при подготовке к сдаче единого государственного экзамена (ЕГЭ). Ответы к задачам даны в конце книги, а QR-коды к задачам позволят ознакомиться с их подробным решением. Путеводителем по определениям и законам послужит предметный указатель.

Современный мобильный справочник поможет вам:

- подготовиться к сдаче ЕГЭ по физике;
- написать доклад;
- подготовиться к уроку, контрольной или самостоятельной работе;
- быстро найти нужную информацию;
- актуализировать знания.

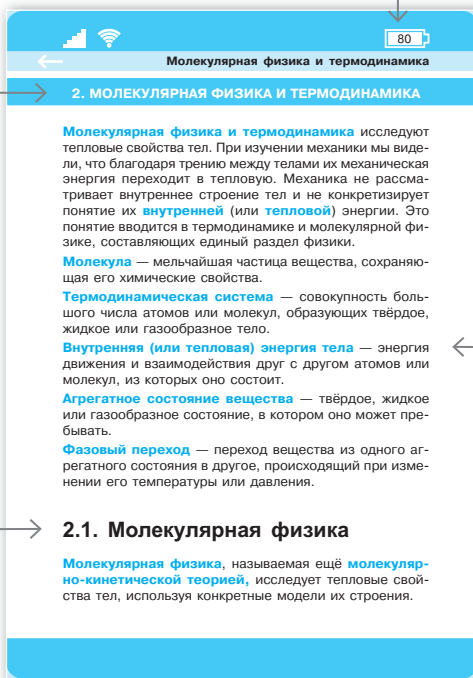




## Как пользоваться справочником

Название раздела

Номер страницы



Название темы

Определения, формулировки законов и их краткое пояснение



Задание в формате ЕГЭ

Название раздела

Механика

1.3.2. КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

**Кинетическая энергия** тела массой  $m$ , движущегося со скоростью  $v$ :

$$K = \frac{mv^2}{2}. \quad (1.33)$$

Кинетическая энергия — это энергия движущегося тела. Она измеряется работой силы трения, совершаемой при его торможении до полной остановки:

$$K = \frac{mv^2}{2} = |A_{\text{тр}}|.$$

**Связь работы с кинетической энергией** — работа приложенной к телу результирующей силы на отрезке траектории 1–2 равна приращению его кинетической энергии:

$$A_{12} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \Delta K, \quad (1.34)$$

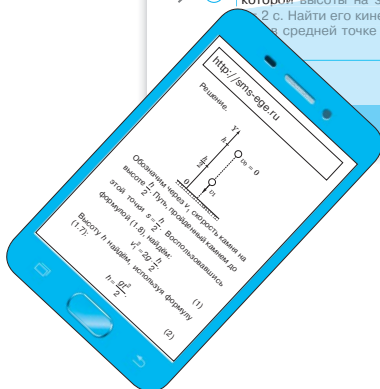
где  $v_1$  и  $v_2$  — скорость тела в начале и конце пути.

**Единицы измерения**

Единица измерения кинетической энергии — **джоуль**:

$$[K] = \text{Дж} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2}.$$

1. Камень массой  $m = 5$  кг упал с некоторой высоты на землю за время  $t = 2$  с. Найти его кинетическую энергию в средней точке пути.



**QR-код** для перехода к ответу с подробным решением задачи





## Введение

Физика — наука о природе, о наиболее общих и простых законах движения материи. Слово *physis* в переводе с греческого означает «природа». Эта наука зародилась в Древней Греции и включала в себя всё, что человеку было известно о природных явлениях, в частности и астрономию, изучающую движение небесных тел. Физика основывалась тогда на наблюдениях и не использовала эксперимент для проверки правильности умозаключений. Постановкой экспериментов человечество открыло новую эпоху в своём развитии. Это произошло в XVII веке нашей эры, обусловило бурное развитие знаний о природе и позволило открыть законы, описывающие природные явления.

Познавая суть природных явлений, физика всегда была двигателем прогресса. Каждая её ветвь в своём развитии неизбежно приводила к возникновению какой-либо сферы человеческой деятельности. Так, исследования явлений электричества и магнетизма привели к возникновению радиосвязи и электроники, открытия в области микромира — к освоению энергии атома и созданию современных информационных технологий. В свою очередь потребности практики стимулировали развитие науки. Термодинамика как наука возникла из потребности заменить физический труд животных и человека машинным.

Накопление знаний о природе привело к возникновению и других естественных наук, таких как химия, биология, геофизика, астрофизика. В их основе лежат законы, открытые физикой. Развитие техники также обусловлено успехами физики, так как знание глубинных закономерностей природных явлений дало возможность создать эффективно действующие механизмы, современные приборы связи, транспортные средства, компьютеры, лазеры и другие атрибуты высоких технологий.

Физика как наука условно делится на несколько связанных между собой разделов, рассматривающих разные природные явления. Это механика, молекулярная физика, учение об электричестве и магнетизме, оптика, физика атома и атомного



ядра. В такой последовательности соответствующие темы курса излагаются в настоящем пособии.

Пособие предназначено для учащихся средних школ, желающих глубже изучить физику, систематизировать ранее полученные знания, пройти в школе аттестацию по курсу этой дисциплины — сдать ОГЭ или подготовиться к сдаче ЕГЭ, поскольку включает в себя и вопросы, предлагаемые на экзаменах.

Книга написана в форме справочника. В начале каждого раздела приводятся определения понятий, лежащих в основе той области физики, изложению которой посвящён этот раздел. В каждом из подразделов даны определения соответствующих физических величин и формулировки законов, сопровождаемые их кратким разъяснением, а в конце подраздела — условия задач с решением. Такое разделение позволяет вспомнить определения, быстро отыскать нужные формулы, научиться решать задачи. Разбор ряда задач содержит дополнительные сведения, продолжая изложение материала, начатое в теоретической части.

Решение конкретных задач — применение полученных знаний на практике, то есть конечная цель всякого обучения. Оно стимулирует самостоятельную творческую работу, учит анализировать наблюдаемые явления, выделять главные факторы, пренебрегая несущественными и второстепенными деталями. Поэтому вопросы, предлагаемые на ОГЭ и ЕГЭ, формулируются главным образом в виде задач — даже те из них, где нужно выбрать один из вариантов ответа, требуют решения.

Книга имеет целью помочь учащимся в освоении методов решения задач по физике. Для этого в ней приводятся подробные решения 160 задач по темам, которые чаще всего предлагаются на экзаменах.







## Латинский алфавит

A	a	а
B	b	бэ
C	c	цэ
D	d	дэ
E	e	е
F	f	эф
G	g	гэ
H	h	ха
I	i	и
J	j	йот
K	k	ка
L	l	эль
M	m	эм
N	n	эн
O	o	о
P	p	пэ
Q	q	ку
R	r	эр
S	s	эс
T	t	тэ
U	u	у
V	v	вэ
W	w	дубль-вэ
X	x	икс
Y	y	игрек
Z	z	зед

## Греческий алфавит

A	α	альфа
B	β	бета
Г	γ	гамма
Δ	δ	дельта
E	ε	эпсилон
Z	ζ	дзета
Η	η	эта
Θ	θ	тета
I	ι	йота
Κ	κ	каппа
Λ	λ	лямбда
Μ	μ	мю
N	ν	ню
Ξ	ξ	кси
O	ο	омикрон
Π	π	пи
Ρ	ρ	ро
Σ	σ	сигма
Τ	τ	тау
Υ	υ	ипсилон
Φ	φ	фи
Χ	χ	хи
Ψ	ψ	пси
Ω	ω	омега



## 1. МЕХАНИКА

Материей называют все существующие в природе тела и различные поля — поле тяготения, электромагнитное поле, поле внутриядерных сил. Материя находится в непрерывном движении, простейшей формой которого является перемещение тел друг относительно друга, т. е. механическое движение. Эта форма движения изучается в механике как одним из разделов физики.

Механика делится на кинематику, динамику, статику, аэро- и гидродинамику.

**Объект изучения** в механике — тело, движущееся под действием приложенных к нему сил.

**Задача механики** — определить, как движется тело — найти его положение в пространстве и скорость в любой момент времени.

Языком физики служит **математика**. На языке математики сформулированы законы механики, позволяющие решать её задачи.

Механика использует понятие **поля** — это область пространства, в которой на материальное тело действует сила.

**Гравитационное поле** или **поле силы тяжести** создаётся материальными телами и порождает силу притяжения их друг к другу.

Механика изучает движение жидких и газообразных тел в специальных своих разделах — **гидро-** и **аэродинамике**.

**Небесная механика**, имеющая дело с планетами солнечной системы, позволяет предсказать лунные и солнечные затмения, определить положение планет на небе в прошлом и будущем.



# 1.1. Кинематика

**Кинематика** — раздел механики, в котором рассматривается движение материальных тел, не касаясь вызывающих его причин.



## 1.1.1. РАВНОМЕРНОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

**Материальная точка** — тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.

**Тело отсчёта** — тело, относительно которого определяется положение других тел.

В качестве тела отсчёта чаще всего используют Землю, с которой связывают прямоугольную декартову **систему координат** (рис. 1.1).

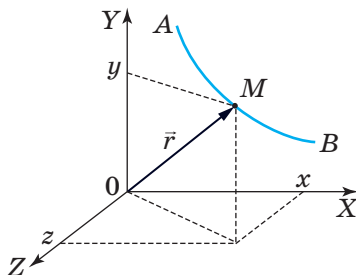


Рис. 1.1

**Система отсчёта** — совокупность системы координат, связанной с телом отсчёта, и покоящихся относительно него часов.



**Координаты точки  $M$**  — отрезки  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , отсекаемые на осях координат перпендикулярными к ним плоскостями, проходящими через точку  $M$ .

Координаты — функции времени:

$$\begin{aligned}x &= x(t), \\y &= y(t), \\z &= z(t).\end{aligned}\tag{1.1}$$

Вид этих функций зависит от конкретных условий, в которых происходит движение.

**Траектория движения тела** — линия, которую оно описывает в пространстве при своем движении.

Система уравнений (1.1) задает траекторию точки в параметрическом виде, где в качестве параметра выступает время  $t$ . В общем случае траектория представляет собой кривую линию.

Задача механики заключается в отыскании функций (1.1).

**Путь  $s$**  — длина отрезка траектории, пройденного телом за время  $t$ .

**Перемещение** — вектор, соединяющий точки траектории, в которых тело находилось в начале и конце своего пути.

Вектор перемещения показывает направление, в котором оно было совершено. На рис. 1.2 изображена траектория  $S$  движения тела из точки  $A$  в точку  $B$  и вектор перемещения  $\overline{AB}$ .

**Прямолинейное движение** — движение тела вдоль прямой линии, которую принимают за координатную ось  $X$ .



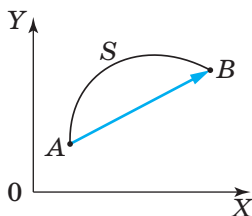


Рис. 1.2

**Скорость тела** — быстрота изменения его координаты со временем:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad (1.2)$$

где  $\Delta x$  — приращение координаты за малый промежуток времени  $\Delta t$ .

**Среднее значение скорости тела** — отношение пройденного пути ко времени, за которое он был пройден:

$$v_{\text{ср}} = \frac{s}{t}. \quad (1.3)$$

**Равномерное движение** — скорость тела на всём пути постоянна.

**Путь и координата** тела при равномерном прямолинейном движении:

$$s = x - x_0 = vt, \quad (v = \text{const}), \quad (1.4)$$

где  $x_0$  — начальная координата (при  $t = 0$ ).

График зависимости пути от времени при равномерном движении представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат (рис. 1.3).

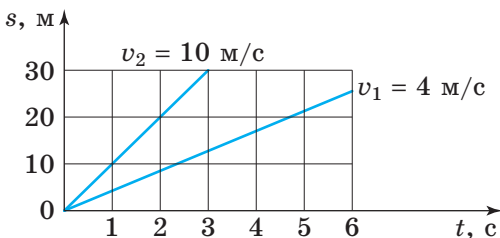


Рис. 1.3

### Единицы измерения

Координата тела и путь в системе СИ измеряются в **метрах**:

$$[x] = [s] = \text{м}.$$

Скорость измеряется в **метрах в секунду**:

$$[v] = \text{м/с}.$$

1

Первую половину своего пути автомобиль двигался со скоростью  $v_1 = 18 \text{ км/ч}$ , а вторую половину пути со скоростью  $v_2 = 40 \text{ км/ч}$ . Какова его средняя скорость  $v_{\text{ср}}$  на всём пути?



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Расстояние между городами  $M$  и  $K$   $s = 250 \text{ км}$ . Одновременно из обоих городов навстречу друг другу выезжают автомашины. Машина из города  $M$  движется со скоростью





$v_1 = 60$  км/ч, из города  $K$  — со скоростью  $v_2 = 40$  км/ч. Построить график зависимости пути от времени для каждой из машин и по ним определить место встречи и время их движения до встречи.

Ответ: \_\_\_\_\_

3

Скорость течения реки  $v_p = 1$  м/с, скорость лодки относительно воды  $v_0 = 2$  м/с. Под каким углом к берегу следует держать курс, чтобы лодка двигалась перпендикулярно берегу? За какое время  $t$  она переправится через реку, ширина которой  $d = 200$  м?



Ответ: \_\_\_\_\_



### 1.1.2. РАВНОУСКОРЕННОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

**Ускорение тела** — быстрота изменения его скорости со временем:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}, \quad (1.5)$$

где  $\Delta v$  — приращение скорости за малый промежуток времени  $\Delta t$ .

**Равноускоренное движение** — ускорение тела на всём пути постоянно.

**Скорость, координата и путь** при равноускоренном движении тела ( $a = \text{const}$ ):

$$v = v_0 + at, \quad (1.6)$$



$$s = x - x_0 = v_0 t + \frac{at^2}{2}, \quad (1.7)$$

$$v^2 - v_0^2 = 2as, \quad (1.8)$$

где  $x_0$  и  $v_0$  — начальные координата и скорость тела (при  $t = 0$ ).

График зависимости скорости от времени в этом случае — прямая линия, приведённая в качестве примера на рис. 1.4.

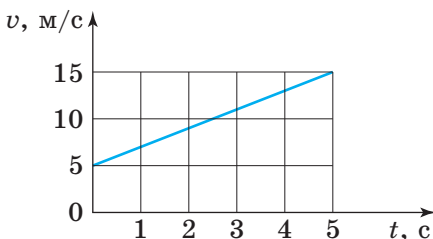


Рис. 1.4

График зависимости пути от времени — парабола. При  $v_0 = 0$ , когда тело начинает движение из состояния покоя, вершина параболы совпадает с началом координат (рис. 1.5).

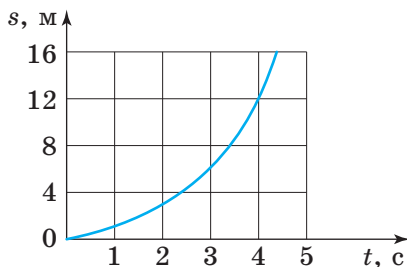


Рис. 1.5







Уравнения (1.6)–(1.8) используются при решении задач кинематики, в которых рассматривается движение тел с постоянным ускорением.

Скорость и ускорение являются величинами **векторными** и указанные уравнения следует записывать для каждой из проекций этих векторов на оси координат (см. Приложение 1).

### Единицы измерения

Ускорение измеряется в **метрах в секунду за секунду**:

$$[a] = \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

1

Тело, имея некоторую начальную скорость, движется равноускоренно. За время  $t = 2$  с тело прошло путь  $s = 18$  м, причём его скорость увеличилась в  $n = 5$  раз. Найти ускорение тела и его начальную скорость.



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Поезд, идущий со скоростью  $v_0 = 36$  км/ч, начинает двигаться равноускоренно и проходит путь  $s = 600$  м, имея в конце этого участка скорость  $v = 45$  км/ч. Определить ускорение поезда  $a$  и время  $t$  его ускоренного движения.



Ответ: \_\_\_\_\_



3

С воздушного шара, поднимающегося со скоростью  $v_0 = 1$  м/с, падает камень и достигает земли спустя  $t = 16$  с. На какой высоте  $h$  находился шар в момент сбрасывания камня? С какой скоростью  $v$  камень упал на землю?



Ответ: \_\_\_\_\_



### 1.1.3. ДВИЖЕНИЕ В ОДНОРОДНОМ ПОЛЕ ТЯЖЕСТИ

**Однородное поле тяжести** — ускорение свободного падения в любой точке пространства одно и то же:

$$a = g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

В однородном поле тяжести траекторией движения тела в общем случае является **парабола**.

Проиллюстрируем сказанное на примере свободного падения тела в поле тяжести Земли. Пусть тело брошено горизонтально на высоте  $h$  со скоростью  $v_0$ . Найдём уравнение траектории его движения.

Движение тела происходит в плоскости. Выберем в этой плоскости оси координат  $X$  и  $Y$ , как показано на рис. 1.6. Поскольку сила тяжести направлена вертикально вниз, проекция на ось  $X$  вектора ускорения равна нулю:

$$a_x = 0.$$



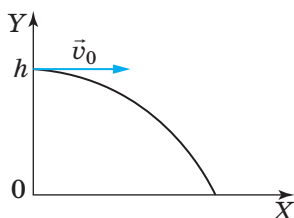


Рис. 1.6

Согласно уравнению (1.6), отнесённому к оси  $X$ , проекция вектора скорости на эту ось постоянна:

$$v_x = v_0 = \text{const.}$$

Поскольку  $s = x - x_0$ , а координата тела по оси  $X$  в начальный момент времени  $x_0 = 0$ , из уравнения (1.7) следует:

$$x(t) = v_0 t.$$

Ускорение тела вдоль оси  $Y$  равно ускорению свободного падения  $g$ , взятому со знаком «минус», так как проекция вектора  $\vec{g}$  на эту ось отрицательна:  $a_y = -g$ . Заменяя в уравнении (1.7)  $x$  на  $y$  и учитывая, что его начальная координата по оси  $Y$   $y_0 = h$ , а проекция начальной скорости  $v_{0y} = 0$ , найдём:

$$y(t) = h - \frac{gt^2}{2}.$$

Два последних уравнения задают траекторию тела в параметрическом виде. Выразив  $t$  из первого и подставив его во второе, получим уравнение траектории в явном виде. Поскольку  $t = \frac{x}{v_0}$ , имеем:

$$y(x) = h - \frac{g}{2v_0^2} x^2.$$



Это уравнение параболы с вершиной в точке  $(0, h)$  и ветвями, направленными вниз (рис. 1.6).

Найдём время полета тела  $t_n$ . В момент касания земли ( $t = t_n$ ) координата тела по оси  $Y$  становится равной нулю:

$$y(t_n) = h - \frac{gt_n^2}{2} = 0,$$

откуда

$$t_n = \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

Подставляя  $t_n$  в уравнение  $x(t) = v_0 t$ , найдём дальность его полета:

$$l = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

1

Камень бросили вертикально вверх на высоту  $h_1 = 10$  м. Через какое время  $t_1$  он упадёт на землю? На какую высоту  $h_2$  поднимется камень, если начальную скорость камня увеличить вдвое?



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Два тела брошены вертикально вверх одно вслед за другим с интервалом  $\tau = 1$  и с одинаковыми начальными скоростями  $v_0 = 10$  м/с. Через сколько времени тела встретятся в полёте?



Ответ: \_\_\_\_\_





3

Тело, брошенное под углом  $\alpha$  к горизонту со скоростью  $v_0 = 22$  м/с, находилось в полёте в течение времени  $t_n = 2,2$  с. Найти наибольшую высоту  $h_{\max}$ , которую достигло тело, угол  $\alpha$  между вектором скорости и горизонтом в начальной точке пути и дальность полёта  $l$  по горизонтали.



Ответ: \_\_\_\_\_



#### 1.1.4. ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

**Угловая скорость** вращения твёрдого тела, закреплённого на оси:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}, \quad (1.9)$$

где  $\Delta\varphi$  — угол его поворота за малый промежуток времени  $\Delta t$  (рис. 1.7).

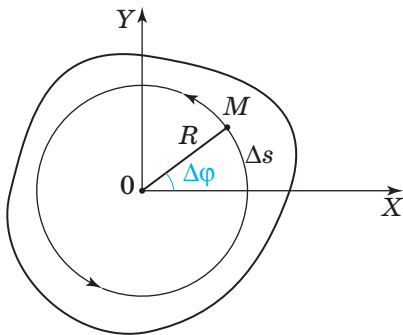


Рис. 1.7



**Угловая скорость** при равномерном вращении ( $\omega = \text{const}$ ):

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n. \quad (1.10)$$

**Период вращения** — время, за которое тело совершает один оборот:

$$T = \frac{t}{N}, \quad (1.11)$$

где  $N$  — полное число оборотов.

**Частота вращения** — число оборотов, совершаемых за единицу времени:

$$n = \frac{N}{t}. \quad (1.12)$$

**Центростремительное ускорение** материальной точки  $M$ , движущейся по окружности радиуса  $R$  со скоростью  $v$ :

$$a_{\text{ц}} = \frac{v^2}{R}. \quad (1.13)$$

Скорость  $v$  называют в этом случае **линейной скоростью**.

**Связь линейных и угловых величин:**

$$v = \omega \cdot R, \quad (1.14)$$

$$a_{\text{ц}} = \omega^2 \cdot R. \quad (1.15)$$

**Период обращения** точки, движущейся по окружности радиуса  $R$ :

$$T = \frac{2\pi R}{v}. \quad (1.16)$$





**Радиян** — безразмерная единица измерения углов.

Угол в 1 рад образуют два радиуса окружности, длина стягивающей дуги которых равна радиусу. Этот угол составляет  $\approx 57^\circ$ . Угол в  $180^\circ = \pi$  рад.

### Единицы измерения

Угловая скорость измеряется в **радианах в секунду**:

$$[\omega] = \text{рад/с} = 1/\text{с}.$$

Период измеряется в **секундах**:

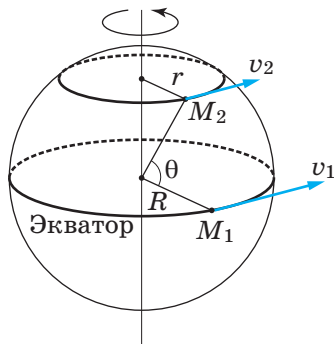
$$[T] = \text{с}.$$

Единица измерения частоты вращения — **оборот в секунду**:

$$[n] = \frac{1}{\text{с}}.$$

1

Найти линейную скорость  $v$  и центростремительное ускорение  $a_{\text{ц}}$  точек, находящихся на экваторе земного шара и на широте  $\theta = 60^\circ$ .



Ответ: \_\_\_\_\_

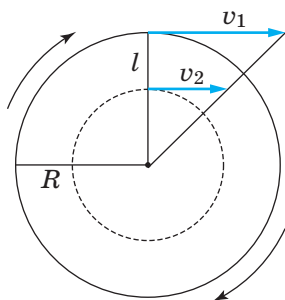


- 2 Точка движется равномерно по окружности. Как изменится её центростремительное ускорение, если скорость возрастёт вдвое, а радиус окружности вдвое уменьшится?



Ответ: \_\_\_\_\_

- 3 Линейная скорость точек обода вращающегося диска  $v_1 = 3$  м/с, а точек, находящихся на  $l = 10$  см ближе к оси вращения,  $v_2 = 2$  м/с. Найти частоту вращения диска.



Ответ: \_\_\_\_\_

## 1.2. Динамика

**Динамика** — раздел механики, в котором изучается движение тел под действием приложенных сил. Законы механики, позволяющие решить её основную задачу — нахождение траектории тела, — сформулированы в XVII веке Исааком Ньютоном. Эти законы составляют основу механики как науки. Для их формулировки наряду







со скоростью и ускорением вводятся новые физические величины — **масса**, **импульс** и **сила**.



### 1.2.1. МАССА, ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА, СИЛА

**Масса** — мера количества вещества в теле.

**Плотность вещества** — отношение массы тела к его объёму:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (1.17)$$

**Сила** — мера взаимодействия тел. Сила проявляет себя в изменении скорости движения тела, на которое действует, и определяется произведением его массы на ускорение:

$$\vec{F} = m\vec{a}. \quad (1.18)$$

**Принцип суперпозиции.** Если к телу в одной его точке приложено несколько сил, оно движется так, будто на него действует одна — результирующая сила  $\vec{F}_{\text{рез}}$ , равная векторной сумме этих сил (рис. 1.8):

$$\vec{F}_{\text{рез}} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots \quad (1.19)$$

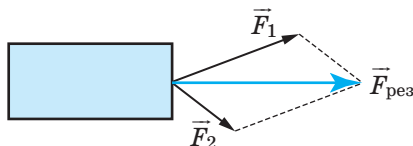


Рис. 1.8



## Единицы измерения

Масса в системе СИ измеряется в **килограммах**:

$$[m] = \text{кг}.$$

Единица измерения плотности — **килограмм на кубический метр**:

$$[\rho] = \text{кг/м}^3.$$

Сила измеряется в **ньютонах**:

$$[F] = \text{Н} = \text{кг} \cdot \text{м/с}^2.$$

1

Ведро заполнено водой до края. Сколько воды вытечет, если в него погрузить железную гирю массой  $m = 1$  кг? Плотность железа  $\rho = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Тело массой  $m = 2$  кг, движущееся со скоростью  $v_0 = 1$  м/с, останавливается в течение времени  $t = 5$  с. Найти силу торможения, под действием которой это произошло.



Ответ: \_\_\_\_\_

3

Ускорение тела, к которому в одной точке приложены силы  $F_1$  и  $F_2$ , перпендикулярные друг другу, составляет  $a = 3,6$  м/с<sup>2</sup>. Найти массу тела  $m$ , если  $F_1 = 2$  Н,  $F_2 = 3$  Н.



Ответ: \_\_\_\_\_





### 1.2.2. ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЁТА. ЗАКОНЫ НЬЮТОНА

**Инерциальная система отсчёта** — система отсчёта, относительно которой тело покоится или движется с постоянной скоростью, если сумма приложенных к нему сил равна нулю. Система отсчёта, движущаяся с ускорением, называется **неинерциальной**. В частности, неинерциальной является любая вращающаяся система отсчёта. В неинерциальных системах на тела действуют дополнительные силы, называемые **силами инерции**, не связанные с взаимодействием тел. Так, человек в набирающем скорость автомобиле чувствует силу, прижимающую его к спинке сиденья. При торможении эта сила направлена в сторону движения и толкает его вперед. Законы Ньютона выполняются в инерциальных системах отсчёта.

**Первый закон.** Если на тело не действует сила, то оно покоится или движется с постоянной скоростью:

$$\vec{a} = 0, \text{ если } \vec{F} = 0. \quad (1.20)$$

**Второй закон.** Произведение массы тела на его ускорение равно результирующей приложенных к нему сил:

$$m\vec{a} = \vec{F}_{\text{рез}}. \quad (1.21)$$

**Третий закон.** Если два тела взаимодействуют друг с другом, то сила, действующая на первое тело со стороны второго, равна по модулю и противоположна по направлению силе, действующей на второе тело со стороны первого (рис. 1.9):

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}. \quad (1.22)$$

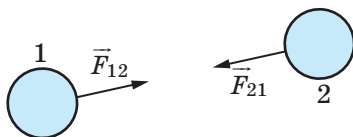


Рис. 1.9

Законы Ньютона не выводятся из каких-либо общих принципов. Критерием их справедливости служит опыт. Расчёты, основанные на законах Ньютона, согласуются с экспериментом.

Однако законы классической механики имеют пределы применимости. В области микромира действуют законы **квантовой механики**, возникшей в начале XX века, которая описывает поведение микрочастиц — электронов, протонов, нейтронов — в атомах, молекулах и твёрдых телах. Теория относительности, созданная в начале прошлого века Альбертом Эйнштейном, ограничивает применимость классической механики Ньютона случаем скоростей  $v$ , много меньших скорости света  $c$  ( $v \ll c$ ).

В большинстве других разделов физики используются уравнения Ньютона. Область применимости классической механики очень широка. Примерами могут служить небесная механика, изучающая движение планет солнечной системы, гидро- и аэродинамика, теория упругости, теория колебаний.

1

Определить силу сопротивления воздуха, действующего на парашютиста, который опускается на парашюте с постоянной скоростью. Масса парашютиста  $m = 80$  кг.



Ответ: \_\_\_\_\_





2

Вагон массой  $m = 20$  т движется равнозамедленно с ускорением  $a = 0,3$  м/с<sup>2</sup> и начальной скоростью  $v_0 = 54$  км/ч. Найти силу торможения, действующую на вагон, время движения вагона до полной остановки и путь, пройденный за это время.



Ответ: \_\_\_\_\_

3

Два тела массами  $m_1 = 1$  кг и  $m_2 = 2$  кг, находящиеся на гладкой горизонтальной поверхности, связаны нерастяжимой нитью. Ко второму телу в горизонтальном направлении приложена сила  $F = 10$  Н. Найти ускорение  $a$ , с которым движутся оба тела, и силу  $T$  натяжения нити.



Ответ: \_\_\_\_\_



### 1.2.3. ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ГАЛИЛЕЯ

Рассмотрим движение материальной точки  $M$  относительно двух инерциальных систем отсчёта  $K$  и  $K'$ , одна из которых — система  $K'$  — движется относительно системы  $K$  с постоянной скоростью  $V$ , направленной вдоль оси  $X$  (рис. 1.10).

Координаты точки в системе  $K'$  можно найти, пользуясь преобразованием Галилея.

**Преобразование Галилея** — уравнения, связывающие координаты точки  $M$  и время относительно инерциальных систем отсчёта  $K$  и  $K'$ :

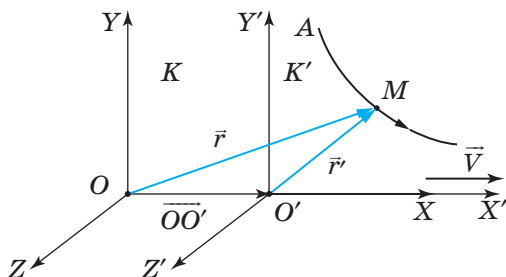


Рис. 1.10

$$x = x' + Vt', \quad (1.23, a)$$

$$y = y', \quad (1.23, б)$$

$$z = z', \quad (1.23, в)$$

$$t = t'. \quad (1.23, г)$$

**Принцип относительности Галилея.** Уравнения, выражающие законы Ньютона, имеют один и тот же вид в любой инерциальной системе отсчёта.

Поскольку силы взаимодействия между телами не зависят от выбора системы отсчёта, то  $\vec{F}_{\text{рез}} = \vec{F}'_{\text{рез}}$ ,  $\vec{a} = \vec{a}'$  и в системе отсчёта  $K'$  уравнение (1.21) имеет тот же вид.

Никакой эксперимент, поставленный в инерциальной системе отсчёта, не позволяет определить скорость, с которой она движется, т. е. все инерциальные системы отсчёта друг перед другом равноправны.

**Закон сложения скоростей** в классической механике:

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{V}, \quad (1.24)$$

где  $\vec{v}$  — скорость тела относительно системы отсчёта  $K$ ,  $\vec{v}'$  — скорость тела относительно системы отсчёта  $K'$ .

Классическая механика не накладывает никаких ограничений на величину скорости тела. В релятивистской





механике (теории относительности) закон сложения скоростей изменяется так, что численное значение суммарной скорости тела не может превысить скорость света  $c = 300\,000$  км/с. Это значит, что никакое материальное тело не может двигаться со скоростью, большей скорости света.

1

Пассажир метро, двигаясь по ступеням эскалатора, поднимается вверх за время  $t = 80$  с. По ступеням неподвижного эскалатора, двигаясь с той же скоростью  $v = 1$  м/с, он затрачивает на подъём  $t_0 = 120$  с. Какова скорость эскалатора и расстояние  $s$  от нижней точки пути до верхней?



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Самолёт летит из города  $A$  в город  $B$  со скоростью  $v_c = 360$  км/ч относительно воздуха и прилетает в город  $B$  через 2 часа. Навстречу ему дует ветер, скорость которого  $v_b = 10$  м/с. Сколько времени он будет лететь в обратном направлении — из города  $B$  в город  $A$ ?



Ответ: \_\_\_\_\_



### 1.2.4. СИЛА ТРЕНИЯ

Сила трения возникает между телами, когда они соприкасаются друг с другом. Она обусловлена шероховатостями их поверхностей, которые приходят в зацепление друг с другом и препятствуют движению.



**Сила трения** — сила сцепления между телами, проявляющая себя при попытке сместить одно тело относительно другого:

$$F_{\text{тр}} = \mu N, \quad (1.25)$$

где  $N$  — сила нормального давления,  
 $\mu$  — коэффициент трения.

Сила трения пропорциональна силе  $N$ , направленной по нормали к поверхности соприкосновения тел. Коэффициент трения характеризует свойства соприкасающихся поверхностей и не зависит от силы нормального давления.

В случае, когда поверхность соприкосновения тел горизонтальна, сила нормального давления равна весу тела  $mg$  (рис. 1.11). Тогда

$$F_{\text{тр}} = \mu mg.$$

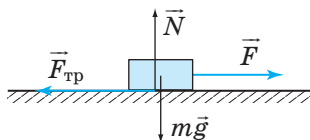


Рис. 1.11

1

Камень, скользящий по горизонтальной поверхности льда, остановился, пройдя расстояние  $s = 48$  м. Определить начальную скорость камня  $v_0$ , если сила трения камня о лёд составляет 0,06 веса камня.



Ответ: \_\_\_\_\_







2

На горизонтальной доске лежит груз. Какое ускорение  $a$  в горизонтальном направлении следует сообщить доске, чтобы груз соскользнул с неё? Коэффициент трения между грузом и доской  $\mu = 0,2$ .



Ответ: \_\_\_\_\_

3

Коэффициент трения тела о наклонную плоскость  $\mu = 0,2$ . Какой наибольший угол  $\alpha_{\max}$  может составить плоскость с горизонтом, чтобы тело удерживалось на плоскости силой трения?



Ответ: \_\_\_\_\_



### 1.2.5. СИЛА УПРУГОСТИ. ЗАКОН ГУКА

**Сила упругости** — сила, возникающая в теле при его деформации.

**Упругая деформация** — после снятия нагрузки тело приобретает первоначальную форму.

**Закон Гука.** При упругой деформации сила упругости пропорциональна величине деформации.

Для тела, закреплённого на пружине (рис. 1.12), он имеет вид:

$$F_{\text{упр}} = -kx, \quad (1.26)$$

где  $k$  — жёсткость пружины,  
 $x$  — величина её деформации.

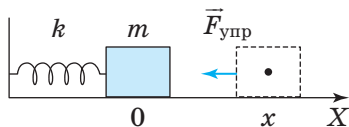


Рис. 1.12

Коэффициент пропорциональности  $k$  зависит от формы пружины и её размеров. Знак «минус» указывает, что сила упругости  $F_{\text{упр}}$  направлена в сторону, противоположную направлению смещения тела.

### Единицы измерения

Сила упругости измеряется в **ньютонaх**:

$$[F_{\text{упр}}] = \text{Н}.$$

Деформация измеряется в **метрах**:

$$[x] = \text{м}.$$

Жёсткость пружины измеряется в **ньютонaх на метр**:

$$[k] = \text{Н/м}.$$

1

Под действием силы  $F = 5 \text{ Н}$  пружина удлинилась на  $x = 0,05 \text{ м}$ . Какова жёсткость пружины?

Ответ: \_\_\_\_\_



2

Длина пружины в свободном состоянии  $l_0 = 0,1 \text{ м}$ . Жёсткость пружины  $k = 800 \text{ Н/м}$ . Какова будет длина пружины, если к ней подвесить тело массой  $m = 2 \text{ кг}$ ?

Ответ: \_\_\_\_\_





### 1.2.6. СИЛА ТЯЖЕСТИ. ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

**Закон всемирного тяготения.** Сила притяжения двух точечных масс  $m_1$  и  $m_2$  пропорциональна их произведению и обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r$  между ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (1.27)$$

где  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$  — гравитационная постоянная.

**Ускорение свободного падения** тела на высоте  $h$  над поверхностью Земли:

$$g(h) = G \frac{M}{(R + h)^2}, \quad (1.28)$$

где  $M$  — масса Земли,  
 $R$  — её радиус.

**Первая космическая скорость** — скорость, которую должно иметь тело, чтобы стать искусственным спутником Земли:

$$v_1 = \sqrt{gR} \approx 8 \text{ км/с}, \quad (1.29)$$

где  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения,  
 $R = 6400 \text{ км}$  — радиус Земли.

**Скорость спутника Земли** на высоте  $h$  над её поверхностью:

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R + h}}. \quad (1.30)$$



1

Найти массу Земли и её среднюю плотность, если радиус Земли  $R = 6400$  км, а ускорение свободного падения на её поверхности  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>.



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Расстояние от Земли до Солнца  $R = 150$  млн км. Масса Солнца  $M = 2 \cdot 10^{30}$  кг. Вычислить период обращения Земли вокруг Солнца. С какой скоростью движется Земля по своей орбите?



Ответ: \_\_\_\_\_

3

Космический корабль движется на высоте  $h_1 = 400$  км над поверхностью Земли по круговой орбите. За сколько времени он совершает 1 оборот? Какую скорость он должен иметь, чтобы двигаться по орбите на высоте  $h_2 = 600$  км? Как изменится при этом период его обращения вокруг Земли?



Ответ: \_\_\_\_\_



## 1.3. Законы сохранения в механике

В механике вводятся понятия **кинетической** и **потенциальной** энергии. Их сумма при определённых условиях является постоянной величиной, т. е. сохраняется в процессе движения тел. Закон сохранения механической энергии часто даёт возможность решать задачи механики более простым способом — без применения законов Ньютона.

Наряду с энергией вводится понятие **импульса**. Для импульса, как и для механической энергии, имеет место закон сохранения.



### 1.3.1. МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА И МОЩНОСТЬ

**Работа постоянной силы**  $F$  при перемещении тела на пути  $s$  (рис. 1.13):

$$A = F \cdot s \cos \alpha, (\vec{F} = \text{const}), \quad (1.31)$$

где  $\alpha$  — угол между направлением движения и направлением силы.

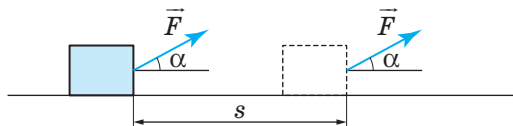


Рис. 1.13

**Мощность** двигателя, совершающего работу  $A$  за время  $t$ :

$$P = \frac{A}{t}. \quad (1.32)$$



## Единицы измерения

Единица измерения работы — **джоуль**:

$$[A] = \text{Дж} = \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Единица измерения мощности — **ватт**:

$$[P] = \text{Вт} = \text{Дж/с}.$$

1

Подъёмник элеватора массой  $m = 10^3$  кг начинает подниматься вертикально с ускорением  $a = 2 \text{ м/с}^2$ . Определить работу за первые  $t = 5$  с движения.



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Трактор массой  $m = 10$  т, развивающий мощность  $P = 150$  кВт, движется в гору с постоянной скоростью  $v = 5 \text{ м/с}$ . Найти угол наклона дороги к горизонту.



Ответ: \_\_\_\_\_

3

Автомобиль массой  $m = 1$  т трогается с места и, двигаясь равноускоренно, проходит за время  $t = 2$  с путь  $s = 20$  м. Какую среднюю мощность развивает мотор этого автомобиля?



Ответ: \_\_\_\_\_





### 1.3.2. КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

**Кинетическая энергия** тела массой  $m$ , движущегося со скоростью  $v$ :

$$K = \frac{mv^2}{2}. \quad (1.33)$$

Кинетическая энергия — это энергия движущегося тела. Она измеряется работой силы трения, совершаемой при его торможении до полной остановки:

$$K = \frac{mv^2}{2} = |A_{\text{тр}}|.$$

**Связь работы с кинетической энергией** — работа приложенной к телу результирующей силы на отрезке траектории 1–2 равна приращению его кинетической энергии:

$$A_{12} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \Delta K, \quad (1.34)$$

где  $v_1$  и  $v_2$  — скорость тела в начале и конце пути.

#### Единицы измерения

Единица измерения кинетической энергии — **джоуль**:

$$[K] = \text{Дж} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2}.$$

1

Камень массой  $m = 5$  кг упал с некоторой высоты на землю за время  $t = 2$  с. Найти его кинетическую энергию в средней точке пути.



Ответ: \_\_\_\_\_



2

Автомобиль, стоящий неподвижно, разгоняется до скорости  $v_1 = 60$  км/ч. Двигатель его совершает при этом работу  $A_1 = 140$  кДж. Какую работу совершит двигатель, продолжив разгон автомобиля до скорости  $v_2 = 120$  км/ч?



Ответ: \_\_\_\_\_

3

Пуля массой  $m = 10$  г попадает в доску толщиной  $d = 4$  см, имея скорость  $v_0 = 600$  м/с. Пробив доску, она вылетает из неё со скоростью  $v = 400$  м/с. Найти среднюю силу сопротивления  $F_c$  при движении пули сквозь доску.



Ответ: \_\_\_\_\_



### 1.3.3. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ В МЕХАНИКЕ

Тело может обладать потенциальной энергией, если на него действует **консервативная сила**. Перемещая тело из исходного — нулевого положения — в данное положение, мы совершаем работу, которую можно вернуть, предоставив телу двигаться в обратном направлении под действием консервативной силы.

**Консервативная сила** — сила, работа которой не зависит от формы траектории движения тела, а определяется только его координатами в начале и конце пути.







К консервативным силам относятся фундаментальные силы природы — **гравитационные, электромагнитные, ядерные и слабые**, а также сила **упругости**, возникающая в теле при его деформации.

К **неконсервативным силам** относятся сила трения, работа которой всегда отрицательна, сила Лоренца, действующая на заряд, движущийся в магнитном поле, сила Кориолиса, возникающая во вращающихся системах отсчёта. Две последние направлены перпендикулярно скорости тела и не совершают работы.

**Потенциальная энергия** — работа консервативной силы при перемещении тела из данного положения в положение, принятое за нулевое:

$$U = A_{10}. \quad (1.35)$$

Потенциальная энергия тела есть запасённая энергия, которая может быть преобразована в работу, кинетическую энергию и другие виды энергии, например в его внутреннюю (тепловую) энергию.

Потенциальной энергией обладают тела, поднятые над Землёй. Например, копёр для забивания свай, гиря часов-ходиков, вода, работающая на гидроэлектростанциях. Сжатая пружина — источник механического движения, широко используемый в технике.

Потенциальная энергия определяется не однозначно — к ней можно добавить постоянное слагаемое, зависящее от выбора нулевого положения. Разность потенциальных энергий тела в каких-либо двух точках пространства не зависит от этого выбора.

**Связь работы с потенциальной энергией** — работа консервативной силы на отрезке траектории 1–2 равна убыли потенциальной энергии тела:



$$A_{12} = U_1 - U_2 = -\Delta U, \quad (1.36)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  — потенциальная энергия тела в начале и конце пути.

Потенциальная энергия тела в **однородном гравитационном поле**:

$$U_{\text{гр}} = mgh, \quad (1.37)$$

где  $m$  — масса тела,  
 $h$  — высота его над поверхностью Земли,  
 $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения.

Потенциальная энергия **упруго деформированной пружины**:

$$U_{\text{упр}} = \frac{kx^2}{2}, \quad (1.38)$$

где  $k$  — жёсткость пружины,  
 $x$  — её удлинение.

**Полная механическая энергия** тела — сумма его кинетической и потенциальной энергии:

$$W = K + U.$$

**Замкнутая система тел** — совокупность тел, на которые не действуют внешние силы. Если между телами действуют только консервативные силы, она называется **консервативной**.

**Закон сохранения энергии в механике.** Полная механическая энергия замкнутой консервативной системы тел не изменяется со временем:

$$K + U = \text{const}. \quad (1.39)$$

Если на тело действуют только консервативные силы, сумма его кинетической и потенциальной энергии



остаётся постоянной — может происходить превращение потенциальной энергии в кинетическую и обратно, но полный запас энергии измениться не может.

**Убыль механической энергии** тела при наличии трения равна работе силы трения, которая превращается в тепло:

$$W_1 - W_2 = |A_{\text{тр}}|, \quad (1.40)$$

где  $W_1$  и  $W_2$  — полная механическая энергия тела в начале и в конце пути.

## Единицы измерения

Единица измерения энергии — **джоуль**:

$$[K] = [U] = [W] = \text{Дж.}$$

1

Тяжёлый шарик, подвешенный на нерастяжимой и невесомой нити длиной  $l$ , отклонён от вертикали на угол  $\alpha$  и отпущен без начальной скорости. Какую скорость  $v$  приобретёт шарик, проходя положение равновесия, если  $l = 1,6$  м,  $\alpha = 60^\circ$ ?



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Какую мощность должен развивать мотор самолёта для обеспечения подъёма самолёта на высоту  $h = 1$  км за время  $t = 1$  мин, если масса самолёта  $m = 3$  т?



Ответ: \_\_\_\_\_



3

Пуля, вылетевшая из винтовки с начальной скоростью  $v_0 = 1000$  м/с, упала на землю со скоростью  $v = 500$  м/с. Какая работа была затрачена во время полёта на преодоление силы сопротивления воздуха, если масса пули  $m = 10$  г?



Ответ: \_\_\_\_\_



### 1.3.4. ИМПУЛЬС ТЕЛА. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

**Импульс тела**  $\vec{p}$  — произведение массы тела  $m$  на его скорость  $\vec{v}$ :

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (1.41)$$

**Второй закон Ньютона.** Скорость изменения импульса тела равна результирующей приложенных к нему сил:

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}_{\text{рез}}. \quad (1.42)$$

Это уравнение представляет второй закон Ньютона в более общей формулировке, когда предполагается, что может изменяться не только скорость, но и масса тела.

**Закон сохранения импульса.** Суммарный импульс замкнутой системы тел не изменяется со временем:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots = \text{const}, \quad (1.43)$$

где  $\vec{p}_i$  — импульс  $i$ -го тела ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ).

Векторное уравнение (1.43) распадается на три независимых уравнения для компонент импульса по осям координат:





$$p_{x1} + p_{x2} + \dots = \text{const}, \quad p_{y1} + p_{y2} + \dots = \text{const}, \\ p_{z1} + p_{z2} + \dots = \text{const}.$$

Если вдоль какого-либо направления на тела системы не действуют внешние силы, то проекция её суммарного импульса на это направление остается постоянной. Это позволяет использовать закон сохранения импульса при решении задач механики.

Как показывает опыт, закон сохранения импульса выполняется при любых взаимодействиях тел внутри замкнутой системы. Соударение тел может быть упругим или неупругим, а взаимодействие тел может осуществляться на расстоянии — посредством полей.

Закон сохранения импульса является одним из фундаментальных законов природы. То обстоятельство, что для произведения  $m\vec{v}$  — массы тела на его скорость — имеет место «закон сохранения», делает целесообразным дать ему специальное название — импульса  $\vec{p}$ .

**Неупругое соударение двух тел** — после соударения тела соединяются и движутся вместе как одно целое.

### Единицы измерения

Единица измерения импульса:

$$[p] = \text{кг} \cdot \text{м/с}.$$

1

Тело массой  $m_1 = 500$  г, движущееся со скоростью  $v_1 = 100$  см/с, сталкивается с неподвижным телом массой  $m_2 = 200$  г, после чего они движутся вместе. Определить кинетическую энергию тел после соударения.



Ответ: \_\_\_\_\_



2

Конькобежец массой  $M = 70$  кг, стоя на льду, бросает в горизонтальном направлении шайбу массой  $m = 0,3$  кг со скоростью  $v = 40$  м/с. На какое расстояние  $s$  откатится конькобежец, если коэффициент трения коньков о лёд  $\mu = 0,02$ ?



Ответ: \_\_\_\_\_

3

Вагон массой  $m = 4 \cdot 10^4$  кг, движущийся со скоростью  $v = 2$  м/с, в конце запасного пути ударяется о пружинный амортизатор. На сколько он сожмёт пружину амортизатора, жёсткость которой  $k = 2,25 \cdot 10^6$  Н/м?



Ответ: \_\_\_\_\_



### 1.3.5. УПРУГОЕ СОУДАРЕНИЕ ТЕЛ

**Удар** — соударение двух тел, приводящее к изменению их скоростей.

**Абсолютно упругий удар** — соударение тел, в результате которого не происходит потери механической энергии — деформация, возникающая при соударении, является упругой.

**Центральный удар** — соударение двух шаров, при котором скорости шаров до и после соударения направлены вдоль прямой, соединяющей их центры.

Рассмотрим применение законов сохранения энергии и импульса на примере соударения упругих шаров, находящихся на гладкой горизонтальной поверхности. Будем



считать, что трение отсутствует, а действующая на них сила тяжести уравновешивается силой реакции опоры. В горизонтальной плоскости движение их происходит свободно.

Два шара массами  $m_1$  и  $m_2$  испытывают центральный абсолютно упругий удар. Скорость первого шара  $v_1$ , второй шар покоится ( $v_2 = 0$ ) (рис. 1.14, а). Требуется найти скорости шаров  $u_1$  и  $u_2$  после их соударения друг с другом (рис. 1.14, б).

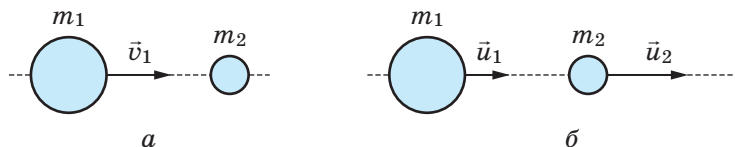


Рис. 1.14

При абсолютно упругом ударе кинетическая энергия шаров до их соударения равна кинетической энергии после соударения:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}.$$

По закону сохранения импульса имеем:

$$m_1 v_1 = m_1 u_1 + m_2 u_2.$$

Перепишем эти уравнения в виде:

$$m_1(v_1^2 - u_1^2) = m_2 u_2^2, \quad m_1(v_1 - u_1) = m_2 u_2.$$

Разделив первое уравнение на второе, получим:

$$v_1 + u_1 = u_2.$$

Решая это уравнение совместно со вторым уравнением, найдём

$$u_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1, \quad u_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1.$$



Если масса первого шара больше массы второго ( $m_1 > m_2$ ), то он будет двигаться в первоначальном направлении. Если его масса меньше ( $m_1 < m_2$ ), он отскакивает в противоположную сторону. При равенстве масс ( $m_1 = m_2$ ) первый шар остановится, а второй пойдёт вперёд со скоростью первого — шары обмениваются скоростями.

1

В ядерных реакторах атомных электростанций в качестве замедлителя нейтронов используется чистый графит — углерод  $^{12}\text{C}$ . Какую долю своей энергии нейтрон передаёт неподвижному атому углерода при их соударении, если удар считать абсолютно упругим центральным?



Ответ: \_\_\_\_\_

## 1.4. Статика

Раздел механики, в котором рассматривается равновесие тел, называется **статикой**.



### 1.4.1. ПРОСТЫЕ МЕХАНИЗМЫ. ЗОЛОТОЕ ПРАВИЛО МЕХАНИКИ

В своей практической деятельности человеку приходится поднимать грузы, вес которых превышает предел, доступный его физической силе. Поэтому он использует для этих целей устройства, преобразующие силу. В их основе лежат простые механизмы, к которым относятся **КЛИН**, **ВИНТ**,





**рычаг** и **ворот**. Принцип действия этих механизмов основан на законе сохранения энергии.

**Неподвижный блок** — цилиндр, закреплённый на неподвижной оси, совпадающей с его осью.

**Составной блок** — два скреплённых друг с другом соосных цилиндра радиусами  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 1.15).

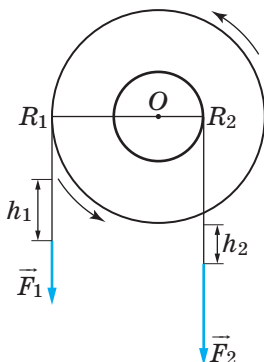


Рис. 1.15

К нитям, намотанным на цилиндры, приложены уравновешивающие друг друга силы  $F_1$  и  $F_2$ .

**Условие равновесия** составного блока:

$$F_1 \cdot R_1 = F_2 \cdot R_2. \quad (1.44)$$

Из этого условия следует, что отношение сил, вращающих блок, обратно пропорционально отношению радиусов цилиндров — чем меньше радиус, тем больше сила.

**Золотое правило механики:**

$$F_1 \cdot h_1 = F_2 \cdot h_2, \quad (1.45)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  — перемещения точек приложения сил  $F_1$  и  $F_2$  при повороте блока на один оборот.



Уравнение (1.45) выражает равенство работ, совершаемых этими силами. Из него следует — чем меньше приложенная сила, тем больший путь следует пройти, чтобы совершить необходимую работу.

**Золотое правило** механики гласит:

Во сколько раз мы выигрываем в силе, во столько же раз проигрываем в пути.

**Условие равновесия рычага**, ось вращения которого проходит через точку  $O$  (рис. 1.16):

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}, \quad (1.46)$$

где  $l_1$  и  $l_2$  — длины плеч рычага,  $F_1$  и  $F_2$  — силы, приложенные к ним.

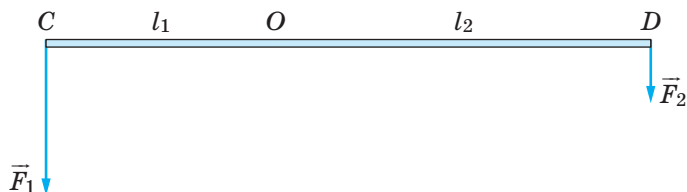


Рис. 1.16

## Единицы измерения

Линейные величины измеряются в **метрах**:

$$[l] = [R] = [h] = \text{м}.$$

Силы измеряются в **ньютонах**:

$$[F] = \text{Н}.$$



1

Стержень цилиндрической формы длиной  $l = 40$  см состоит наполовину своей длины из свинца и наполовину из железа. Найти его центр тяжести. Плотность свинца  $\rho_1 = 11,4$  г/см<sup>3</sup>, плотность железа  $\rho_2 = 7,8$  г/см<sup>3</sup>.



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Масса якоря корабля  $m = 50$  кг. Радиус барабана, на который наматывают якорную цепь,  $R = 0,2$  м, длина каждой из двух ручек ворота  $l = 1$  м. Какую силу нужно приложить к каждой из них, чтобы поднять якорь?



Ответ: \_\_\_\_\_



## 1.4.2. МОМЕНТ СИЛЫ. УСЛОВИЯ РАВНОВЕСИЯ ТВЁРДОГО ТЕЛА

Рассмотрим тело произвольной формы, закреплённое на оси, перпендикулярной плоскости рисунка и проходящей через центр его масс — точку  $O$ . К телу приложено несколько сил, перпендикулярных этой оси и стремящихся повернуть его вокруг неё (рис. 1.17).

**Центр масс тела** — точка, масса которой равна массе тела, а сила, действующая на неё, равна сумме сил, приложенных к материальным точкам, на которые можно мысленно разбить тело.

В однородном поле центр масс тела совпадает с **центром тяжести** — точкой приложения силы притяжения его к Земле — веса тела  $P$ .

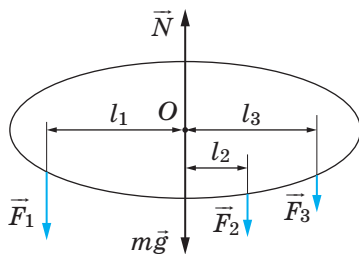


Рис. 1.17

У тел, имеющих какую-либо симметрию, он совпадает с центром симметрии. Например, у однородного цилиндра центр тяжести расположен на его оси в центре цилиндра.

Тело, закреплённое на оси, проходящей через его центр тяжести, находится в состоянии **безразличного равновесия**.

**Момент силы**  $\vec{F}$  относительно оси — произведение проекции вектора  $\vec{F}$  на перпендикулярную к оси плоскость на плечо силы:

$$M = F_{\perp} \cdot l. \quad (1.47)$$

**Плечо силы** — расстояние  $l$  от оси до линии действия силы  $\vec{F}$ .

Равновесие достигается, если сумма моментов сил, вращающих тело в направлении часовой стрелки ( $M_{\text{прав}}$ ), равна сумме моментов сил, вращающих его против часовой стрелки ( $M_{\text{лев}}$ ).

Для тела, изображённого на рис. 1.17, это условие имеет вид:

$$F_2 \cdot l_2 + F_3 \cdot l_2 = F_1 \cdot l_1,$$

поскольку момент силы тяжести  $mg$  и момент силы реакции опоры  $N$  оба равны нулю, т. к. ось  $O$  проходит через центр масс тела.

Тело как целое будет покоиться, если наряду с указанным выше условием для моментов сил выполняется и второе условие — сумма сил  $\vec{F}_i$ , действующих на тело, равна нулю.

Для нашего тела, когда векторы сил лежат в одной плоскости, оно приобретает вид:

$$N = mg + F_1 + F_2 + F_3.$$

**Условия равновесия** твёрдого тела:

$$M_{1\text{прав}} + M_{2\text{прав}} + \dots = M_{1\text{лев}} + M_{2\text{лев}} + \dots, \quad (1.48)$$

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots = 0, \quad (1.49)$$

Уравнения (1.48) и (1.49) составляют систему уравнений, позволяющую найти две неизвестные величины.

Равновесие тела может быть **устойчивым**, **неустойчивым** и **безразличным**. Пример тому — шарик в лунке, на сфере и на горизонтальной поверхности.

В первом случае (рис. 1.18, а) при смещении шарика сила тяжести возвращает его в исходную точку, во втором случае (рис. 1.18, б) — удаляет от неё. В третьем случае (рис. 1.18, в) при удалении шарика от его первоначального положения не возникает сил, стремящихся вернуть или удалить его от этой точки.

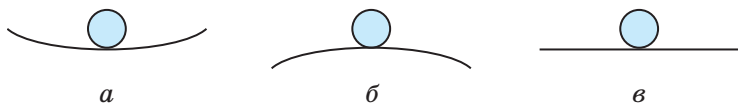


Рис. 1.18



## Единицы измерения

Единица измерения момента силы — **ньютон-метр**:

$$[M] = \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Плечо силы измеряется в **метрах**:

$$[l] = \text{м}.$$

1

Два человека несут трубу весом  $P = 160 \text{ Н}$ . Один человек поддерживает трубу на расстоянии  $l_1 = 1 \text{ м}$  от её конца, а второй держит противоположный конец трубы. Определить нагрузку, приходящуюся на каждого человека, если длина трубы  $l = 5 \text{ м}$ .



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Колесо радиусом  $R = 0,25 \text{ м}$  и массой  $m = 5 \text{ кг}$  стоит перед ступенькой высотой  $h = 0,1 \text{ м}$ . Какую наименьшую горизонтальную силу  $F$  надо приложить к оси колеса  $O$ , чтобы оно смогло подняться на ступеньку?



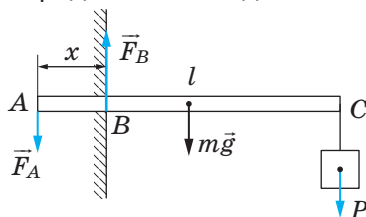
Ответ: \_\_\_\_\_

3

Балка массой  $m = 150 \text{ кг}$  заделана одним концом в стену и опирается в точках  $A$  и  $B$  (см. рис.). На другом её конце находится груз весом  $P = 1,5 \cdot 10^3 \text{ Н}$ . Длина балки  $l = 2 \text{ м}$ ,



длина закреплённого конца  $|AB| = 0,5$  м. Считая, что вся нагрузка воспринимается опорами  $A$  и  $B$ , определить силы давления в опорах.



Ответ: \_\_\_\_\_



### 1.4.3. ГИДРОСТАТИКА

**Давление**, оказываемое силой  $\vec{F}$  на поверхность площадью  $S$ :

$$p = \frac{F_{\perp}}{S}, \quad (1.50)$$

где  $F_{\perp}$  — проекция вектора силы на нормаль к поверхности.

**Давление жидкости** на глубине  $h$  (рис. 1.19):

$$p = \rho gh, \quad (1.51)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости,  
 $g$  — ускорение свободного падения.

Из этой формулы следует, что давление, которое жидкость оказывает на некоторую площадку, не зависит от ориентации площадки и её площади. Поэтому, если взять сообщающиеся сосуды произвольной формы и произвольного поперечного сечения, уровни жидкости в них будут одинаковыми (рис. 1.20).

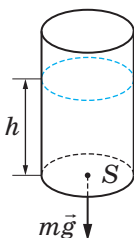


Рис. 1.19

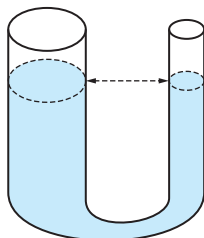


Рис. 1.20

**Закон Паскаля.** Давление, оказываемое на жидкость или газ, передаётся по всем направлениям одинаково. Закон Паскаля лежит в основе работы механизмов, предназначенных для передачи движения на расстояние. Передача движения может осуществляться не только с помощью механических приводов — валов, тросов, зубчатых передач, — но и с помощью трубопроводов, наполненных жидкостью или газом. Этот способ передачи механического движения очень удобен и часто является единственно возможным. Он используется там, где не требуется большой точности перемещения движущихся частей, но нужны большие усилия. Например, в тормозных системах автомобилей, в гидравлических прессах, гидроприводах. Аналогичные задачи выполняет и воздух, используемый в системах торможения поездов, тяжёлых транспортных средств, при устройстве пневматических входных дверей в вагонах метро и во многих других случаях.

Для иллюстрации этого закона рассмотрим два сообщающихся друг с другом сосуда — цилиндра с поршнями, — содержащих жидкость (рис. 1.21). Сила  $F_1$ , действующая на первый поршень площадью  $S_1$ , создаёт в жидкости дополнительное давление  $p = \frac{F_1}{S_1}$ . Это дав-



ление, оказываемое жидкостью одинаково на любой участок поверхности соприкосновения её со стенками сосудов, на втором поршне порождает силу  $F_2 = p \cdot S_2$ . Сила  $F_2$  больше силы  $F_1$ , поскольку площадь второго поршня  $S_2$  больше площади  $S_1$  первого:

$$F_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1}. \quad (1.52)$$

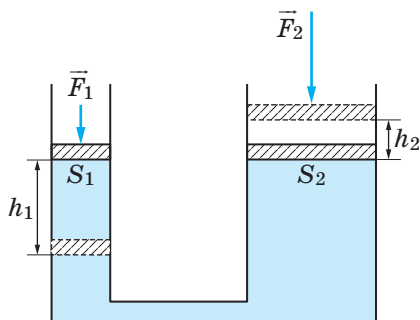


Рис. 1.21

Устройство с сообщающимися сосудами, использующее для передачи движения жидкость, подобно рычагу, может служить для преобразования силы. Для него выполняется золотое правило механики. Опуская поршень первого цилиндра на глубину  $h_1$ , мы заставляем часть жидкости объёмом  $V_1 = S_1 \cdot h$  перейти во второй цилиндр и поднять его поршень на высоту  $h_2$ . Поскольку жидкость практически несжимаема,  $V_2 = S_2 \cdot h_2 = V_1$ , откуда следует, что

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{h_1}{h_2}.$$



Подставляя в (1.52), получим

$$F_2 = F_1 \frac{h_1}{h_2}. \quad (1.53)$$

Это уравнение выражает **золотое правило механики** — равенство работ, совершаемых первым и вторым поршнями ( $A_1 = F_1 \cdot h_1$ ,  $A_2 = F_2 \cdot h_2$ ,  $A_1 = A_2$ ).

Описанное устройство используется в гидравлических прессах. Предмет (тело), которое требуется сжать, помещают между большим поршнем и неподвижной массивной станиной. Используя цилиндры, многократно отличающиеся диаметрами, можно получить весьма большие усилия на рабочем поршне пресса, прикладывая сравнительно небольшую силу на его малом поршне. Малый поршень совершает повторяющиеся движения вдоль оси цилиндра и добавляет жидкость в большой цилиндр, восполняя из отдельной ёмкости её убыль в малом цилиндре.

Соотношение сил, действующих на поршни гидравлического пресса (рис. 1.21):

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}, \quad (1.54)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  — площади поршней.

## Единицы измерения

Давление измеряется в **паскалях**:

$$[p] = \text{Па} = \text{Н} / \text{м}^2.$$





1

В сообщающихся сосудах находится ртуть. Диаметр одного сосуда в два раза больше диаметра другого. В узкий сосуд наливают воду, столб которой имеет высоту  $h = 0,7$  м. На сколько понизится уровень ртути в узком сосуде и на сколько повысится её уровень в широком? Плотность воды  $\rho_v = 1$  г/см<sup>3</sup>, ртути —  $\rho = 13,6$  г/см<sup>3</sup>.



Ответ: \_\_\_\_\_

2

В сообщающиеся сосуды разного сечения налита ртуть. Поверх неё в одной из трубок находится столб воды высотой  $h_1 = 0,8$  м, а в другой — столб керосина высотой  $h_1 = 0,2$  м. Определить разность уровней ртути. Плотность воды  $\rho_1 = 1$  г/см<sup>3</sup>, керосина —  $\rho_2 = 0,8$  г/см<sup>3</sup>, ртути —  $\rho = 13,6$  г/см<sup>3</sup>.



Ответ: \_\_\_\_\_

3

Площади поршней гидравлического пресса  $S_1 = 2$  см<sup>2</sup> и  $S_2 = 400$  см<sup>2</sup>. Определить силу давления на большой поршень и высоту его поднятия, если при опускании малого поршня на  $h_1 = 0,2$  м производится работа  $A_1 = 98$  Дж.



Ответ: \_\_\_\_\_



### 1.4.4. ПЛАВАНИЕ ТЕЛ. ЗАКОН АРХИМЕДА

Тела, опущенные в воду, могут плавать на её поверхности или идти ко дну. Условие плавания тел дается **законом Архимеда**.

**Закон Архимеда.** На тело, погружённое в жидкость или газ, действует выталкивающая сила, равная весу жидкости или газа, вытесненных этим телом:

$$F_A = \rho g V, \quad (1.55)$$

где  $V$  — объём тела,

$\rho$  — плотность жидкости или газа,

$g$  — ускорение свободного падения.

Эта сила, называемая силой Архимеда, уменьшает вес тела в жидкости по сравнению с весом его в воздухе (вакууме) на величину, равную весу  $P$  вытесненной телом жидкости ( $P = mg = \rho Vg$ ). Если вес этой жидкости меньше веса тела, то оно не сможет плавать и пойдёт ко дну. Поскольку вес тела  $P_T = \rho_T Vg$ , это будет в том случае, когда его плотность больше плотности жидкости ( $\rho_T > \rho$ ). В противном случае ( $\rho_T < \rho$ ) сила Архимеда превысит вес тела, и оно начнёт подниматься вверх до тех пор, пока часть его не окажется над поверхностью жидкости. Объём погружённой части тела установится таким, чтобы вес вытесненной им жидкости был равен весу всего тела.

**Условие плавания тел.** Вес жидкости, вытесненной погружённой частью тела, равен весу всего тела:

$$P_{\text{ж}} = P. \quad (1.56)$$

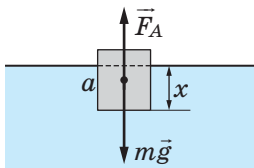
#### Единицы измерения

Объём измеряется в **кубических метрах**:

$$[V] = \text{м}^3.$$



- 1 Плотность дерева, из которого изготовлен кубик,  $\rho = 520 \text{ кг/м}^3$ , а плотность воды  $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ . На сколько сантиметров кубик погрузится в воду, если длина его ребра  $a = 10 \text{ см}$ ?



Ответ: \_\_\_\_\_

- 2 Кусок стекла падает в воде с ускорением  $a = 5,8 \text{ м/с}^2$ . Найти плотность стекла, если плотность воды  $\rho_{\text{в}} = 1 \text{ г/см}^3$ . Соппротивлением среды пренебречь.



Ответ: \_\_\_\_\_

## 1.5. Гармонические колебания

Колебательные процессы широко распространены в природе и технике. Примерами таких процессов служат качание маятника часов, волны на воде, переменный электрический ток, свет, звук.

Механические колебания совершают твёрдые тела. Для возникновения колебаний необходимо, чтобы тело находилось в положении устойчивого равновесия, поскольку при отклонении от него появляется сила, возвращающая тело в это положение. При небольших отклонениях сила

пропорциональна отклонению и колебания будут **гармоническими**, т. е. простыми, которые описываются синусом или косинусом.



### 1.5.1. АМПЛИТУДА, ФАЗА, ПЕРИОД И ЧАСТОТА ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

**Гармоническая сила** — сила, пропорциональная смещению тела от положения равновесия и направленная к положению равновесия.

**Гармонические колебания** — колебания, происходящие под действием гармонической силы.

**Гармонический осциллятор** — тело, совершающее гармонические колебания.

**Пружинный маятник** — тело, закреплённое на пружине, совершающее гармонические колебания.

Движение пружинного маятника, представленного на рис. 1.22, происходит без трения вдоль координатной оси  $X$ . В положении равновесия геометрический центр тела расположен в точке  $x = 0$ .

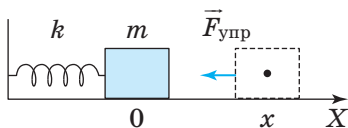


Рис. 1.22

Если пружину растянуть или сжать, возникает упругая сила, пропорциональная величине деформации  $x$ , стремящаяся вернуть тело в исходное положение:

$$F = -kx, \quad (1.57)$$

где  $k$  — жёсткость пружины.



Под действием этой силы тело начинает двигаться. По мере приближения к положению равновесия она ослабевает и обращается в ноль в точке  $x = 0$ . Однако тело продолжает движение по инерции, имея в этой точке наибольшую скорость. При переходе через положение равновесия пружина начинает сжиматься и действует в обратную сторону. Тело останавливается, отклонившись влево на то же расстояние, на каком оно было справа. Движение тела возобновляется в обратном направлении до тех пор, пока оно не вернётся в исходную точку пути. Пружинный маятник совершает свободные гармонические колебания.

**Свободные колебания** — колебания, совершаемые без воздействия внешних сил.

**Уравнение** гармонических колебаний:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (1.58)$$

где  $x$  — смещение тела от положения равновесия,

$A$  — амплитуда колебаний,

$\omega$  — циклическая частота колебаний,

$(\omega t + \varphi_0)$  — фаза колебаний ( $\varphi_0$  — начальная фаза).

**Амплитуда колебаний  $A$**  — наибольшее отклонение тела от положения равновесия.

**Период колебаний** — время, за которое совершается одно колебание:

$$T = \frac{t}{N}, \quad (1.59)$$

где  $N$  — полное число колебаний.

**Частота колебаний** — число колебаний, совершаемых за единицу времени:

$$\nu = \frac{N}{t} = \frac{1}{T}. \quad (1.60)$$



Гармонические колебания пружинного маятника можно представить как колебания проекции на вертикальную ось  $X$  точки  $M$ , равномерно обращающейся по окружности радиуса  $A$  с угловой скоростью  $\omega$  (рис. 1.23, а). Проекция радиуса  $OM$  на эту ось

$$x = A \sin \varphi.$$

Угол  $\varphi$  равномерно возрастает со временем. Если в начале движения положение точки  $M$  характеризовалось углом  $\varphi_0$ , то с учетом (1.6) и (1.14)

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \omega t.$$

Смещение тела в момент времени  $t$  — зависимость координаты его центра от времени — даётся уравнением (1.58) и изображается **синусоидой** (рис. 1.23, б).

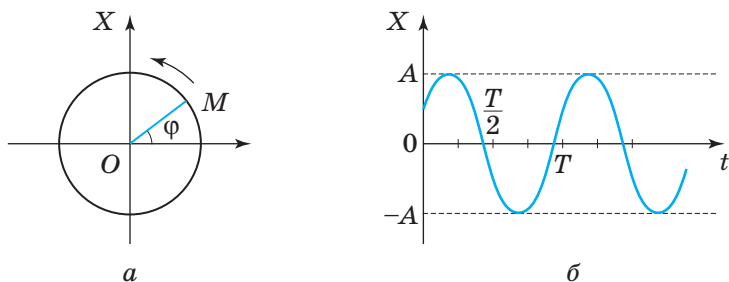


Рис. 1.23

Угловая скорость  $\omega$ , с которой точка  $M$  обращается по окружности, называется **циклической частотой** колебаний.

**Циклическая частота** колебаний:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}. \quad (1.61)$$







**Фаза колебаний** — величина, стоящая под знаком синуса, характеризующая смещение тела и его скорость в момент времени  $t$ .

Фаза колебаний — угол  $\varphi$  между радиусом  $OM$  и горизонтальной осью, соответствующей положению равновесия маятника, — показывает, в какую сторону в данный момент времени отклонён маятник от своего положения равновесия и куда — вправо или влево — направлена его скорость.

Это видно из графика (см. рис. 1.23, б). Так, в момент времени  $\frac{T}{2}$  маятник смещён от точки  $x = 0$  (см. рис. 1.22) влево и это смещение продолжает увеличиваться, т. е. его скорость в данный момент тоже направлена влево. В момент времени  $T$  маятник смещён вправо и удаляется от своего положения равновесия.

Начальная фаза колебаний  $\varphi_0$  показывает те же величины в момент времени  $t = 0$ . Если  $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$ , начальное смещение маятника  $x(0) = A$ , его начальная скорость равна нулю и движение маятника описывается косинусоидой:

$$x(t) = A \cos \omega t.$$

Период колебаний **пружинного маятника**:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (1.62)$$

где  $m$  — масса тела,  
 $k$  — жёсткость пружины.

Гармонические колебания совершает и **математический маятник** (рис. 1.24). Равнодействующая  $F$  силы



тяжести  $mg$  и силы натяжения нити  $F_n$  является гармонической силой. Движение маятника сопровождается переходом потенциальной энергии шарика в его крайних положениях в кинетическую энергию в нижней точке.

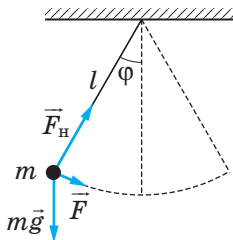


Рис. 1.24

**Математический маятник** — маленький шарик на длинной нити, совершающий колебания в поле тяжести Земли.

Период колебаний **математического маятника**:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (1.63)$$

где  $l$  — длина маятника,  
 $g$  — ускорение свободного падения.

**Изохронность** — независимость периода колебаний маятника от амплитуды.

Это свойство присуще любому гармоническому осциллятору и используется в механических часах.

### Единицы измерения

Смещение тела от положения равновесия измеряется в **метрах**:

$$[x] = \text{м}.$$





Период измеряется в **секундах**:

$$[T] = \text{с}.$$

Частота измеряется в **герцах**:

$$[\nu] = \text{Гц} = \frac{1}{\text{с}}.$$

1

Маленький шарик, подвешенный на длинной нити, совершая колебания, проходит через положение равновесия с интервалом времени  $\Delta t = 1$  с. Какова частота его колебаний?



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Как и во сколько раз изменится период колебаний пружинного маятника, если шарик на пружине заменить другим шариком, радиус которого вдвое меньше, а плотность — в два раза больше?



Ответ: \_\_\_\_\_

3

Два математических маятника за одно и то же время совершают — первый  $N_1 = 30$ , а второй  $N_2 = 40$  колебаний. Какова длина каждого из них, если разность их длин  $\Delta l = 7$  см?



Ответ: \_\_\_\_\_



## 1.5.2. ЭНЕРГИЯ ГАРМОНИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛЯТОРА

Вопрос об энергии гармонического осциллятора рассмотрим на примере пружинного маятника (рис. 1.22).

Первоначальный запас потенциальной энергии  $U$ , которую мы ему сообщаем растягивая пружину на величину  $A$ , при движении постепенно превращается в кинетическую энергию тела  $K$ . Благодаря инерции маятник проходит положение равновесия и отклоняется в обратную сторону. Затем он снова начинает движение и возвращается в исходное положение. Потенциальная энергия маятника в крайнем левом положении переходит в кинетическую энергию в средней точке, которая, в свою очередь, переходит в потенциальную энергию в крайнем правом положении.

В течение одного периода полная энергия  $W = K + U$  дважды целиком переходит в кинетическую энергию и дважды — в потенциальную (рис. 1.25). Средние их значения совпадают. Полная энергия, равная их сумме, пропорциональна квадрату амплитуды колебаний и квадрату частоты. Эта закономерность справедлива для любого гармонического осциллятора.

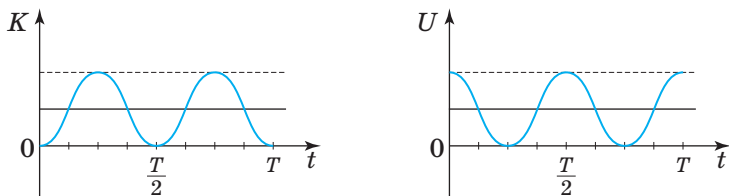


Рис. 1.25





**Энергия** пружинного маятника:

$$W = \frac{m\omega^2 A^2}{2}, \quad (1.64)$$

где  $m$  — масса маятника,  
 $A$  — амплитуда колебаний,  
 $\omega$  — циклическая частота.

1

Математический маятник совершает колебания с амплитудой  $A = 0,03$  м. Определить наибольшую скорость, которой обладает груз маятника, если период колебаний  $T = 3,9$  с.



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Гиря, подвешенная на пружине, колеблется с амплитудой  $A = 3$  см. Жёсткость пружины  $k = 980$  Н/м. Определить наибольшую кинетическую энергию гири.



Ответ: \_\_\_\_\_

3

Период колебаний математического маятника в стартующей ракете стал в 2 раза меньше, чем на Земле. Считая ускорение свободного падения  $g$  неизменным, найти ускорение ракеты  $a$ .



Ответ: \_\_\_\_\_



### 1.5.3. ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ

**Затухающие колебания** — колебания, амплитуда которых уменьшается с течением времени.

На практике всякая колебательная система непрерывно отдаёт свою энергию среде. Вследствие этого колебания затухают, а их амплитуда уменьшается до тех пор, пока движение не прекратится полностью (рис. 1.26). Причины затухания обусловлены силой трения, тормозящей движение пружинного маятника, или силой сопротивления среды, действующей на математический маятник.

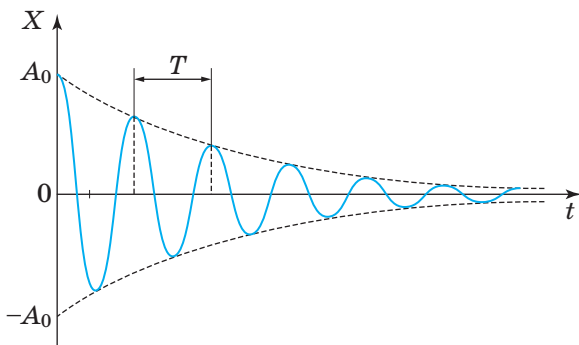


Рис. 1.26

Колебания маятника при наличии трения уже не будут периодическими, поскольку каждое следующее колебание отличается от предыдущего. Периодом таких колебаний можно считать промежуток времени между двумя последовательными моментами наибольшего отклонения его от положения равновесия, совершаемого в одну и ту же сторону. Чаще всего, однако, потери энергии

малы и тело успевает совершить до остановки огромное число колебаний.

В механических часах потери энергии восполняются путём подвода её от источника, например сжатой пружины, осуществляемого в определённые моменты времени синхронно с колебаниями маятника.



### 1.5.4. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ. РЕЗОНАНС

**Вынужденные колебания** — колебания, происходящие под действием периодической силы с частотой этой силы.

Свободные гармонические колебания, совершаемые колебательной системой, например пружинным маятником, происходят в результате взаимодействия её частей друг с другом и имеют частоту, зависящую от её характеристик. В случае пружинного маятника — это масса груза  $m$  и жёсткость пружины  $k$ , так что собственная его частота

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Колебательное движение может совершать любое тело, если к нему приложить периодически изменяющуюся силу. Именно так движется игла швейной машины или поршни в цилиндрах двигателя автомобиля.

Вынужденные колебания колебательной системы тоже происходят с частотой вынуждающей силы, однако их амплитуда существенно зависит от частоты этой силы. Здесь наблюдается **явление резонанса**.



**Резонанс** — совпадение частоты вынуждающей силы с собственной частотой колебаний системы, при котором амплитуда её вынужденных колебаний достигает наибольшего значения.

На рис. 1.27 представлена зависимость амплитуды вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы в двух случаях — когда трение мало (кривая 1) и когда трение велико (кривая 2).

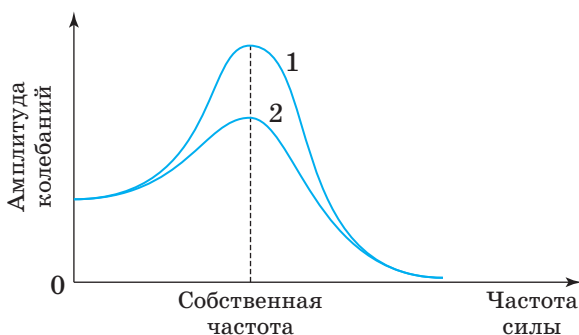


Рис. 1.27

Резкое увеличение амплитуды при резонансе может привести к поломке движущихся частей машин или разрушению строительных конструкций, например мостов. Поэтому при их проектировании вопросам безопасности уделяют особое внимание.

Явление резонанса находит практическое применение в устройствах, служащих для анализа звука, — механических и акустических резонаторах. Простейшим механическим резонатором является струна с закреплёнными концами или мембрана. Акустический резонатор — сосуд, сообщающийся с внешней средой через небольшое отверстие.





В радиотехнике явление резонанса лежит в основе многочисленных способов фильтрации сигналов разных частот, обнаружения и приёма слабых сигналов.

1

При какой скорости поезда  $v$  вагоны будут иметь максимальную амплитуду колебаний под действием толчков колёс о стыки рельс, если длина рельса  $l = 12,5$  м, нагрузка на рессору  $P = 5,5$  кН, а её жёсткость  $k = 6,25 \cdot 10^4$  Н/м?



Ответ: \_\_\_\_\_

## 1.6. Волны в упругой среде

Если тело, совершающее колебательное движение, находится в упругой среде, оно приводит в движение частицы этой среды и колебания распространяются в пространстве в виде волны.



### 1.6.1. МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ВОЛН В УПРУГОЙ СРЕДЕ

Процесс распространения колебаний в пространстве называется **волной**.

Примером волн, которые можно наблюдать, служат волны на поверхности воды. Они хорошо иллюстрируют присущее всем волнам свойство — распространяясь в пространстве, волна не переносит вещества. Так, щепка, плавающая на водной поверхности озера, совершает



колебания вверх-вниз, оставаясь на одном месте, в то время как волна непрерывно перемещается.

**Источник волн** — тело, совершающее колебания в упругой среде.

Самыми распространёнными среди упругих волн являются **звуковые волны** в воздухе. Их источниками могут быть капли дождя, шум прибоя, ветер, вспышка молнии или пение птиц, животные и сам человек. Источниками звука служат различные музыкальные инструменты.

**Продольная волна** — волна, в которой частицы среды колеблются вдоль направления её распространения.

Среда, передающая колебания от точки к точке, обладает упругостью на сжатие или сдвиг. Жидкости и газы не обладают сдвиговой упругостью — сдвиг одного слоя жидкости относительно другого не порождает сил, стремящихся вернуть его в первоначальное положение. В газах и жидкостях могут распространяться только продольные волны.

**Поперечная волна** — колебания частиц среды происходят в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны.

В твёрдых телах кроме продольных могут распространяться волны поперечные. Существование поперечных волн объясняется свойственной твёрдым телам сдвиговой упругостью. Если кубик из железа или другого металла закрепить одной гранью на горизонтальной поверхности, а противоположную грань немного сдвинуть, приложив к ней горизонтальную силу, то после снятия нагрузки кубик благодаря сдвиговой упругости восстановит свою форму. Пружина, растягиваясь или сжимаясь, демонстрирует нам сдвиговую упругость кручения.





Наглядным примером поперечных волн служат волны на поверхности жидкости, хотя механизм образования таких волн связан с действием на частицы жидкости силы тяжести, а не сдвиговой упругости.

**Волновое поле** — область пространства, в которой происходят колебания частиц среды.

**Фронт волны** — поверхность, отделяющая волновое поле от остальной части пространства, в которой колебания ещё не начались.

Распространение колебаний в среде сопровождается перемещением фронта волны со скоростью, зависящей от свойств среды.

**Скорость волны** — расстояние, на которое перемещается фронт волны за 1 секунду.

**Длина волны** — расстояние, проходимое фронтом волны за время, равное периоду колебаний источника.

**Основное уравнение** волнового процесса:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot \nu, \quad (1.65)$$

где  $v$  — скорость волны,

$\lambda$  — длина волны,

$\nu$  — частота колебаний источника,

$T$  — период его колебаний.

### Единицы измерения

Длина волны измеряются в **метрах**:

$$[\lambda] = \text{м}.$$

Единица измерения частоты — **герц**:

$$[\nu] = 1/\text{с} = \text{Гц}.$$



Скорость волны измеряется в **метрах в секунду**:

$$[v] = \text{м/с}.$$

1

Какое расстояние за один период колебаний пройдёт фронт звуковой волны частотой  $\nu = 1200$  Гц? Скорость звука в воздухе  $v = 340$  м/с.



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Расстояние между гребнями волн в море  $\lambda = 5$  м. При встречном движении катера волна за  $t = 1$  с ударяет о корпус катера  $N_1 = 4$  раза, а при попутном —  $N_2 = 2$  раза. Найти скорость катера и волны.



Ответ: \_\_\_\_\_



## 1.6.2. ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

**Звуковые волны** — волны с частотами в диапазоне от 16 до 20 000 Гц.

Звук обуславливается механическими колебаниями в упругих средах, частоты которых способно воспринимать человеческое ухо. Колебания с этими частотами называются **звуковыми** или **акустическими** (**акустика** — учение о звуке).

Неслышимые механические колебания с частотами ниже звукового диапазона называются **инфразвуковыми**, а с частотами выше звукового диапазона — **ультразвуковыми**.





**Музыкальный тон** — звук, испускаемый источником, совершающим гармонические колебания.

Мы различаем **музыкальные звуки** (пение, свист, звон, звучание струн, духовых музыкальных инструментов) и **шумы** (треск, стук, скрип, шипение). Отличие их в том, что музыкальные звуки более простые по форме, чем шумы — наложение музыкальных звуков может создать шум, но из шума нельзя извлечь музыку.

**Высота тона** — частота звуковых волн.

Высота тона определяется частотой колебаний — чем выше частота, тем более высокий звук мы слышим.

**Громкость тона** — энергия колебаний источника звука.

Громкость тона какой-либо данной высоты определяется амплитудой волны — громкость (или интенсивность звука) пропорциональна квадрату амплитуды.

**Частота звука**, излучаемого струной длины  $l$ :

$$\nu = \frac{c}{2l}, \quad (1.66)$$

где  $c$  — скорость звука в струне.

**Обертоны** (гармоники) — звуковые волны с частотами

$$\nu_n = n \frac{c}{2l}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (1.67)$$

Любое негармоническое колебание частотой  $\nu$  можно представить в виде наложения (суперпозиции) гармонических колебаний с частотами  $\nu$ ,  $2\nu$ ,  $3\nu$  и т. д. Первое из них — частотой  $\nu$  — называется **основным тоном**, а остальные — **обертонами**, или **гармониками**.

**Тембр** — окраска звука, обусловленная наложением гармоник.

Возьмем в качестве источника звука струну длиной  $l$  (рис. 1.28). Колебания струны можно возбудить с помощью удара или щипка. Можно использовать для этого скрипичный смычок, натёртый для создания трения канифолью. В спектре звучания струны будут присутствовать гармоники, выражаемые формулой (1.67).

Число  $n$  нумерует гармоники. Значение  $n = 1$  соответствует основному тону. Амплитуда колебаний струны этой частоты  $A_1$  имеет наибольшую величину в её середине (рис. 1.28, а). Амплитуда колебаний первой гармоники  $A_2$  максимальна в двух точках струны (рис. 1.28, б), амплитуда колебаний второй гармоники  $A_3$  — в трёх точках (рис. 1.28, в) и т. д. Амплитуды высших гармоник убывают по величине, а некоторые из гармоник могут и вовсе отсутствовать. Чем больше обертонов в спектре, тем богаче тембр звука в музыкальном отношении. В зависимости от соотношения их амплитуд окраска звука меняется. Высокие обертоны придают тембру «блеск», «яркость» и «металличность», низкие дают характер «мощности» и «сочности».

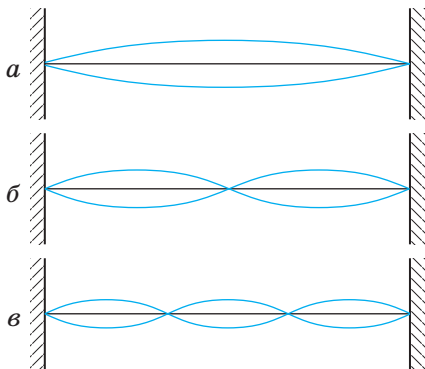


Рис. 1.28

По тембру мы легко распознаём звук голоса, звучание струны рояля, скрипичной струны, звук флейты, органа и т. д., даже если эти звуки имеют одну и ту же высоту и громкость.

Колебания с разными частотами накладываются друг на друга и дают результирующее колебание, форма которого (в развёртке по времени) зависит от его состава. На рис. 1.29 изображены звуковые колебания, создаваемые струной рояля и кларнетом.

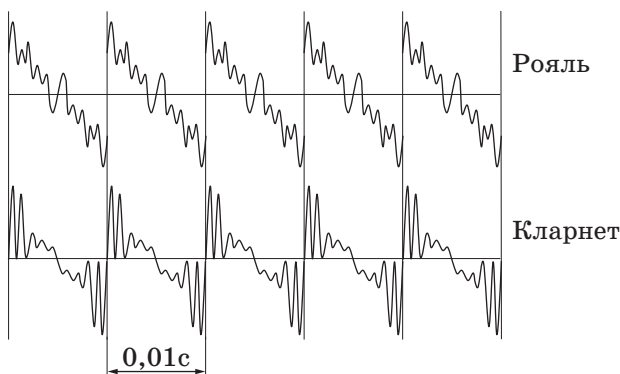


Рис. 1.29

1

Минимальная и максимальная частоты, воспринимаемые человеческим ухом, равны соответственно  $\nu_{\min} = 16$  Гц и  $\nu_{\max} = 20$  кГц. Какие длины волн в воздухе им соответствуют? Скорость звука в воздухе  $\nu = 330$  м/с.



Ответ: \_\_\_\_\_



2

Звуковые колебания, имеющие частоту  $\nu = 500$  Гц и амплитуду  $A = 0,25$  мм, распространяются в воздухе. Длина волны  $\lambda = 70$  см. Найти скорость распространения колебаний  $v$  и максимальную скорость частиц среды.



Ответ: \_\_\_\_\_







## 2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

**Молекулярная физика и термодинамика** исследуют тепловые свойства тел. При изучении механики мы видели, что благодаря трению между телами их механическая энергия переходит в тепловую. Механика не рассматривает внутреннее строение тел и не конкретизирует понятие их **внутренней** (или **тепловой**) энергии. Это понятие вводится в термодинамике и молекулярной физике, составляющих единый раздел физики.

**Молекула** — мельчайшая частица вещества, сохраняющая его химические свойства.

**Термодинамическая система** — совокупность большого числа атомов или молекул, образующих твёрдое, жидкое или газообразное тело.

**Внутренняя (или тепловая) энергия тела** — энергия движения и взаимодействия друг с другом атомов или молекул, из которых оно состоит.

**Агрегатное состояние вещества** — твёрдое, жидкое или газообразное состояние, в котором оно может пребывать.

**Фазовый переход** — переход вещества из одного агрегатного состояния в другое, происходящий при изменении его температуры или давления.

### 2.1. Молекулярная физика

**Молекулярная физика**, называемая ещё **молекулярно-кинетической теорией**, исследует тепловые свойства тел, используя конкретные модели их строения.



### 2.1.1. МОДЕЛИ СТРОЕНИЯ ТЕЛ. ГАЗЫ, ЖИДКОСТИ И ТВЁРДЫЕ ТЕЛА

**Молекулярная физика** опирается на три основанных на опыте положения:

1. Все тела состоят из атомов или молекул.
2. Атомы или молекулы, из которых состоят тела, находятся в непрерывном движении, скорость которого возрастает с температурой.
3. Молекулы взаимодействуют между собой. Взаимодействие носит характер притяжения на больших расстояниях и отталкивания — на малых.

**Твёрдое тело** — упорядоченно расположенные в пространстве атомы или молекулы, образующие кристаллическую решётку.

Молекулы веществ состоят из **атомов**, в переводе с греческого означающих «неделимые частицы». Роль молекул могут выполнять и атомы. Таковы, например, одноатомные молекулы инертных газов — гелия, аргона, неона и др. Металлы также состоят из атомов. Говоря о молекулах, часто имеют в виду и атомы. Характер движения этих частиц в разных телах различен.

В **твёрдых телах** они занимают определённые положения в пространстве, образуя так называемую **кристаллическую решётку**, совершая вблизи них колебательное движение. Твёрдые тела имеют собственную форму и объём.

На рис. 2.1 изображена кристаллическая решётка поваренной соли NaCl. Она имеет кубическую форму и состоит из чередующихся друг с другом ионов натрия и хлора.



Для кристаллов характерен **дальний порядок** в расположении их атомов. Если мысленно перемещаться вдоль прямой, соединяющей соседние атомы, то, отсчитав целое число отрезков длиной, равной расстоянию между ними, мы обнаружим в этом месте атом. Места расположения атомов в кристалле называются **узлами** кристаллической решётки.

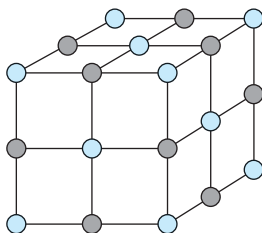


Рис. 2.1

**Жидкость** — совокупность подвижных молекул, среднее расстояние между которыми в процессе их движения остается неизменным.

В жидкостях отсутствует дальний порядок. Они не имеют собственной формы, но имеют собственный объём. Схематически жидкость изображена на рис. 2.2.

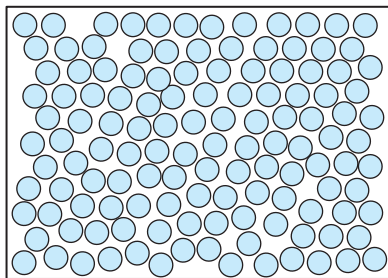


Рис. 2.2

**Газ** — совокупность свободно движущихся молекул, расстояния между которыми намного превышают их размер. Большую часть времени молекулы газа движутся свободно, изредка сталкиваясь друг с другом и со стенками содержащего их сосуда. Газы не имеют ни собственной формы, ни объёма. Они занимают весь объём того сосуда, в котором находятся (рис. 2.3).

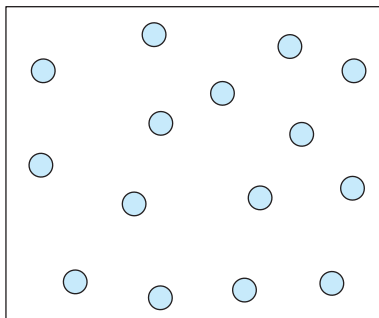


Рис. 2.3

Принадлежность тела к газообразным, жидким или твёрдым зависит от его природы, а также от давления и температуры. Всякое тело может находиться в любом из перечисленных агрегатных состояний. Переходы из одного состояния в другое, т. е. из жидкой фазы в газообразную или из твёрдой в жидкую и обратно, называются **фазовыми переходами**.

**Диффузия** — проникновение молекул какого-либо вещества в среду, состоящую из молекул другого вещества.

Движение молекул в газах, жидкостях и твёрдых телах проявляет себя и в явлении диффузии, которое можно наблюдать в любом из них.



Процессы диффузии идут быстрее при увеличении температуры, что указывает на возрастание скорости хаотического движения атомов и молекул, из которых состоят тела, подтверждая второе из названных выше положений, на которых основывается молекулярно-кинетическая теория вещества.

Третье её положение также следует из опыта — неизменность объёма твёрдых тел и жидкостей указывает на существование некоторого равновесного расстояния между их молекулами или атомами, характерного для каждого вещества.



### 2.1.2. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ И ТЕМПЕРАТУРА

**Идеальный газ** — совокупность молекул, суммарный объём которых пренебрежимо мал по сравнению с объёмом содержащего этот газ сосуда, а расстояние, на котором молекулы друг с другом взаимодействуют, много меньше среднего расстояния между ними.

**Внутренняя энергия** одноатомного идеального газа:

$$U = \frac{3}{2} NkT, \quad (2.1)$$

где  $N$  — число молекул,

$T$  — температура газа,

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана.

С точки зрения молекулярно-кинетической теории внутренняя энергия тела — это энергия движения и взаимодействия друг с другом атомов или молекул, из которых оно состоит. Внутренняя энергия идеального газа равна



сумме кинетических энергий его молекул и зависит только от температуры. Внутреннюю энергию называют ещё **тепловой**.

Все существующие в природе газы, как показывает опыт, при комнатной температуре и атмосферном давлении можно считать идеальными.

**Температура** — один из параметров, характеризующих состояние вещества, зависящий от энергии движения его молекул.

Температурой газа  $\theta$  (энергетической температурой) принято считать  $2/3$  средней кинетической энергии поступательного движения его молекул:

$$\theta = \frac{2}{3} \cdot \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{2}{3} \bar{K}, \quad (2.2)$$

где  $m_0$  — масса молекулы,  $v$  — её скорость.

В физике температуру измеряют в **градусах**. По шкале Цельсия за ноль градусов принимается температура плавления льда ( $t_{\text{пл}} = 0^\circ\text{C}$ ), а температура кипения воды при атмосферном давлении 760 мм рт. ст. принимается за 100 градусов ( $t_{\text{кип}} = 100^\circ\text{C}$ ). Градус — одна сотая часть разности этих температур — расстояния между этими отметками на шкале термометра.

Никакое тело не может иметь температуру ниже  $-273,15^\circ\text{C}$ . При этой температуре движение молекул полностью прекращается. Кельвин ввёл шкалу температур, по которой она принята за ноль градусов (рис. 2.4). «Размер» градуса остался прежним и в системе СИ получил название **кельвин** (K).

Все температуры по шкале Кельвина положительны, поэтому она называется **абсолютной**, а температура  $T$  — **абсолютной температурой**.





Рис. 2.4

Температуру  $T$  можно найти, вводя в уравнение (2.2) обозначение

$$\theta = kT.$$

Переводной коэффициент  $k$  называется **постоянной Больцмана**. Она показывает, какая часть **джоуля** содержится в одном **кельвине**:

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К.}$$

Связь температуры  $t$  по шкале Цельсия с температурой  $T$  по шкале Кельвина:

$$T = t + 273. \quad (2.3)$$

### Единицы измерения

Температура измеряется в **кельвинах**:

$$[T] = \text{К.}$$



Внутренняя энергия измеряется в **джоулях**:

$$[U] = \text{Дж.}$$

1

Газ, температура которого составляла 300 К, был нагрет до 600 К. Как изменилось среднее значение скорости теплового движения его молекул?



Ответ: \_\_\_\_\_



### 2.1.3. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

**Параметры состояния** идеального газа — давление  $p$ , объём  $V$ , температура  $T$ .

Параметры, характеризующие состояние данной массы газа, как показывает опыт, не могут изменяться независимо друг от друга. Они связаны уравнением, называемым уравнением состояния идеального газа.

**Уравнение состояния** идеального газа:

$$pV = NkT, \quad (2.4)$$

где  $N$  — число молекул газа,  
 $k$  — постоянная Больцмана.

**Давление газа** — сила, действующая на единичную площадку со стороны хаотически движущихся его молекул:

$$p = \frac{F}{S}. \quad (2.5)$$

Сталкиваясь со стенкой сосуда, молекулы передают ей некоторый импульс, изменение же импульса тела







(за единицу времени) определяет действующую на него силу.

**Молярная масса** вещества  $M$  — масса 1 моля этого вещества.

**1 моль вещества** — число его атомов или молекул, равное числу атомов, содержащихся в 12 г изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ . Это число называется **постоянной Авогадро**:

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

**Количество вещества** — число молей этого вещества:

$$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}, \quad (2.6)$$

где  $m$  — масса вещества.

**Уравнение Менделеева — Клапейрона** — другая форма записи уравнения состояния идеального газа:

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

где  $R$  — универсальная газовая постоянная.

**Универсальная газовая постоянная** — произведение числа Авогадро на постоянную Больцмана:

$$R = N_A k = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

**Закон Дальтона.** Давление смеси газов в сосуде равно сумме давлений  $p_1, p_2, \dots$ , оказываемых на стенки сосуда каждым из них:

$$p = p_1 + p_2 + \dots, \quad (2.7)$$

где  $p_i = \frac{1}{V} \cdot \frac{m_i}{M_i} RT$  — давление  $i$ -й компоненты смеси ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ).

**Единицы измерения**

Давление измеряется в **паскалях**:

$$[p] = \text{Па} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

Объём измеряется в **кубических метрах**:

$$[V] = \text{м}^3.$$

Масса измеряется в **килограммах**:

$$[m] = \text{кг}.$$

Молярная масса в системе СИ выражается в **килограммах на киломоль**:

$$[M] = \text{кг/кмоль}.$$

1

Вычислить объём некоторой массы воздуха при температуре  $t = 30^\circ\text{C}$  и давлении  $p = 730$  мм рт. ст., если при нормальных условиях его объём  $V_0 = 2$  л. Нормальные условия:  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ,  $p_0 = 760$  мм рт. ст.



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Сосуд, содержащий  $V_1 = 12$  л газа при давлении  $p_1 = 4 \cdot 10^5$  Па, соединяют с пустым сосудом объёмом  $V_2 = 3$  л. Найти давление, установившееся в обоих сосудах. Процесс расширения газа считать изотермическим.



Ответ: \_\_\_\_\_



3

Находящийся в закрытом баллоне газ нагрели, и его температура повысилась от  $t_1 = 27^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 87^\circ\text{C}$ , а давление возросло на  $\Delta p = 8$  атм. Определить первоначальное давление  $p_1$ . Расширением баллона пренебречь.



Ответ: \_\_\_\_\_

## 2.2. Термодинамика

**Термодинамика**, как и **молекулярная физика**, исследует тепловые свойства тел. При этом она не конкретизирует их строение, поэтому выводы термодинамики применимы для любых тел. Она опирается на два **принципа** или **начала** термодинамики, являющиеся обобщением опытных фактов. Термодинамика как наука возникла из потребностей практики, когда перед человеком встала задача создания устройства, преобразующего энергию сжигаемого топлива в механическую работу. Теплота в термодинамике есть форма энергии, а потому она эквивалентна некоторой работе. Термодинамика — наука об энергии и её свойствах.



### 2.2.1. ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ. ВИДЫ ПРОЦЕССОВ

**Диаграмма состояния** — график зависимости одного из параметров, характеризующих состояние данной массы газа, от другого параметра при фиксированном значении третьего.



Этими параметрами являются давление  $p$ , объём  $V$ , температура  $T$ , связанные друг с другом уравнением состояния идеального газа — **уравнением Менделеева — Клапейрона**:

$$pV = \frac{m}{M}RT, \quad (2.8)$$

где  $m$  — масса газа,  
 $M$  — его молярная масса,  
 $R = 8,31$  Дж/(моль · К) — универсальная газовая постоянная.

**Виды процессов** в газах:

**Изотермический процесс** — протекает при постоянной температуре ( $T = \text{const}$ ):

$$pV = \text{const}. \quad (2.9)$$

Уравнение изотермического процесса получается из уравнения (2.8), если в нём положить  $T = \text{const}$ . На  $pV$ -диаграмме он изображается **гиперболой** (рис. 2.5):

$$p = \frac{\text{const}}{V}.$$

**Изобарный процесс** — протекает при постоянном давлении ( $p = \text{const}$ ):

$$V = \left( \frac{mR}{Mp} \right) T. \quad (2.10)$$

На  $VT$ -диаграмме изобарный процесс изображается прямой линией, называемой **изобарой** (рис. 2.6). Эта прямая должна проходить через начало координат, но она обрывается на пути к нему, поскольку с понижением температуры газ превращается в жидкость, к которой уравнение (2.8) неприменимо.





**Изохорный процесс** — протекает при неизменном объёме газа ( $V = \text{const}$ ):

$$p = \left( \frac{mR}{MV} \right) T. \quad (2.11)$$

На  $pT$ -диаграмме это тоже прямая линия, называемая **изохорой** (рис.2.7). По указанной выше причине она не может пройти через начало координат.

**Циклический процесс** — термодинамическая система проходит ряд различных промежуточных состояний и возвращается к своему начальному состоянию.

На  $pV$ -диаграмме циклический процесс изображается замкнутой кривой (рис. 2.8).

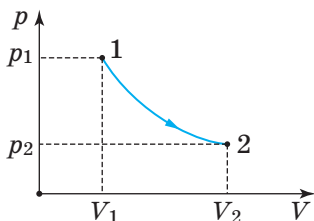


Рис. 2.5

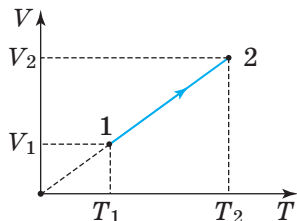


Рис. 2.6

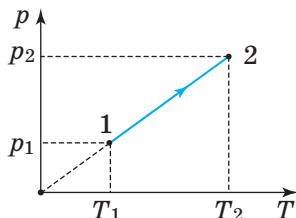


Рис. 2.7

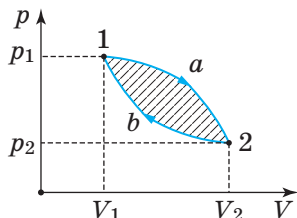


Рис. 2.8



**Состояние термодинамического равновесия** — давление и температура тела во всем его объёме имеют постоянные значения.

1

Давление газа при температуре  $t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  равно  $p_1 = 800\text{ мм рт. ст.}$  Каково будет давление газа, если его нагреть при постоянном объёме до температуры  $t_2 = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Газ занимал объём  $V_1 = 12,32\text{ л.}$  Его охладили при постоянном давлении на  $\Delta t = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$  и объём его стал  $V_2 = 10,52\text{ л.}$  Какова была первоначальная температура газа?



Ответ: \_\_\_\_\_

3

До какой температуры нужно нагреть открытую колбу, содержащую воздух при температуре  $t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , чтобы его плотность уменьшилась в 1,5 раза?



Ответ: \_\_\_\_\_





## 2.2.2. КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ. УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЁМКОСТЬ Тел

**Внутренняя энергия  $U$**  — энергия движения и взаимодействия друг с другом молекул вещества, зависящая от температуры.

**Количество теплоты  $Q$**  — энергия, передаваемая от одного тела к другому при их контакте.

Как показывает опыт, изменить температуру, а следовательно, и внутреннюю энергию тела, можно совершая над ним механическую работу или приводя его в контакт с горячим или холодным телом. В первом случае его можно нагреть с помощью трения о другое тело, а газ — путём его сжатия. Работа внешних сил идёт на увеличение внутренней энергии тел.

Изменение внутренней энергии при втором — контактном — способе происходит благодаря **теплообмену** — передаче энергии теплового движения молекул «горячего» тела молекулам «холодного». В этом случае говорят, что к телу подводится или от него отводится некоторое **количество теплоты**.

Благодаря теплопроводности горячее тело «остынет», а холодное — «нагреется» и оба они будут иметь одинаковую температуру, находясь в **тепловом равновесии** друг с другом.

Ещё один способ передачи тепла — с помощью обмена **излучением**. Все тела излучают и поглощают инфракрасные тепловые лучи. Из двух тел более горячее излучает большую мощность. Разогретое до нескольких сотен градусов, оно светится красным светом. Помещённые в откачанный сосуд с хорошо отражающими стенками тела приобретают одинаковую температуру.



**Количество теплоты**, расходуемое на нагревание тела массой  $m$ :

$$Q = cm(T_2 - T_1) = cm(t_2 - t_1), \quad (2.12)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  — начальная и конечная температуры по шкале Цельсия,

$c$  — удельная теплоёмкость вещества.

**Удельная теплоёмкость** — количество теплоты  $\Delta Q$ , необходимое для нагревания единицы массы вещества на один градус:

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta T}, \quad (\Delta T = T_2 - T_1). \quad (2.13)$$

При нагревании, согласно (2.12), поскольку  $T_2 > T_1$ , количество теплоты  $Q$ , полученной телом, — величина **положительная**. При охлаждении ( $T_2 < T_1$ ) тело отдаёт тепло окружающим его телам и  $Q$  становится величиной **отрицательной**.

**Уравнение теплового баланса:**

$$Q_1 = Q_2, \quad (2.14)$$

где  $Q_1$  — количество теплоты, полученное холодным телом,

$Q_2$  — количество теплоты, отданное ему горячим.

Чтобы найти температуру двух тел после достижения ими теплового равновесия, нужно записать для них уравнение теплового баланса. Обе величины  $Q_1$  и  $Q_2$  должны быть при этом положительны. Поскольку конечная температура тел  $T$  будет иметь промежуточное значение ( $T_1 < T < T_2$ ), следует записать:  $Q_1 = c_1 m_1 (T - T_1)$ ,  $Q_2 = c_2 m_2 (T_2 - T)$ . Это правило легко обобщить на случай нескольких тел.







Источником тепла, наряду с горячим телом, может быть сжигаемое топливо.

**Количество теплоты**, выделяемое при сжигании топлива:

$$Q = mq, \quad (2.15)$$

где  $q$  — удельная теплота сгорания топлива,  $m$  — его масса.

**Удельная теплота сгорания топлива** — количество теплоты, выделяемое при сжигании 1 кг этого топлива:

$$q = \frac{Q}{m}. \quad (2.16)$$

### Единицы измерения

Внутренняя энергия и количество теплоты измеряются в **джоулях**:

$$[U] = [Q] = \text{Дж}.$$

Удельная теплоёмкость измеряется в **джоулях на килограмм на кельвин**:

$$[c] = \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Удельная теплота сгорания топлива измеряется в **джоулях на килограмм**:

$$[q] = \text{Дж}/\text{кг}.$$

1

Металлический цилиндр массой  $m = 60$  г нагрели в кипятке до температуры  $t = 100$  °С и опустили в воду, масса которой  $m_{\text{в}} = 300$  г, а температура  $t_{\text{в}} = 24$  °С. Температура воды





и цилиндра стала равной  $\theta = 27^\circ\text{C}$ . Найти удельную теплоёмкость металла, из которого изготовлен цилиндр. Удельная теплоёмкость воды  $c_B = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ .

Ответ: \_\_\_\_\_

2

На спиртовке нагрели воду массой  $m = 400 \text{ г}$ . Температура её повысилась от  $t_1 = 16^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 71^\circ\text{C}$ . При этом сожгли  $m_c = 10 \text{ г}$  спирта. Найти коэффициент полезного действия (КПД) установки. Удельная теплота сгорания спирта  $q = 2,7 \cdot 10^7 \text{ Дж}/\text{кг}$ .



Ответ: \_\_\_\_\_



### 2.2.3. ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССАХ

**Первое начало термодинамики.** Количество теплоты  $\Delta Q$ , сообщённое телу путём теплообмена, идёт на увеличение его внутренней энергии  $\Delta U$  и на совершение этим телом работы  $\Delta A$  против внешних сил:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A. \quad (2.17)$$

Первое начало термодинамики выражает закон сохранения энергии в тепловых процессах.

Внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры и является **функцией его состояния**. Работа, совершаемая газом при расширении или сжатии,



в термодинамике выражается через изменение объёма газа и **зависит от вида происходящего в нём процесса**.

Пусть  $p$  — давление газа, заключённого в цилиндре с подвижным поршнем,  $V$  — его объём,  $S$  — площадь поршня (рис. 2.9). Тогда сила, действующая на поршень со стороны газа  $F = pS$ , а совершаемая им работа при перемещении поршня на расстояние  $\Delta x$ :

$$\Delta A = F \Delta x = pS \cdot \Delta x = p \Delta V. \quad (2.18)$$

**Работа** при изобарном расширении газа ( $p = \text{const}$ ):

$$A = p(V_2 - V_1), \quad (2.19)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  — объём газа в начале и конце процесса (рис. 2.10).

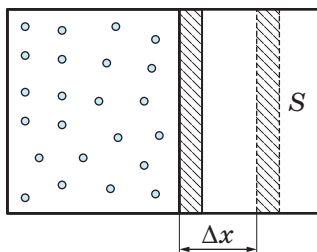


Рис. 2.9

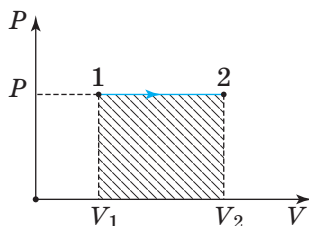


Рис. 2.10

**Первое начало термодинамики** с учётом (2.18):

$$\Delta Q = \Delta U + p \Delta V. \quad (2.20)$$

**Адиабатный процесс** — процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой.

Такой процесс можно осуществить, если цилиндр, в котором находится газ, поместить в оболочку, не



проводящую тепло. В уравнении (2.17) следует при этом положить  $\Delta Q = 0$ .

**Первое начало термодинамики** для адиабатного процесса:

$$\Delta A = -\Delta U. \quad (2.21)$$

При адиабатном расширении газ совершает работу над внешними телами ( $\Delta A > 0$ ), а его внутренняя энергия и, следовательно, температура уменьшаются ( $\Delta U < 0$ ). При адиабатном сжатии эта работа отрицательна ( $\Delta A < 0$ ), а внутренняя энергия и температура газа возрастают ( $\Delta U > 0$ ).

**Тепловые процессы** — процессы, связанные с изменением внутренней энергии тел.

Примеры их — нагревание и охлаждение тел, плавление и отвердевание, испарение и конденсация, выделение тепла при трении тел друг о друга. В природе указанные процессы протекают естественным путём.

В основе всех природных процессов лежит **закон сохранения энергии**, установленный экспериментально.

**Закон сохранения энергии в тепловых процессах.** Суммарная энергия тел, составляющих замкнутую систему, остаётся постоянной при любых процессах, протекающих в ней.

**Замкнутая система тел** — совокупность тел, не обменивающихся энергией с окружающей средой.

К кинетической и потенциальной энергиям тел следует добавить внутреннюю энергию, энергию химических и ядерных реакций, энергию излучения и другие известные науке виды энергии.

Простейший пример взаимопревращения видов энергии: при падении тела на Землю с некоторой высоты





первоначальный запас потенциальной энергии превращается в кинетическую энергию движения тела, а затем — в тепловую (внутреннюю) энергию, проявляющую себя в нагревании тела. Сжигание топлива порождает свет и тепло, черпающие свою энергию в химических превращениях молекул.

Характерная черта природных процессов — превращение механической энергии в тепловую и переход в состояние теплового равновесия. Обратный ему процесс — превращение внутренней энергии тела в механическую работу — требует создания условий, которых в природе нет. Человек сумел создать их и получил в свои руки **тепловые машины**, заменившие его физический труд.

1

Кислород массой  $m = 3$  кг при температуре  $T = 320$  К охладили изохорно, вследствие чего его давление уменьшилось в  $n = 3$  раза. Затем газ изобарно расширили так, что температура его стала равна первоначальной. Какую работу совершил газ? Как изменилась его внутренняя энергия?



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Газ, занимающий объём  $V_1 = 5$  л и находящийся при давлении  $p_1 = 2 \cdot 10^5$  Па и температуре  $T_1 = 290$  К, был нагрет и расширился изобарно. Работа расширения газа при этом оказалась равной  $A = 200$  Дж. На сколько градусов изменилась температура газа?



Ответ: \_\_\_\_\_



## 2.2.4. ПРИНЦИП РАБОТЫ ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ. ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

**Тепловая машина** — устройство, преобразующее теплоту в механическую работу.

Первое начало термодинамики, выражающее закон сохранения энергии для тепловых процессов, не накладывает никаких ограничений на превращение энергии из одного вида в другой. Согласно первому началу, всегда имеется возможность превратить работу в теплоту или теплоту в работу, если общее количество теплоты эквивалентно общему количеству работы. Это справедливо, когда мы хотим **работу превратить в теплоту** — тело можно нагреть, например, с помощью трения.

Обратный процесс — **превращение теплоты в работу** — в системе тел, находящихся в тепловом равновесии, нельзя осуществить, поскольку работа связана с направленным движением макроскопических тел, а тепловое движение молекул хаотично и не имеет никакого преимущественного направления. Для такого превращения надо иметь два тела с разными температурами и прибегнуть к помощи третьего тела, которое будет эту работу совершать. Например, можно взять газ, заключённый в цилиндре с подвижным поршнем, стенки которого обладают хорошей теплопроводностью (см. рис. 2.9). Такая возможность используется в тепловых машинах.

**Составные части** тепловой машины (рис. 2.11):

- 1) **нагреватель** — тело с температурой  $T_1$ ,
- 2) **рабочее тело** — газ в цилиндре с поршнем,
- 3) **охладитель** — тело, имеющее температуру  $T_2$ , более низкую, чем у нагревателя.



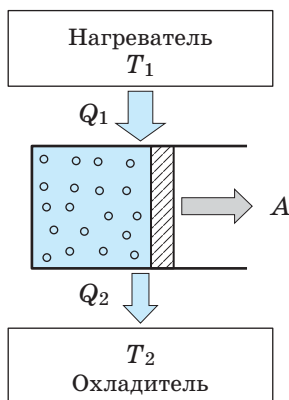


Рис. 2.11

Работа такой машины носит циклический характер — газ в цилиндре, следуя за движением поршня, периодически сжимается и расширяется.

**Работа**, совершаемая тепловой машиной за один цикл:

$$A = Q_1 - Q_2, \quad (2.22)$$

где  $Q_1$  — количество теплоты, получаемое рабочим телом за один цикл от нагревателя при его расширении,  $Q_2$  — количество теплоты, отдаваемое за цикл охладителю при сжатии.

**Коэффициент полезного действия** (КПД) тепловой машины периодического действия:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \quad (2.23)$$

КПД измеряют в процентах, так что правую часть этого равенства следует умножить на 100 %. Теплота, полученная при сжигании топлива, частично рассеивается



в окружающей среде, кроме того, существует трение между движущимися частями машины, поэтому её коэффициент полезного действия всегда меньше 100 %.

Сади Карно построил теорию тепловой машины и показал, что существует верхний предел значения этой величины, который может быть достигнут лишь **идеальной тепловой машиной**.

**Идеальная тепловая машина** — отсутствуют трение между её движущимися частями и тепловые потери, связанные с рассеянием тепла в окружающей среде.

**Коэффициент полезного действия** идеальной тепловой машины:

$$\eta_{\text{ид}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \quad (2.24)$$

где  $T_1$  — температура нагревателя,  
 $T_2$  — температура охладителя.

Из формулы (2.24) следует, что даже при этих условиях КПД тепловой машины меньше единицы (меньше 100 %), т. е. она не может полностью преобразовать тепловую энергию в механическую работу.

Коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины не зависит от её устройства, способа действия и природы газа, используемого в качестве рабочего тела. Решающими являются температура нагревателя  $T_1$ , при которой рабочее тело отбирает у него количество теплоты  $Q_1$ , и температура охладителя  $T_2$ , при которой ему передаётся количество теплоты  $Q_2$ . Для увеличения КПД нужно понижать температуру охладителя и повышать температуру нагревателя.

Первое начало термодинамики исключает возможность создания вечного двигателя, способного совершать







работу без затраты энергии — «из ничего». Возможно лишь превращение одного вида энергии в другой — механической энергии в тепловую или, наоборот, тепловой энергии в механическую.

Смысл второго начала термодинамики заключается в том, что полностью превратить теплоту в работу нельзя — часть тепла нужно передать телу, имеющему более низкую температуру. Если бы такого ограничения не было, можно было бы построить машину, которая путём охлаждения окружающих её тел превращала бы в работу всю взятую у них теплоту. Такую машину называют **вечным двигателем второго рода**. Поскольку запасы тепловой энергии, содержащиеся в земле, атмосфере и мировом океане, практически неограниченны, эта машина могла бы работать весьма длительное время.

**Вечный двигатель второго рода** — тепловая машина, которая путём охлаждения окружающих её тел превращает в работу всю взятую у них теплоту.

**Второе начало термодинамики:** Невозможно создать вечный двигатель второго рода.

**Количественным выражением** второго начала служит неравенство:

$$\eta < \eta_{\text{ид}}. \quad (2.25)$$

Никакая тепловая машина периодического действия не может иметь коэффициент полезного действия выше, чем  $\eta_{\text{ид}}$ .

1

Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, 80 % теплоты, полученной от нагревания, передаёт охладителю. Количество теплоты,





получаемое рабочим телом за один цикл от нагревателя  $Q_1 = 6,3$  Дж. Найти КПД цикла  $\eta$  и работу  $A$ , совершаемую за один цикл.

Ответ: \_\_\_\_\_

2

Тепловая машина, работающая по циклу Карно, совершает за один цикл работу  $A = 2,94$  кДж и отдаёт за один цикл охладителю количество теплоты  $Q_2 = 13,4$  кДж. Найти КПД цикла  $\eta$ .



Ответ: \_\_\_\_\_

## 2.3. Изменение агрегатного состояния тел

Существование в природе твёрдых, жидких и газообразных тел обусловлено большим разнообразием веществ, которое мы наблюдаем в окружающем нас мире. Многие из них могут быть жидкими, твёрдыми или газообразными в зависимости от условий, в которых находятся. Такое распространённое в природе вещество, как вода, при температуре ниже нуля градусов Цельсия превращается в лёд, а при ста градусах не может быть жидкостью.

Природные явления, связанные с переходом воды в твёрдое или газообразное состояние, играют важную роль в поддержании на Земле пригодных для жизни климатических условий. Другие такого рода процессы широко используются человеком в своей практической деятельности, научных исследованиях, лежат в основе работы, например, холодильных установок, в технологических процессах.



Термодинамика рассматривает процессы изменения агрегатного состояния тел и даёт им количественные характеристики.



### 2.3.1. ИСПАРЕНИЕ И КОНДЕНСАЦИЯ

**Агрегатное состояние вещества** — твёрдое, жидкое или газообразное состояние, в котором оно может находиться.

**Фазовый переход** — переход вещества из одного агрегатного состояния в другое, происходящий при изменении его температуры или давления.

Фазовые переходы сопровождаются поглощением или выделением тепла.

На рис. 2.12 приведён график зависимости температуры жидкости от времени. Из него видно, что по мере поглощения тепла от внешнего источника (например, газовой горелки) температура жидкости растёт, а при достижении температуры кипения остаётся постоянной. Теплота, подводимая к жидкости, расходуется теперь на испарение жидкости — парообразование, при котором разрушаются связи между молекулами, часть которых покидает её.

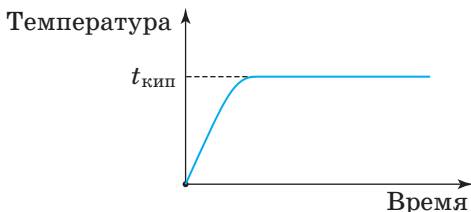


Рис. 2.12



С точки зрения термодинамики поглощение тепла при испарении жидкости означает, что внутренняя энергия пара больше внутренней энергии такой же массы жидкости, которая превращается в пар. Испарение воды в атмосфере Земли препятствует росту её температуры. Выпадение росы, наоборот, сопровождается выделением тепла, благодаря чему температура воздуха при его охлаждении не может сильно понизиться.

**Количество теплоты**, необходимое для испарения жидкости массой  $m$ :

$$Q = rm, \quad (2.26)$$

где  $r$  — удельная теплота парообразования.

**Удельная теплота парообразования** — количество теплоты, необходимое для превращения в пар 1 кг жидкости при температуре кипения:

$$r = \frac{Q}{m}. \quad (2.27)$$

### Единицы измерения

Удельная теплота парообразования измеряется в **джоулях на килограмм**:

$$[r] = \text{Дж/кг}.$$

1

При нагревании воды массой  $m = 1,5$  кг, взятой при температуре  $t = 20$  °С, ей сообщили количество теплоты  $Q = 6,5 \cdot 10^5$  Дж. Найти массу выкипевшей воды, если удельная теплота парообразования  $r = 22,6 \cdot 10^5$  Дж/кг.



Ответ: \_\_\_\_\_





### 2.3.2. ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА

Представление о влажности атмосферного воздуха возникло из нашего повседневного опыта. При большой влажности или очень сухом воздухе мы испытываем определённые неудобства — плохо сохнут влажные вещи или, наоборот, пересыхает горло. В физике влажность воздуха определяется количественно.

**Абсолютная влажность воздуха** — плотность водяного пара, показывающая, сколько граммов воды содержится в одном кубическом метре воздуха:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (2.28)$$

**Насыщенный пар** — пар максимальной плотности при данной температуре, когда число молекул, переходящих из воды в воздух, в среднем равно числу молекул, которые переходят из воздуха в воду.

С ростом температуры плотность насыщенного пара возрастает, поскольку при большей температуре воздух способен вобрать в себя больше воды.

Одно и то же количество водяного пара в воздухе может создавать ощущение влажного воздуха при низких температурах и сухого — при высоких. Поэтому вводится понятие **относительной влажности** воздуха.

**Относительная влажность воздуха** — отношение плотности водяного пара  $\rho$ , фактически содержащегося в воздухе, к плотности насыщенного пара  $\rho_{\text{нас}}$  при той же температуре, выраженное в процентах:

$$D = \frac{\rho}{\rho_{\text{нас}}} \cdot 100\%. \quad (2.29)$$



**Точка росы** — температура, при которой водяной пар, содержащийся в воздухе, при его охлаждении становится насыщенным.

### Единицы измерения

Единица измерения абсолютной влажности — **грамм на кубический метр**:

$$[\rho] = \text{г/м}^3.$$

1

При температуре  $t_1 = 10^\circ\text{C}$  относительная влажность воздуха  $D_1 = 80\%$ . Найти относительную влажность воздуха при повышении температуры до  $t_2 = 20^\circ\text{C}$ . Плотность насыщенного пара при этих температурах:  $\rho_{\text{H}1} = 9,4 \text{ г/м}^3$ ,  $\rho_{\text{H}2} = 17,3 \text{ г/м}^3$ .



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Температура воздуха в комнате объёмом  $V = 150 \text{ м}^3$  равна  $t_1 = 6^\circ\text{C}$ , а его относительная влажность  $D_1 = 80\%$ . Сколько воды нужно испарить, чтобы при температуре  $t_2 = 18^\circ\text{C}$  относительная влажность воздуха стала равной  $D_2 = 60\%$ . Плотность насыщенного пара при этих температурах:  $\rho_{\text{H}1} = 7,3 \text{ г/м}^3$ ,  $\rho_{\text{H}2} = 15,4 \text{ г/м}^3$ .



Ответ: \_\_\_\_\_





### 2.3.3. ПЛАВЛЕНИЕ И КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

Плавление твёрдых тел и отвердевание жидкостей — процессы, имеющие, подобно испарению и конденсации, скрытую теплоту. Нагревая на газовой горелке кусок льда и измеряя его температуру, можно заметить, что при температуре плавления тающий лёд и образовавшаяся при этом вода будут иметь эту температуру до тех пор, пока весь лёд не растает (рис. 2.13). Энергия, получаемая их смесью от газовой горелки, расходуется на разрушение кристаллической решётки льда.

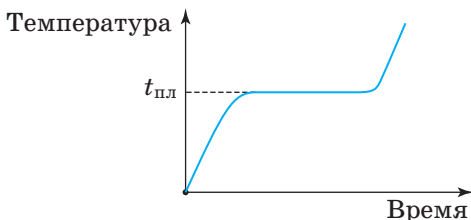


Рис. 2.13

**Количество теплоты**, необходимое для плавления тела массой  $m$ :

$$Q = \lambda m, \quad (2.30)$$

**Удельная теплота плавления** — количество теплоты, необходимое для превращения в жидкость 1 кг вещества при температуре плавления:

$$\lambda = \frac{Q}{m}. \quad (2.31)$$



При плавлении внутренняя энергия тела увеличивается — жидкость той же массы имеет большую внутреннюю энергию, чем твёрдое тело. При отвердевании энергия, затраченная на разрушение твёрдого тела, — упорядоченного расположения в пространстве его атомов или молекул, — выделяется в виде тепла. Это тепло следует отводить, используя проточную воду или воздушный поток. В холодильных установках при замораживании продуктов для этих целей используется специальный хладагент — фреон.

### Единицы измерения

Единица измерения удельной теплоты плавления — **джоуль на килограмм**:

$$[\lambda] = \text{Дж/кг}.$$

1

На электроплите мощностью  $P = 600$  Вт, КПД которой  $\eta = 0,4$ , нагревают смесь воды со льдом, имеющих температуру  $t = 0$  °С. Масса воды  $m_v = 1$  кг, масса льда  $m_l = 1$  кг. Найти время нагревания  $t$ , если температура воды в конце процесса стала  $\theta = 20$  °С. Теплота плавления льда  $\lambda = 3,35 \cdot 10^5$  Дж/кг, удельная теплоёмкость воды  $c = 4,2 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К).



Ответ: \_\_\_\_\_







### 3. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

**Электродинамика** изучает электрические и магнитные явления, которые мы наблюдаем в окружающем нас мире. Как наука она сформировалась во второй половине XIX века, когда английский физик Джеймс Клерк Максвелл записал четыре уравнения электродинамики, которые охватывают все явления электричества и магнетизма. Она включает в себя разделы: **электростатика, электрический ток, электромагнетизм, электромагнитное поле**.

Электродинамика как наука использует понятия — электрический заряд, электрический ток, электромагнитное поле.

**Электрический заряд** — природное свойство электронов и протонов, входящих в состав атомов и молекул, из которых состоят все тела.

**Заряженное тело** содержит избыток электронов или протонов и в итоге несёт отрицательный или положительный заряд.

**Заряд** проявляет себя в том, что заряженные тела действуют друг на друга на расстоянии посредством **электрического поля**, возникающего вокруг этих тел.

В проводниках — металлах, растворах электролитов — можно создать упорядоченное движение зарядов — **электрический ток**.

Электрический ток вызывает нагревание проводника и создаёт вокруг себя **магнитное поле**. Ток, текущий через раствор электролита, приводит к выделению из него металлов и газов.



Магнитное поле действует на магнитную стрелку компаса, ориентируя её вдоль силовых линий поля, и оказывает силовое воздействие на движущиеся заряды и токи в проводниках.

Заряд, движущийся ускоренно, например совершающий колебательное движение, порождает **электромагнитное поле**, которое в виде электромагнитной волны распространяется в пространстве со скоростью света.

## 3.1. Электростатика

**Электростатика** — раздел физики, изучающий неподвижные заряды и не изменяющиеся во времени электрические поля.

Электрические явления известны человеку с давних времён. Это электризация тел при трении, молния. Систематическое изучение электрических явлений начато в XVIII веке. В России этим занимались М. В. Ломоносов и Г. Рихман, в Америке — Бенджамин Франклин. Ломоносов установил природу молнии, Франклин — два рода электричества. Франклин предложил считать, что стекло, натёртое кожей, заряжается **положительно**, а янтарь, натёртый шерстью, — **отрицательно**. С точки зрения современной науки, отрицательно заряженное тело содержит избыток электронов. Если у тела забрать часть электронов, то оно заряжается положительно. Следовательно, отрицательный знак заряда электрона — условное понятие, связанное с произвольным выбором Б. Франклина.





### 3.1.1. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТЕЛ. ДВА РОДА ЗАРЯДОВ

**Заряд электрона или протона** — наименьшая неделимая порция заряда, существующая в природе:

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

В природе существуют два рода зарядов — **положительные** и **отрицательные**. Носители положительного заряда — **протоны**, входящие в состав ядер атомов (сам протон — это ядро простейшего из них — атома водорода). Отрицательный заряд имеют **электроны**, обращающиеся вокруг ядер атомов.

Электрон — элементарная частица, имеющая массу  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг, в 1840 раз меньшую массы протона. Заряды этих частиц равны по модулю, но противоположны по знаку.

**Заряженное тело** — тело, имеющее избыточное количество электронов или протонов.

Электроны могут переходить с одного тела на другое при трении их друг о друга, в результате чего одно из них приобретает отрицательный заряд, а другое — положительный.

**Электризация** — сообщение заряда ранее не заряженному телу.

**Источник зарядов** — заряженное тело, отдающее часть своего заряда другому телу при соприкосновении с ним:

- **стекло**, натёртое кожей, — источник **положительного** заряда,
- **янтарь**, натёртый шерстью, — источник **отрицательного** заряда.

**Пробный заряд** — тело малых размеров, заряженное положительно.



**Разноименные** заряды притягиваются друг к другу, **одноимённые** — отталкиваются.

### Единицы измерения

В системе СИ заряд измеряется в **кулонах**:

$$[q] = \text{Кл.}$$

1

Пылинка массой  $M = 0,1$  мг имеет заряд  $q = -10^{-10}$  Кл. Какова масса электронов, образующих этот заряд? Какую долю они составляют в общей массе пылинки?



Ответ: \_\_\_\_\_



### 3.1.2. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЗАРЯДА

**Закон сохранения заряда.** Суммарный заряд тел, составляющих замкнутую систему, остаётся постоянным во времени:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots = \text{const.}$$

**Замкнутая система** — совокупность тел, не обменивающихся веществом с окружающими телами.

Закон сохранения заряда является естественным следствием того, что вещество, представленное в данном случае электронами и протонами, нельзя уничтожить. Если совокупность нескольких тел, названных замкнутой системой, изолировать от других тел, то сумма зарядов содержащихся в них электронов и протонов тоже будет неизменной.

Закон сохранения заряда — один из фундаментальных законов природы — открыт экспериментально Б. Франклином в 1747 г.





### 3.1.3. ЗАКОН КУЛОНА

**Точечный заряд** — заряженное тело, размеры которого малы по сравнению с расстоянием от него до других заряженных тел.

**Закон Кулона.** Сила взаимодействия двух точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$  пропорциональна величине каждого из зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r$  между ними:

$$F_{\text{кул}} = k_0 \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (3.1)$$

где  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$  — коэффициент пропорциональности.

Закон Кулона — основной закон электростатики. Коэффициент пропорциональности  $k_0$  зависит от выбора единиц измерения физических величин. Его численное значение в системе СИ, приведённое выше, установлено опытным путём.

Единица заряда — **кулон** — производная от единицы силы тока — **ампер** (А): когда по проводнику течёт ток силой 1 А, через поперечное сечение проводника за 1 секунду переносится заряд 1 Кл.

Кулон — очень крупная единица: два заряда в 1 Кл каждый, находящиеся на расстоянии 1 м друг от друга, отталкиваются с силой, равной весу груза в 900 тыс. тонн.

**Электрическая постоянная**  $\varepsilon_0$  — константа, вводимая вместо коэффициента  $k_0$ , связанная с ним уравнением:

$$k_0 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}, \quad (3.2)$$



Использование  $\varepsilon_0$  позволяет записать ряд формул электростатики в более удобном виде.

### Единицы измерения

Сила измеряется в **ньютонах**:

$$[F_{\text{кул}}] = \text{Н}.$$

Электрическая постоянная имеет размерность **фарад на метр**:

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}.$$

1

Два точечных заряда  $q_1$  и  $q_2$  находятся на расстоянии  $r$  друг от друга. Если расстояние между ними уменьшить на  $\Delta r = 50$  см, то сила взаимодействия  $F$  увеличится в 2 раза. Найти расстояние  $r$ .



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Имеются два закреплённых положительных заряда  $q_1 = 4e$  и  $q_2 = e$ . Расстояние между зарядами  $l = 3$  см. Где нужно расположить третий заряд  $q$ , чтобы он находился в равновесии? Будет ли это равновесие устойчивым?



Ответ: \_\_\_\_\_





### 3.1.4. НАПРЯЖЁННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ. ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ПОЛЕЙ

Действие на данный заряд других зарядов можно представить как взаимодействие данного заряда с **электрическим полем**, созданным этими зарядами. Понятие электрического поля используется для нахождения силы, действующей на выбранный заряд.

**Электрическое поле** — область пространства, в которой на заряженное тело действует сила.

**Напряжённость электрического поля** — отношение силы, действующей в данной точке пространства на положительный точечный заряд, к величине этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (3.3)$$

**Напряжённость поля**, созданного точечным зарядом  $q$  на расстоянии  $r$  от него:

$$E = k_0 \frac{q}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}. \quad (3.4)$$

**Принцип суперпозиции.** Напряжённость электрического поля, созданного в данной точке совокупностью  $N$  зарядов, равна сумме векторов напряжённости полей, которые создаются в этой точке каждым из зарядов:

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

**Линии напряжённости поля (силовые линии)** — графическое изображение поля. Направление силовых линий указывает направление силы, действующей на



пробный положительный заряд, а густота линий качественно характеризует величину напряжённости поля — чем гуще линии, тем сильнее поле (рис. 3.1).

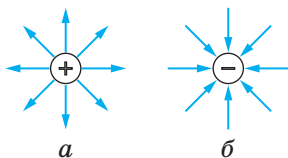


Рис. 3.1

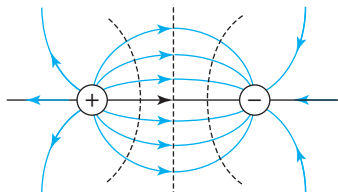


Рис. 3.2

**Однородное электрическое поле** — напряжённость поля всюду одинакова по величине, а линии напряжённости параллельны друг другу:

$$\vec{E} = \text{const.}$$

Однородное поле возникает между обкладками плоского конденсатора — двумя параллельными пластинами, несущими равные по модулю, но противоположные по знаку заряды. Расстояние между обкладками должно быть много меньше их линейных размеров (рис. 3.3).

Сила, действующая на заряд в электрическом поле:

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

**Электрический диполь** — совокупность двух близко расположенных друг к другу одинаковых по модулю и противоположных по знаку зарядов (рис. 3.2).

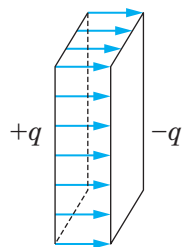


Рис. 3.3







Примером диполей, существующих в природе, служат молекулы **диэлектриков** — веществ, не проводящих электрический ток.

В электрическом поле диполь ориентируется вдоль направления вектора  $\vec{E}$ .

### Единицы измерения

Напряжённость электрического поля измеряется в **вольтах на метр**:

$$[E] = \text{В/м}.$$

Расстояние измеряется в **метрах**:

$$[r] = \text{м}.$$

1

Два точечных заряда  $q_1 = 6,7 \text{ нКл}$  и  $q_2 = -13,2 \text{ нКл}$  находятся на расстоянии  $a = 5 \text{ см}$  друг от друга. Найти напряжённость электрического поля  $E$  в точке, расположенной на расстоянии  $b = 3 \text{ см}$  от положительного заряда и  $c = 4 \text{ см}$  от отрицательного.



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Электрон движется в направлении однородного электрического поля напряжённостью  $E = 120 \text{ В/м}$ . Какое расстояние пройдёт электрон до полной остановки, если его начальная скорость  $v_0 = 10^6 \text{ м/с}$ ? За какое время  $t$  он пройдёт это расстояние?



Ответ: \_\_\_\_\_



### 3.1.5. ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

**Кулоновская сила** — сила, действующая на заряд в электрическом поле.

Работа кулоновской силы при перемещении заряда из одной точки поля в другую не зависит от формы его траектории, а определяется только положением этих точек. Поэтому в электрическом поле можно ввести понятие потенциальной энергии заряда. В электростатике используется понятие **потенциала поля**, под которым понимается потенциальная энергия положительного заряда в 1 Кл.

**Разность потенциалов** между двумя точками электрического поля — работа, совершаемая при перемещении единичного положительного заряда из первой точки во вторую:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q}. \quad (3.5)$$

**Потенциал электрического поля** в данной точке — работа, совершаемая при перемещении единичного положительного заряда из данной точки в точку, где потенциал принимается за ноль:

$$\varphi = \frac{A}{q}. \quad (3.6)$$

За ноль обычно принимают потенциал Земли, являющейся хорошим проводником тока.

**Потенциал поля**, созданного проводящим шаром, на расстоянии  $r$  от его центра:



$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r}, \quad (r > R), \quad (3.7)$$

где  $q$  — заряд шара,  
 $R$  — его радиус.

**Эквипотенциальная поверхность** — совокупность точек пространства, имеющих одинаковый потенциал:

$$\varphi(x, y, z) = \text{const}.$$

Графически эквипотенциальные поверхности обозначают пунктирными линиями, причём так, чтобы потенциалы двух соседних поверхностей отличались на 1 В (рис. 3.4).

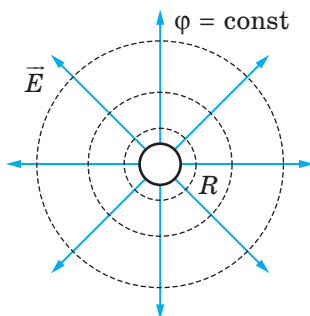


Рис. 3.4

Эквипотенциальные поверхности пересекаются с линиями напряжённости под прямым углом.

### Единицы измерения

Потенциал и разность потенциалов электрического поля измеряют в **вольтах**:

$$[\varphi] = \text{В} = \text{Дж/Кл}.$$



1

Найти потенциал заряженного шара радиусом  $R = 0,1$  м, если на расстоянии  $r = 10$  м от его поверхности потенциал электрического поля  $\varphi = 20$  В.



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Шарик массой  $m = 40$  мг, имеющий заряд  $q = 1$  нКл, перемещается из бесконечности со скоростью  $v_0 = 10$  см/с. На какое расстояние  $r_{\min}$  он может приблизиться к неподвижному точечному заряду  $Q = 1,33$  нКл?



Ответ: \_\_\_\_\_



### 3.1.6. ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

**Проводники** — вещества, имеющие свободные заряды, способные перемещаться по всему объёму проводника.

Проводниками являются все металлы, растворы электролитов, ионизованные газы. Мы рассматриваем здесь только металлы. Свободные заряды в металлах — электроны.

**Напряжённость электрического поля** внутри проводника:

$$E_{\text{внутр}} = 0.$$





**Потенциал** проводника в любой его точке имеет одно и то же значение:

$$\varphi = \text{const.}$$

Поэтому можно говорить о потенциале проводника как целого. Если два проводника привести в соприкосновение или соединить проволокой, то потенциалы их немедленно сравниваются — это будет уже единый проводник. При устройстве заземления металлические части приборов или корпуса станков соединяют с Землёй и они принимают «нулевой потенциал».

**Линии напряжённости поля** перпендикулярны поверхности проводника в каждой её точке.

1

Два шара, радиусы которых  $R_1 = 5$  см и  $R_2 = 8$  см, а потенциалы  $\varphi_1 = 120$  В и  $\varphi_2 = 50$  В, соединяют проводом. Найти потенциалы шаров  $\varphi'_1$  и  $\varphi'_2$  после их соединения и заряд  $\Delta q$ , перешедший с одного шара на другой.



Ответ: \_\_\_\_\_

2

$N$  одинаковых шарообразных капель ртути одноимённо заряжены до одного и того же потенциала  $\varphi_r$ . Каков будет потенциал большой капли ртути  $\varphi_R$ , получившейся в результате слияния этих капель. Решить задачу для  $N = 8$ ,  $\varphi_r = 1$  В.



Ответ: \_\_\_\_\_



### 3.1.7. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЁМКОСТЬ И ЭНЕРГИЯ ЗАРЯЖЕННОГО КОНДЕНСАТОРА

**Конденсатор** — совокупность двух проводников — обкладок конденсатора, — расстояние между которыми много меньше их линейных размеров.

**Заряд конденсатора** — заряд  $q$  каждой из его обкладок, возникающий при соединении их с полюсами источника тока (рис. 3.5).

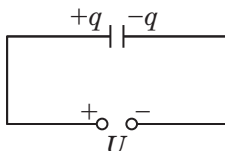


Рис. 3.5

**Электрическая ёмкость конденсатора** — отношение заряда конденсатора к напряжению между его обкладками  $U = \varphi_1 - \varphi_2$ :

$$C = \frac{q}{U}. \quad (3.8)$$

Электрическое поле существует лишь в пространстве между обкладками конденсатора и не подвержено влиянию окружающих тел. Поэтому ёмкость конденсатора зависит только от его формы и размеров.

**Ёмкость** плоского конденсатора (рис. 3.6):

$$C_{\text{пл}} = \frac{\varepsilon_0 S}{d}, \quad (3.9)$$

где  $S$  — площадь каждой из его обкладок,  $d$  — расстояние между ними.



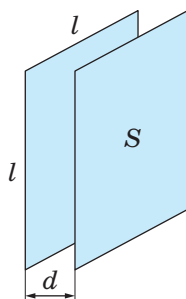


Рис. 3.6

Ёмкость конденсатора в системе СИ измеряется в **фарадах** (Ф).

**Фарад** — очень крупная единица ёмкости. Плоский конденсатор ёмкостью  $C = 1$  Ф, у которого расстояние между обкладками составляет 1 мм, должен иметь эти обкладки размером примерно  $10 \times 10$  км<sup>2</sup>. Поэтому на практике ёмкость измеряют в **микрофарадах** ( $1$  мкФ =  $10^{-6}$  Ф) или **пикофарадах** ( $1$  пФ =  $10^{-12}$  Ф).

**Напряжённость поля** внутри плоского конденсатора равна отношению напряжения между его обкладками к расстоянию между ними:

$$E = \frac{U}{d}. \quad (3.10)$$

Конденсаторы способны накапливать электрическую энергию, которую можно легко превращать в другие виды — механическую, тепловую, световую. Накопление энергии происходит при зарядке конденсатора. Для этого его обкладки соединяют с полюсами источника тока.

Соединение обкладок заряженного конденсатора проводником приводит к его разрядке — по цепи протекает



ток, вследствие чего проводник нагревается. Количество выделившегося тепла, по закону сохранения энергии равно запасу энергии которой обладал конденсатор.

**Энергия заряженного конденсатора:**

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}. \quad (3.11)$$

Энергию конденсатора можно выразить через напряжённость электрического поля внутри него.

**Объёмная плотность энергии** электрического поля в вакууме:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2}. \quad (3.12)$$

Конденсаторы принадлежат к числу основных элементов радиоэлектронных устройств — радиоприёмников, телевизоров, компьютеров. Они используются также в качестве мощных источников электрической энергии, позволяющих быстро преобразовать её в другие виды. Так работают лампы-вспышки, используемые в фотографии, радиолокационные станции, служащие для обнаружения воздушных и морских судов, ракет и спутников. Необходимую ёмкость используемых при этом конденсаторов можно подбирать, составляя из них батареи.

### Единицы измерения

Ёмкость конденсатора измеряется в **фарадах**:

$$[C] = \Phi = \text{Кл/В}.$$

Площадь его обкладок измеряется в **квадратных метрах**:

$$[S] = \text{м}^2.$$







Расстояние между обкладками измеряется в **метрах**:

$$[d] = \text{м}.$$

Объёмная плотность энергии измеряется в **джоулях на кубический метр**:

$$[w] = \text{Дж/м}^3.$$

1

Плоский воздушный конденсатор, расстояние между обкладками которого  $d_1 = 0,5$  см, заряжен до напряжения  $U_1 = 200$  В и отключён от источника. Каким будет напряжение на конденсаторе  $U_2$ , если его обкладки раздвинуть до расстояния  $d_2 = 1$  см?



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Два конденсатора ёмкостями  $C_1 = 1$  мкФ и  $C_2 = 3$  мкФ соединены последовательно и присоединены к источнику постоянного напряжения  $U = 200$  В. Каковы заряды и напряжение на каждом из конденсаторов?



Ответ: \_\_\_\_\_

3

Конденсатору ёмкостью  $C = 2$  мкФ сообщён заряд  $q = 1$  мКл. Обкладки конденсатора соединили проводником. Найти количество теплоты  $Q$ , выделившейся в проводнике при





разрядке конденсатора, и разность потенциалов между его обкладками до разрядки.

Ответ: \_\_\_\_\_



### 3.1.8. СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

**Параллельное соединение  $n$**  конденсаторов (рис. 3.7).

Ёмкость батареи равна сумме ёмкостей каждого из них:

$$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (3.13)$$

Напряжение на всех конденсаторах одинаково, а заряд батареи равен сумме зарядов каждого из конденсаторов:

$$U_1 = U_2 = \dots = U_n = U,$$

$$q_{\text{пар}} = q_1 + q_2 + \dots + q_n.$$

**Последовательное соединение  $n$**  конденсаторов (рис. 3.8).

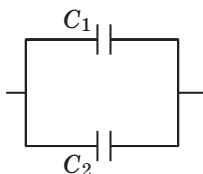


Рис. 3.7

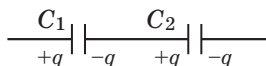


Рис. 3.8

Обратная величина ёмкости батареи равна сумме обратных величин ёмкостей каждого из них:

$$\frac{1}{C_{\text{посл}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (3.14)$$





Напряжение на батарее складывается из суммы напряжений на каждом из конденсаторов, а заряд каждого из них один и тот же:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n,$$

$$q_{\text{посл}} = q_1 = q_2 = \dots = q_n.$$

Следует отметить, что при последовательном соединении большее напряжение приходится на конденсатор меньшей ёмкости. Это надо учитывать, поскольку для каждого конденсатора существует предельное значение напряжения — **напряжение пробоя**, приводящее к его разрушению.

- 1 Два конденсатора ёмкостями  $C_1 = 2$  мкФ и  $C_2 = 3$  мкФ соединены параллельно и к ним последовательно подключён конденсатор ёмкостью  $C_3 = 5$  мкФ. Найти общую ёмкость  $C$  такой батареи.



Ответ: \_\_\_\_\_

- 2 Конденсатор ёмкостью  $C_1 = 3$  мкФ зарядили до разности потенциалов  $U_1 = 300$  В, конденсатор ёмкостью  $C_2 = 2$  мкФ — до разности потенциалов  $U_2 = 200$  В. Затем конденсаторы соединили друг с другом одноимёнными полюсами. Какая разность потенциалов установилась на обкладках конденсаторов после их соединения?



Ответ: \_\_\_\_\_



3

Конденсатор ёмкостью  $C_1 = 1000$  пФ, заряженный до напряжения  $U_1 = 100$  В, соединяют с незаряженным конденсатором ёмкостью  $C_2 = 2000$  пФ. Какая энергия  $\Delta W$  теряется при этом на образование искры, возникающей в момент соединения конденсаторов?



Ответ: \_\_\_\_\_



### 3.1.9. ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

**Диэлектрики** — вещества, не проводящие электрический ток.

К диэлектрикам относится большинство веществ. Это сухое дерево, пластмассы, различные полимеры, минералы, чистые жидкости. Диэлектрики являются хорошими изоляторами и это их свойство используется в разнообразных электрических приборах. Диэлектриками заполняют пространство между обкладками конденсаторов.

**Поляризация диэлектрика** — появление на поверхности диэлектрика связанного (поляризационного) заряда при помещении его в электрическое поле (рис. 3.9).

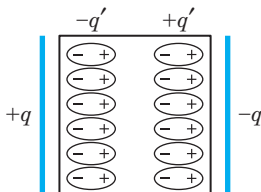


Рис. 3.9





Поляризационный заряд  $q'$  возникает в результате ориентации дипольных моментов его молекул во внешнем поле. Тогда на левой грани диэлектрика «видны» их отрицательные стороны, а на правой грани — положительные.

**Диэлектрическая проницаемость** диэлектрика равна отношению  $E_0$  — напряжённости электрического поля в вакууме — к напряжённости  $E$  электрического поля, созданного в диэлектрике теми же свободными зарядами:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}, \quad (\varepsilon > 1). \quad (3.15)$$

**Ёмкость конденсатора** при внесении в него диэлектрика:

$$C = \varepsilon C_0, \quad (3.16)$$

где  $C_0$  — ёмкость воздушного конденсатора.

Помещение диэлектрика внутрь конденсатора увеличивает его ёмкость в  $\varepsilon$  раз. Это значит, что в  $\varepsilon$  раз возрастает заряд конденсатора, подключённого к источнику постоянного тока.

Энергия, которую способен накопить конденсатор при его зарядке, также возрастает в  $\varepsilon$  раз.

**Энергия заряженного конденсатора:**

$$W = \varepsilon W_0, \quad (3.17)$$

где  $W_0$  — энергия конденсатора в отсутствие диэлектрика.

**Закон Кулона** для безграничного диэлектрика:

$$F_{\text{кул}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}. \quad (3.18)$$

В формулы электростатики (3.4), (3.9) и (3.12), записанные для поля в вакууме, при наличии диэлектрика



следует поставить рядом с  $\varepsilon_0$  множитель  $\varepsilon$ . Формулы применимы в случае, когда диэлектрик заполняет всё пространство, где существует электрическое поле. В конденсаторе — это пространство между его обкладками.

**1**

Два заряда в вакууме взаимодействуют с такой же силой на расстоянии  $r_0 = 11$  см, как в скипидаре на расстоянии  $r = 7,4$  см. Определить диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon$  скипидара.



Ответ: \_\_\_\_\_

**2**

Плоский конденсатор ёмкостью  $C = 0,01$  мкФ, между обкладками которого находится слюдяная пластинка, присоединён к аккумулятору. Заряд конденсатора  $q = 1,4 \cdot 10^{-5}$  Кл. Какой заряд пройдёт по цепи при удалении пластинки? На сколько изменится энергия конденсатора? Диэлектрическая проницаемость слюды  $\varepsilon = 7$ .



Ответ: \_\_\_\_\_

**3**

Плоский воздушный конденсатор, площадь обкладок которого  $S = 100$  см<sup>2</sup>, заполнили диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 2$ , после чего ёмкость конденсатора оказалась равной  $C = 177$  пФ.



Найти расстояние  $d$  между обкладками конденсатора.

Ответ: \_\_\_\_\_

## 3.2. Постоянный электрический ток

В настоящем разделе мы рассмотрим электропроводность металлов, определим величины, характеризующие электрический ток, и сформулируем законы постоянного тока.



### 3.2.1. СИЛА ТОКА. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ИСТОЧНИКА ТОКА

**Электрический ток** — упорядоченное движение зарядов в проводнике.

**Направление тока** — направление движения положительных зарядов.

За направление тока принято направление движения положительных зарядов, хотя в проводниках первого рода — металлах — фактически перемещаются отрицательные электроны в направлении, обратном направлению тока.

**Условия существования тока:**

- наличие носителей тока,
- замкнутая цепь, в которой есть источник тока (рис. 3.10).

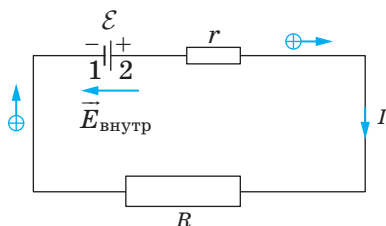


Рис. 3.10

Постоянный электрический ток течёт в проводнике, между концами которого поддерживается постоянная разность потенциалов, создаваемая источником тока.

**Носители тока** — частицы, имеющие заряд, — электроны или ионы, — способные перемещаться в электрическом поле внутри проводника.

В металлах и полупроводниках носители тока — **электроны**, в растворах электролитов — **положительные и отрицательные ионы**, в газах — **ионы** и **электроны**, в вакууме — **электроны**, испускаемые нагретым катодом.

**Электродвижущая сила** (ЭДС) источника тока — разность потенциалов на его клеммах при разомкнутой цепи.

Потенциал  $\varphi_1$  отрицательного полюса источника меньше потенциала  $\varphi_2$  положительного — внутри источника линии напряжённости поля  $E_{\text{внутр}}$  направлены от «плюса» к «минусу», т. е. навстречу движущимся носителям тока, поэтому перенос зарядов из точки 1 в точку 2 внутри источника осуществляется под действием сил неэлектростатического происхождения — так называемых **сторонних сил**.

Сторонние силы могут иметь разную природу: химическую — в гальванических элементах и аккумуляторах, механическую — в роторных генераторах электрического







тока, тепловую — в термоэлектрических источниках, оптическую — в солнечных батареях.

ЭДС источника тока численно равна работе сторонних сил, действующих внутри источника, при переносе единичного положительного заряда от его отрицательного полюса к положительному:

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

Направление ЭДС совпадает с направлением тока на внешнем участке цепи, который течёт от положительного полюса источника к отрицательному.

**Сила тока** — величина заряда, переносимого через поперечное сечение проводника за единицу времени:

$$I = \frac{q}{t}. \quad (3.19)$$

В системе СИ единица силы тока — *ампер* — одна из основных единиц. Она определяется через магнитную силу взаимодействия токов (см. 3.3).

### Единицы измерения

Электродвижущая сила измеряется в **вольтах**:

$$[\mathcal{E}] = \text{В} = \text{Дж/Кл}.$$

Сила тока измеряется в **амперах**:

$$[I] = \text{А} = \text{Кл/с}.$$

1

Сколько электронов проходит через поперечное сечение проводника за время  $t = 1$  с, если по проводнику течёт ток силой  $I = 1$  А?



Ответ: \_\_\_\_\_



### 3.2.2. ЗАКОН ОМА. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКА

**Закон Ома.** Сила тока в проводнике равна отношению приложенного напряжения к сопротивлению проводника  $R$ :

$$I = \frac{U}{R}. \quad (3.20)$$

Закон Ома был открыт экспериментально в 1827 г. Немецкий физик Георг Ом дал следующую формулировку своего закона: **для проводников первого рода — металлов — отношение напряжения на концах проводника к силе тока в нём не зависит от силы тока.**

**Электрическое сопротивление** проводника — отношение приложенного напряжения к силе тока в проводнике:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (3.21)$$

**Сопротивление** однородного проводника (рис. 3.11):

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (3.22)$$

где  $l$  — длина проводника.

$S$  — площадь его поперечного сечения,

$\rho$  — удельное сопротивление проводника.

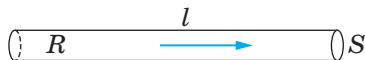


Рис. 3.11





**Удельное сопротивление**  $\rho$  — сопротивление проводника, у которого отношение  $\frac{l}{S} = 1 \text{ м}^{-1}$ . Оно характеризует свойства материала, из которого изготовлен проводник.

**Сопротивление металлов** при температуре  $t$ :

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (3.23)$$

где  $R_0$  — сопротивление при  $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  
 $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления металла.

**Закон Ома для замкнутой цепи** (см. рис. 3.10):

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (3.24)$$

где  $\mathcal{E}$  — ЭДС источника тока,  
 $r$  — его внутреннее сопротивление,  
 $R$  — сопротивление нагрузки.

### Единицы измерения

Сопротивление измеряется в **омах**:

$$[R] = \text{Ом} = \frac{\text{В}}{\text{А}}.$$

Единица удельного сопротивления — **ом-метр**:

$$[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{м}.$$

Температура измеряется в **градусах Цельсия**:

$$[t] = \text{град} = \text{ }^\circ\text{C}.$$

Единица измерения температурного коэффициента сопротивления:

$$[\alpha] = \text{град}^{-1}.$$



1. Источник постоянного тока с ЭДС  $\mathcal{E} = 12 \text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $r = 1 \text{ Ом}$  замкнут на внешнее сопротивление  $R = 9 \text{ Ом}$ . Определить силу тока в цепи  $I$ , падение напряжения  $U_R$  на внешнем участке и падение напряжения  $U_r$  на внутреннем участке цепи.



Ответ: \_\_\_\_\_

2. Дуговой фонарь, требующий для своего питания напряжение  $U_0 = 40 \text{ В}$  и силу тока  $I_0 = 10 \text{ А}$ , включён в сеть с напряжением  $U = 120 \text{ В}$  через реостат, изготовленный из нихромовой проволоки сечением  $S = 2 \text{ мм}^2$ . Определить сопротивление реостата и длину проволоки, необходимой для его изготовления. Удельное сопротивление нихрома  $\rho = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .



Ответ: \_\_\_\_\_

3. В проводнике сопротивлением  $R = 2 \text{ Ом}$ , подключённом к источнику тока с ЭДС  $\mathcal{E} = 1,1 \text{ В}$ , течёт ток  $I = 0,5 \text{ А}$ . Какова сила тока  $I_{\text{max}}$  при коротком замыкании источника?



Ответ: \_\_\_\_\_





### 3.2.3. СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

**Последовательное соединение  $N$**  проводников. Общее сопротивление участка цепи равно сумме сопротивлений каждого из них (рис. 3.12):

$$R_{\text{посл}} = R_1 + R_2 + \dots + R_N. \quad (3.25)$$

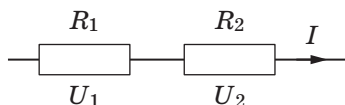


Рис. 3.12

**Параллельное соединение  $N$**  проводников. Проводимость участка цепи (рис. 3.13):

$$\frac{1}{R_{\text{пар}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}. \quad (3.26)$$

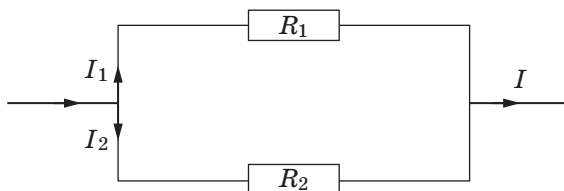


Рис. 3.13

**Проводимость** проводника:

$$G = \frac{1}{R}, \quad (3.27)$$

где  $R$  — его сопротивление.



**Электропроводность** (удельная проводимость) вещества:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}, \quad (3.28)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление проводника.

Наибольшей электропроводностью обладают серебро, медь и алюминий, которые используются для изготовления серебряных контактов реле, а также электрических проводов. Сплавы меди, никеля и марганца, такие как константан, нихром, манганин, обладающие высоким удельным сопротивлением, применяются для изготовления нагревательных элементов, тугоплавкий вольфрам — для изготовления ламп накаливания.

### Единицы измерения

Единица измерения проводимости — **сименс**:

$$[G] = 1/\text{Ом} = \text{См}.$$

Электропроводность измеряется в **сименсах на метр**:

$$[\sigma] = \frac{\text{См}}{\text{м}}.$$

1

В сеть напряжением  $U = 24$  В подключили два последовательно соединённых резистора. При этом сила тока составила  $I_1 = 0,6$  А. Когда резисторы подключили параллельно, суммарная сила тока стала равной  $I_2 = 3,2$  А. Определить сопротивления резисторов.

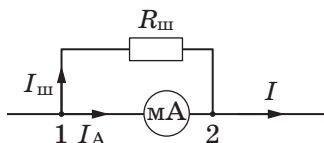


Ответ: \_\_\_\_\_



2

Миллиамперметр, рассчитанный на измерение тока до  $I_A = 25$  мА, имеющий внутреннее сопротивление  $R_A = 10$  Ом, необходимо использовать как амперметр для измерения токов до  $I = 5$  А. Какое сопротивление должен иметь шунт?



Ответ: \_\_\_\_\_



### 3.2.4. РАБОТА И МОЩНОСТЬ ТОКА. ЗАКОН ДЖОУЛЯ — ЛЕНЦА

**Работа кулоновской силы** при переносе заряда  $q$  по проводнику, к которому приложено напряжение  $U$ :

$$A = qU. \quad (3.29)$$

**Мощность тока** на внешнем участке цепи сопротивлением  $R$  (см. рис. 3.10):

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}, \quad (3.30)$$

где  $I$  — сила тока в цепи.

**Закон Джоуля — Ленца.** Количество теплоты, выделяемое в проводнике за время  $t$ , равно произведению квадрата силы тока на сопротивление проводника и время:

$$Q = I^2 R t. \quad (3.31)$$



**Мощность источника тока** в замкнутой цепи:

$$P_{\text{полн}} = I^2(R + r) = \frac{\mathcal{E}^2}{R + r}, \quad (3.32)$$

где  $\mathcal{E}$  — ЭДС источника,  
 $r$  — его внутреннее сопротивление,  
 $R$  — сопротивление нагрузки.

**Коэффициент полезного действия** (КПД) источника тока — отношение полезной мощности к мощности, затрачиваемой во всей цепи:

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{полн}}} = \frac{R}{R + r}. \quad (3.33)$$

Наибольшую мощность на внешнем участке цепи можно получить, если его сопротивление сделать равным внутреннему сопротивлению источника. Тогда

$$P_{\text{max}} = \frac{\mathcal{E}^2}{4r} \quad (\text{при } R = r).$$

Среди источников с одинаковыми ЭДС более мощный тот, у которого меньше внутреннее сопротивление. Включив в цепь параллельно друг другу  $N$  одинаковых источников, мы получим в  $N$  раз более мощный источник в силу того, что его внутреннее сопротивление в  $N$  раз меньше.

1

При силе тока  $I_1 = 3$  А во внешней цепи выделяется мощность  $P_1 = 18$  Вт, а при силе тока  $I_2 = 1$  А — мощность  $P_2 = 10$  Вт. Найти ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока.



Ответ: \_\_\_\_\_





2

Имеются две электрические лампочки мощностью  $P_1 = 40$  Вт и  $P_2 = 60$  Вт, рассчитанные на напряжение сети  $U = 220$  В. Какую мощность будет потреблять каждая из лампочек, если их подключить к сети последовательно?



Ответ: \_\_\_\_\_

### 3.3. Магнитное поле

Стальной стержень, помещённый внутрь длинной катушки, по которой пропускают ток, становится **постоянным магнитом**. Постоянными магнитами являются стрелка компаса и наша Земля. Действие её на маленькую магнитную стрелку осуществляется благодаря **магнитным силам**. Магнитными силами объясняется и взаимодействие двух прямых параллельных проводников, по которым текут электрические токи.

Подобно тому, как покоящийся электрический заряд действует на другой заряд посредством электрического поля, электрический ток действует на другой ток посредством **магнитного поля**. Действие его на постоянные магниты сводится к действию на заряды, движущиеся в атомах вещества.

Учение об электромагнетизме основано на двух положениях:

- магнитное поле возникает вокруг токов и движущихся зарядов,
- магнитное поле действует на движущиеся заряды и токи.



### 3.3.1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАГНИТОВ. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

**Постоянный магнит** — железный образец, подвергнутый действию магнитного поля и сохраняющий намагниченность.

**Полюса магнита** — северный и южный — места скопления железных опилок, возникающего в случае помещения магнита в их среду (рис. 3.14).

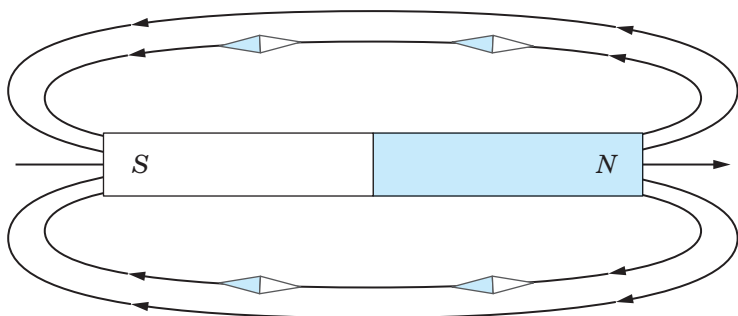


Рис. 3.14

Постоянный магнит (или магнитная стрелка), подвешенный на нити, ориентируется вдоль магнитного меридиана Земли.

**Северный полюс** магнита  $N$  — его конец, указывающий на север.

**Южный полюс** магнита  $S$  — конец, указывающий на юг.

**Одноимённые полюса** магнита отталкиваются друг от друга, разноимённые — притягиваются (рис. 3.15).



Рис. 3.15



Разрезав магнит на две части, обнаружим, что каждая из них тоже будет иметь два полюса, т. е. будет постоянным магнитом. Оба полюса — северный и южный — неотделимы друг от друга.

**Магнитные силовые линии** — замкнутые линии, изображающие магнитное поле (см. рис. 3.14).

**Направление силовой линии** указывает северный полюс помещённой в поле магнитной стрелки.



### 3.3.2. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТОКА

**Вектор магнитной индукции**  $\vec{B}$  — силовая характеристика магнитного поля.

В каждой точке вектор  $\vec{B}$  направлен по касательной к проходящей через эту точку магнитной силовой линии, поэтому эти линии называются также **линиями магнитной индукции**.

В отличие от электрического, линии магнитного поля замкнуты, что обусловлено отсутствием в природе «магнитных зарядов», а сила, действующая в магнитном поле на движущийся заряд и ток, перпендикулярна его силовым линиям.

**Магнитное поле** прямого проводника с током:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}, \quad (3.34)$$

где  $I$  — сила тока в проводнике,

$r$  — расстояние от него,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м (*генри на метр*) — магнитная постоянная.



Силовые линии магнитного поля, созданного прямым проводником с током, представляют собой концентрические окружности, расположенные в перпендикулярной к нему плоскости, с центрами в точке, через которую проходит ток (рис. 3.16). Направление линий определяется **правилом правого винта**.

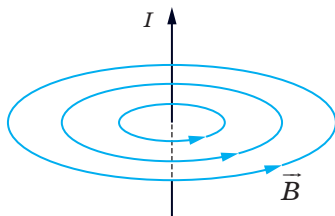


Рис. 3.16

### Правило правого винта.

Винт располагают параллельно проводнику так, чтобы при вращении он двигался в направлении тока. Тогда направление вращения винта укажет направление силовых линий поля.

**Соленоид** — катушка из провода.

**Магнитное поле** внутри длинного соленоида:

$$B = \mu_0 n I, \quad (3.35)$$

где  $n = \frac{N}{l}$  — число витков, приходящееся на единицу длины соленоида,  
 $I$  — сила тока в его обмотке.

Схема линий созданного им магнитного поля, изображённая на рис. 3.17, аналогична схеме линий плоского магнита (см. рис. 3.14). Кружочками обозначены сечения провода, образующего обмотку соленоида.



Токи, текущие по проводу от наблюдателя, обозначены крестиками, а токи противоположного направления — к наблюдателю — обозначены точками.

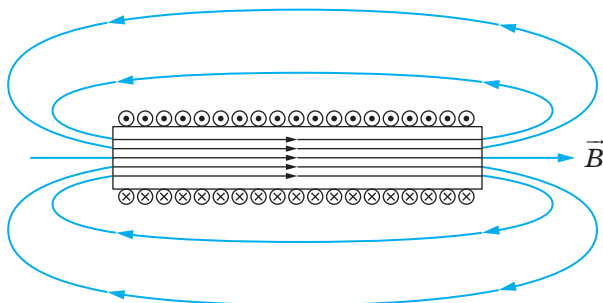


Рис. 3.17

**Правило правого винта** в случае соленоида формулируется так:

**Если винт расположить вдоль оси соленоида и вращать по направлению тока в его обмотке, он будет двигаться в направлении линий магнитной индукции** (рис. 3.18).

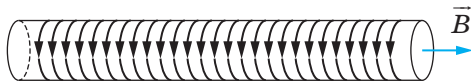


Рис. 3.18

**Однородное поле** — модуль вектора магнитной индукции всюду имеет постоянную величину, а силовые линии поля параллельны друг другу:

$$\vec{B} = \text{const.}$$



Однородное магнитное поле создаётся внутри длинного соленоида. В этом отношении соленоид подобен плоскому конденсатору, внутри которого создаётся однородное электрическое поле (см. рис. 3.3).

### Единицы измерения

Модуль вектора магнитной индукции измеряется в **теслах**:

$$[B] = \text{Тл} = \frac{\text{Гн} \cdot \text{А}}{\text{м}^2}.$$

Сила тока измеряется в **амперах**:

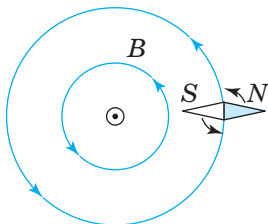
$$[I] = \text{А}.$$

Расстояние измеряется в **метрах**:

$$[r] = \text{м}.$$

1

Длинный прямой проводник расположен перпендикулярно плоскости чертежа, а магнитная стрелка — вдоль линии, пересекающей его центр. После включения тока стрелка расположилась перпендикулярно этой линии северным полюсом вверх (см. рисунок). Укажите направление тока в проводнике.



Ответ: \_\_\_\_\_





### 3.3.3. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ НА ДВИЖУЩИЕСЯ ЗАРЯДЫ И ТОКИ

**Сила Лоренца** — сила, действующая в магнитном поле на движущийся заряд  $q$ :

$$F_{\text{Л}} = qvB \sin \alpha, \quad (3.36)$$

где  $v$  — скорость заряда,  
 $B$  — модуль вектора магнитной индукции,  
 $\alpha$  — угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

**Правило левой руки** для определения направления силы Лоренца:

**Четыре вытянутых пальца левой руки направляют вдоль вектора  $\vec{v}$  так, чтобы линии  $\vec{B}$  входили в ладонь. Тогда отставленный большой палец покажет направление силы, действующей на заряд (рис. 3.19).**

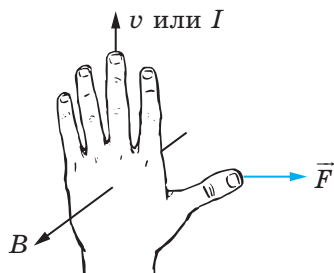


Рис. 3.19

**Сила Ампера** — сила, действующая в магнитном поле на прямолинейный проводник длиной  $l$ , по которому течёт ток  $I$ :



$$F_A = IlB \sin \alpha, \quad (3.37)$$

где  $\alpha$  — угол между направлением тока и вектором  $\vec{B}$ . Направление силы Ампера также определяется правилом левой руки, но теперь четыре её вытянутых пальца нужно расположить вдоль направления тока.

На проводник, расположенный вдоль силовых линий, магнитная сила не действует.

**Сила взаимодействия** двух параллельных прямолинейных проводников, по которым текут токи  $I_1$  и  $I_2$ , приходящаяся на единицу длины проводников  $l$  (рис. 3.20):

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I_1 I_2}{R}, \quad (3.38)$$

где  $R$  — расстояние между ними.

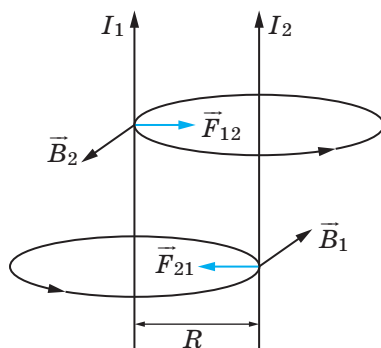


Рис. 3.20

Формула (3.38) позволяет принципиально определить единицу силы тока. В системе СИ — это *ампер*.







**1 ампер (А)** — сила неизменяющегося тока, который, протекая по двум параллельным длинным проводникам очень малого сечения, находящимся на расстоянии 1 м друг от друга, вызывает силу их взаимодействия  $F = 2 \cdot 10^{-7}$  Н на каждый метр длины проводников:

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I^2}{R} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}$$

при  $I = 1 \text{ А}$ ,  $R = 1 \text{ м}$ .

Единица заряда *кулон* — производная от ампера:

**1 кулон (Кл)** — величина заряда, который проходит через поперечное сечение проводника за 1 с, когда по этому проводнику течёт ток силой в 1 А.

### Единицы измерения

Сила измеряется в **ньютон**ах:

$$[F] = \text{Н}.$$

Заряд измеряется в **куло**нах:

$$[q] = \text{Кл}.$$

Скорость измеряется в **метрах в секунду**:

$$[v] = \text{м/с}.$$

1

Электрон движется со скоростью  $v = 5 \text{ м/с}$  параллельно длинному проводнику, по которому течёт ток  $I = 2 \text{ А}$ . Найти силу, действующую на электрон, если расстояние между ним и проводником  $r = 1 \text{ см}$ . Каково ускорение электрона?



Ответ: \_\_\_\_\_



2

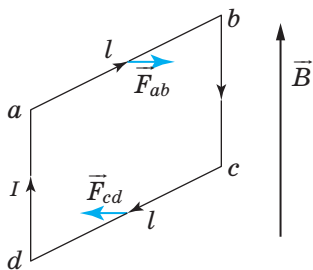
Какова индукция магнитного поля  $B$ , в котором на проводник с током  $I = 25$  А действует сила  $F_A = 50$  мН? Поле и ток взаимно перпендикулярны. Длина активной части проводника  $l = 5$  см. Какую работу совершит эта сила при перемещении проводника на расстояние  $s = 10$  см перпендикулярно силовым линиям?



Ответ: \_\_\_\_\_

3

Прямоугольная рамка  $abcd$  находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,1$  Тл. Плоскость рамки параллельна линиям  $\vec{B}$ . Длина сторон  $ab$  и  $cd$   $l = 5$  см. Найти силы, действующие на эти стороны, если в рамке начинает течь ток  $I = 0,2$  А. Как в этом случае расположится рамка относительно направления силовых линий поля  $\vec{B}$ ?



Ответ: \_\_\_\_\_





### 3.3.4. ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

**Радиус окружности**, по которой движется заряженная частица в однородном магнитном поле  $\vec{B}$  (рис. 3.21):

$$R = \frac{mv}{qB}, \quad (3.39)$$

где  $m$  — масса частицы,

$q$  — её заряд,

$v$  — скорость частицы.

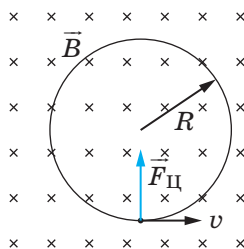


Рис. 3.21

Крестиками обозначены силовые линии магнитного поля, перпендикулярные плоскости рисунка, направленные за эту плоскость — от наблюдателя.

Линии противоположного направления — к наблюдателю — обозначаются на рисунке точками.

**Период обращения** частицы по окружности:

$$T = \frac{2\pi m}{qB}. \quad (3.40)$$

Период не зависит от скорости частицы и определяется только отношением её заряда к массе и индукцией



поля  $B$ . Независимость периода от скорости используется в **циклотроне** — циклическом ускорителе заряженных частиц.

### Единицы измерения

Радиус окружности измеряется в **метрах**:

$$[R] = \text{м.}$$

Масса измеряется в **килограммах**:

$$[m] = \text{кг.}$$

Период измеряется в **секундах**:

$$[T] = \text{с.}$$

1

В направлении, перпендикулярном линиям индукции, в магнитное поле влетает электрон со скоростью  $v = 10^7$  м/с. Найти индукцию поля  $B$ , если электрон описал окружность радиусом  $R = 1$  см.



Ответ: \_\_\_\_\_

2

В однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,1$  Тл перпендикулярно линиям индукции влетает протон с кинетической энергией  $K = 10^{-16}$  Дж. Каковы радиус окружности, по которой протон движется в поле, и частота его обращения по этой окружности?



Ответ: \_\_\_\_\_



## 3.4. Явление электромагнитной индукции

Явление электромагнитной индукции было открыто английским физиком Майклом Фарадеем в 1831 г. Оно заключается в возникновении переменного электрического поля в результате изменения магнитного поля. Это открытие было первым шагом на пути создания общей теории электрических и магнитных явлений — **классической электродинамики**, что было сделано в 60-х годах XIX века соотечественником Фарадея — Джеймсом Максвеллом.



### 3.4.1. ЗАКОН ФАРАДЕЯ. МАГНИТНЫЙ ПОТОК

**Явление электромагнитной индукции** — возникновение электрического тока в замкнутом проводнике при изменении магнитного поля, в котором он находится.

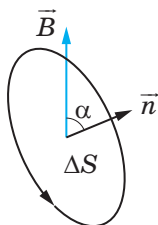


Рис. 3.22

**Магнитный поток** через площадку  $\Delta S$  (рис. 3.22):

$$\Delta\Phi = B\Delta S \cos \alpha, \quad (3.41)$$

где  $B$  — модуль вектора магнитной индукции,

$\alpha$  — угол между вектором  $\vec{B}$  и нормалью к площадке  $\vec{n}$ .

**Закон электромагнитной индукции Фарадея.** Электродвижущая сила (ЭДС)

индукции, возникающая в замкнутом контуре, численно



равна взятой с обратным знаком скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур:

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (3.42)$$

Изменение магнитного потока, согласно (3.41), может происходить благодаря изменению модуля  $\vec{B}$ , площади контура  $\Delta S$  или изменению его ориентации относительно направления линий магнитного поля. Возникающая в контуре ЭДС индукции тем больше, чем быстрее происходят указанные изменения. Знак «минус» выражает правило Ленца, устанавливающее направление индукционного тока.

**Правило Ленца.** Индукционный ток в замкнутом проводящем контуре направлен так, что созданное им магнитное поле препятствует породившему этот ток изменению магнитного потока через контур.

**ЭДС индукции** в прямом проводнике, движущемся в магнитном поле в направлении, перпендикулярном проводнику и вектору  $\vec{B}$ :

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = Blv, \quad (3.43)$$

где  $l$  — длина проводника,  
 $v$  — его скорость.

**ЭДС индукции**, возникающая в катушке, вращающейся в магнитном поле с угловой скоростью  $\omega$  (рис. 3.23):

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{max}} \sin \omega t. \quad (3.44)$$

Если катушку равномерно вращать вокруг оси, перпендикулярной линиям магнитного поля и её собственной оси, число линий, пересекающих площадь её поперечного сечения, будет периодически изменяться от нуля



до максимального значения, что эквивалентно изменению поля  $\vec{B}$  в катушке. Подобным образом изменяется и ток, возникающий в ней благодаря явлению электромагнитной индукции.

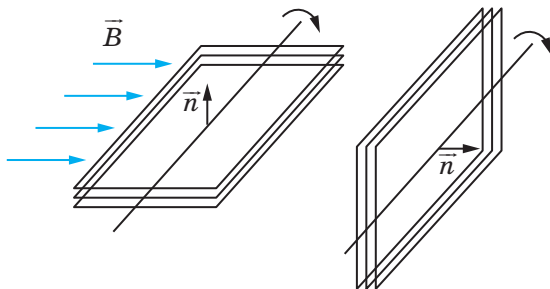


Рис. 3.23

Во второй половине периода ток будет течь в противоположном направлении, поскольку плоскость катушки поворачивается к линиям магнитного поля своей обратной стороной. Кривая зависимости силы тока от времени — синусоида — изображена на рис. 3.24.

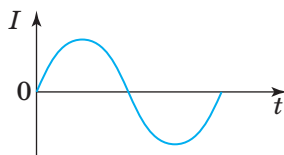


Рис. 3.24

Описанный здесь принцип получения переменного тока используется в **индукционных генераторах**, вырабатывающих электрическую энергию на тепловых или гидроэлектростанциях. Сопротивление вращению ротора генератора, возникающее при взаимодействии



индукционного тока с магнитным полем, преодолевается за счёт работы паровой или гидротурбины, вращающей ротор. Такие генераторы преобразуют механическую энергию в энергию электрического тока.

### Единицы измерения

Единица измерения магнитного потока — **вебер**:

$$[\Phi] = \text{Вб} = \text{Тл} \cdot \text{м}^2.$$

ЭДС измеряется в **вольтах**:

$$[\mathcal{E}_{\text{инд}}] = \text{В}.$$

1

Реактивный самолёт, имеющий размах крыльев  $l = 50$  м, летит горизонтально со скоростью  $v = 880$  км/ч. Определить разность потенциалов, возникающую между концами его крыльев, если вертикальная составляющая индукции магнитного поля Земли  $B = 5 \cdot 10^{-5}$  Тл.



Ответ: \_\_\_\_\_

2

На соленоид длиной  $l = 20$  см и площадью поперечного сечения  $S = 30 \text{ см}^2$  надет проволочный виток. Число витков соленоида  $N = 320$ , ток в соленоиде  $I = 3$  А. Найти среднее значение ЭДС индукции в надетом витке, если ток в соленоиде выключается в течение времени  $\Delta t = 0,001$  с.



Ответ: \_\_\_\_\_







3

За время  $\Delta t = 5$  мс в соленоиде, содержащем  $N = 500$  витков провода, магнитный поток равномерно убывает от  $\Phi_1 = 7$  мВб до  $\Phi_2 = 3$  мВб. Найти ЭДС индукции в соленоиде.



Ответ: \_\_\_\_\_



### 3.4.2. ЯВЛЕНИЕ САМОИНДУКЦИИ

**Явление самоиндукции** — возникновение ЭДС индукции в проводнике, по которому течёт переменный ток.

**Магнитный поток**, созданный током, текущим по замкнутому проводнику, через контур, образованный этим проводником:

$$\Phi = LI, \quad (3.45)$$

где  $L$  — индуктивность проводника,  
 $I$  — сила тока в нём.

**ЭДС самоиндукции**, возникающая в проводнике, по которому течёт ток  $I$ , изменяющийся со временем:

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (3.46)$$

Индуктивность проводника зависит от его размеров и формы, а также магнитных свойств окружающего его вещества.

**Индуктивность** длинного соленоида:

$$L = \mu_0 n^2 V, \quad (3.47)$$

где  $n = \frac{N}{l}$  — число витков, приходящееся на единицу его длины,

$V$  — объём соленоида,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная.

Если ток в проводнике возрастает, ЭДС самоиндукции препятствует его возрастанию, если ток уменьшается — препятствует уменьшению. Явление самоиндукции приводит к возникновению дополнительного сопротивления проводника переменному току. Наряду с активным (омическим) сопротивлением проводник приобретает индуктивное сопротивление.

**Индуктивное сопротивление** проводника:

$$X_L = \omega L, \quad (3.48)$$

где  $\omega = 2\pi\nu$  — циклическая частота переменного тока.

**Токи Фуко** — вихревые индукционные токи, возникающие в массивном проводнике, находящемся в переменном магнитном поле.

Токи Фуко возникают благодаря явлению электромагнитной индукции. Они возникают также при движении массивного проводника в постоянном, но неоднородном в пространстве магнитном поле. Токи Фуко имеют такое направление, что действующая на них сила Ампера тормозит движение проводника. Маятник в виде сплошной металлической пластинки из немагнитного материала, совершающий колебания между полюсами электромагнита (рис. 3.25), резко останавливается при включении магнитного поля.

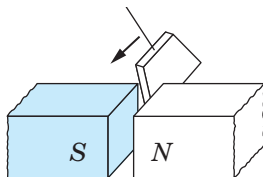


Рис. 3.25

Токи Фуко находят применение в вакуумной технике для прогрева металлических частей приборов, находящихся внутри откачиваемого сосуда, при извлечении с их поверхности остаточных газов, в микроволновых печах — для разогрева или приготовления пищи. Выделение тепла при протекании в проводнике вихревых токов используется в электрометаллургии для плавки металлов с целью получения высококачественных сплавов. Для этого расплавляемый металл помещают внутрь тороида, по обмотке которого пропускают переменный электрический ток. Тормозящее действие магнитного поля используют для устройства магнитных успокоителей (демпферов) в гальванометрах, сейсмографах и других приборах.

Однако во многих случаях нагревание, вызываемое токами Фуко, оказывается вредным и с ним приходится бороться. Сердечники трансформаторов, роторы электродвигателей набирают из отдельных железных пластин, разделенных слоями изолятора, препятствующего развитию больших индукционных токов, а сами пластины изготавливают из сплавов, имеющих высокое удельное сопротивление.

### **Единицы измерения**

Сила тока измеряется в **амперах**:

$$[I] = \text{А}.$$

Единица измерения индуктивности — *генри*:

$$[L] = \text{Гн} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}}.$$

Индуктивное сопротивление измеряется в *омах*:

$$[X_L] = \text{Ом}.$$



1

За какой промежуток времени  $\Delta t$  в соленоиде с индуктивностью  $L = 240$  Гн происходит нарастание тока от нуля до  $I = 11,4$  А, если при этом возникает ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_c = 30$  В?



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Требуется изготовить соленоид индуктивностью  $L = 0,01$  Гн из провода диаметром  $d = 0,6$  мм. Длина соленоида  $l = 20$  см. Какой должна быть площадь поперечного сечения соленоида  $S$ ? Витки плотно прилегают друг к другу.



Ответ: \_\_\_\_\_

3

Сопротивление провода, из которого изготовлена катушка индуктивностью  $L = 0,2$  Гн, составляет  $R = 7,2$  Ом. Найти полное сопротивление этой катушки, если по ней течёт переменный ток частотой  $\nu = 50$  Гц.



Ответ: \_\_\_\_\_



### 3.4.3. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

**Энергия магнитного поля**, запасённая в катушке индуктивностью  $L$ :

$$W_M = \frac{LI^2}{2}, \quad (3.49)$$

где  $I$  — сила тока в катушке.





**Объёмная плотность энергии** магнитного поля:

$$w_M = \frac{W_M}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0}, \quad (3.50)$$

где  $B$  — модуль вектора магнитной индукции.

### Единицы измерения

Энергия магнитного поля измеряется в **джоулях**:

$$[W_M] = \text{Дж.}$$

1

Обмотка электромагнита имеет сопротивление  $R = 10$  Ом, индуктивность  $L = 0,2$  Гн и находится под напряжением. В течение какого времени  $\Delta t$  в обмотке выделится количество теплоты  $Q$ , равное энергии магнитного поля  $W_M$  в сердечнике?



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Найти энергию магнитного поля соленоида, в котором при силе тока  $I = 10$  А возникает магнитный поток  $\Phi = 0,5$  Вб.



Ответ: \_\_\_\_\_

## 3.5. Электромагнитное поле

Учение об электромагнитном поле, развитое в 60-х годах XIX века английским физиком Джеймсом Клерком Максвеллом, лежит в основе **классической электродинамики**.



### 3.5.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

**Электрический колебательный контур** — замкнутая цепь, состоящая из конденсатора и катушки индуктивности (рис. 3.26).

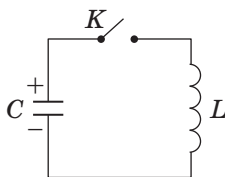


Рис. 3.26

**Электромагнитные колебания** — периодическое изменение заряда конденсатора и тока в цепи:

$$q(t) = q_0 \cos \omega t, \quad (3.51, \text{ а})$$

$$I(t) = I_0 \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (3.51, \text{ б})$$

где  $q_0$  — начальный заряд конденсатора,

$I_0 = \omega q_0$  — амплитудное значение тока,

$\omega = \frac{2\pi}{T}$  — циклическая частота колебаний.

Если сообщить конденсатору заряд, а затем замкнуть ключ  $K$ , то конденсатор начнёт разряжаться и по цепи потечёт изменяющийся во времени электрический ток. При отсутствии в цепи катушки индуктивности ток будет течь до тех пор, пока потенциалы обкладок конденсатора не сравняются. При наличии же индуктивности процесс идёт иначе.

В момент, когда разность потенциалов между обкладками становится равной нулю, ток продолжает течь





благодаря ЭДС самоиндукции, возникающей в катушке, в результате чего происходит перезарядка конденсатора — положительно заряженная обкладка заряжается отрицательно, отрицательно заряженная — положительно. После этого снова возникает ток, но уже обратного направления, и снова происходит перезарядка. В цепи, содержащей конденсатор и катушку индуктивности, происходят **электромагнитные колебания**.

Процессы, протекающие в колебательном контуре, дают пример превращения энергии электрического поля в энергию магнитного поля и обратно.

**Период электромагнитных колебаний** в колебательном контуре:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}, \quad (3.52)$$

где  $L$  — индуктивность катушки,  
 $C$  — ёмкость конденсатора.

### Единицы измерения

Период колебаний измеряется в **секундах**:

$$[T] = \text{с}.$$

Единица измерения индуктивности — **генри**:

$$[L] = \text{Гн}.$$

Ёмкость конденсатора измеряется в **фарадах**:

$$[C] = \text{Ф}.$$

1

Какой величины индуктивность надо включить в колебательный контур, чтобы при ёмкости конденсатора  $C = 50$  пФ получить частоту свободных колебаний  $\nu = 10$  МГц?



Ответ: \_\_\_\_\_



2

Колебательный контур состоит из катушки и двух одинаковых конденсаторов, включённых параллельно. Во сколько раз изменится частота собственных колебаний, если эти конденсаторы включить последовательно?



Ответ: \_\_\_\_\_

3

Амплитудное значение силы тока в колебательном контуре  $I_m = 2$  мА, а амплитудное значение напряжения на конденсаторе  $U_m = 1$  В. В момент времени  $t$  напряжение на конденсаторе  $U = 0,2$  В. Найти силу тока в катушке в этот момент времени.



Ответ: \_\_\_\_\_



### 3.5.2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

**Электромагнитное поле** — совокупность порождающих друг друга переменного электрического и переменного магнитного полей.

**Электромагнитная волна** — форма существования электромагнитного поля (рис. 3.27).

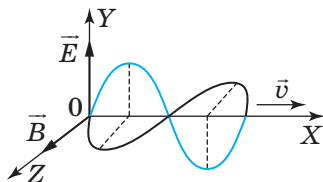


Рис. 3.27







Электромагнитная волна поперечна. Плоскость, в которой колеблется вектор  $\vec{E}$ , называется **плоскостью поляризации** волны.

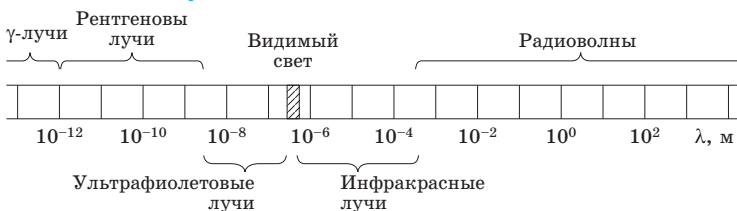
**Скорость электромагнитной волны** в вакууме

$$c = \lambda \cdot \nu = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}, \quad (3.53)$$

где  $\lambda$  — длина волны,  $\nu$  — её частота.

Электромагнитная волна распространяется в пространстве со скоростью света, которая в вакууме составляет 300 000 км/с.

### Шкала электромагнитных волн



Видимый свет, имеющий длины волн в диапазоне от 0,4 до 0,7 мкм, занимает лишь небольшой участок шкалы электромагнитных волн, которые наблюдаются в природных явлениях и которые человек научился получать сам. Это инфракрасные и ультрафиолетовые лучи, испускаемые Солнцем, радиоволны, рентгеновские и гамма-лучи.

**Радиосвязь** — передача информации на расстояние при помощи электромагнитных волн.

1

В каком диапазоне длин волн может работать приёмник, если ёмкость конденсатора в его колебательном контуре плавно изменяется от





$C_1 = 50$  пФ до  $C_2 = 500$  пФ, а индуктивность катушки постоянна и равна  $L = 20$  мкГн?

Ответ: \_\_\_\_\_

2

На каком расстоянии  $s$  от антенны радиолокатора А находится объект С, если отражённый от него радиосигнал вернулся обратно через промежуток времени  $t = 200$  мкс?



Ответ: \_\_\_\_\_

3

Каким может быть максимальное число импульсов, испускаемых радиолокатором за время  $t = 1$  с, при разведывании цели, находящейся на расстоянии  $s = 30$  км от него?



Ответ: \_\_\_\_\_



### 3.5.3. ДАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

**Давление** — отношение силы, действующей по нормали к поверхности, к площади этой поверхности:

$$p = \frac{F}{S}.$$

Рассмотрим плоскую волну, падающую на бесконечную проводящую плоскость, фрагмент которой в виде пластинки изображён на рис. 3.28. Благодаря наличию в пластинке свободных зарядов в ней за счёт



электрической составляющей электромагнитной волны индуцируется электрический ток  $I$ . Направление тока совпадает с направлением вектора  $\vec{E}$  волны. На этот ток со стороны магнитной составляющей волны  $\vec{B}$  действует сила Ампера  $\vec{F}_A$ .

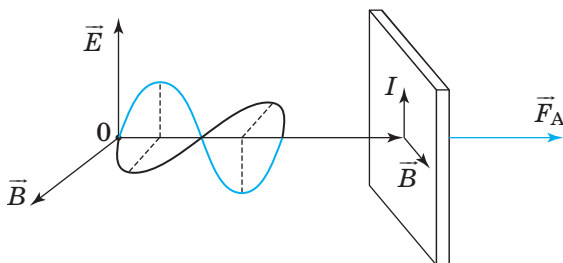


Рис. 3.28

В течение первого полупериода, когда вектор  $\vec{E}$  и, соответственно, ток  $I$  направлены вверх, вектор  $\vec{B}$  направлен вправо, так что сила Ампера действует в направлении распространения волны. Во втором полупериоде направления векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  изменяются на противоположные, однако сила Ампера сохраняет своё прежнее направление.

Таков механизм действия на проводящую поверхность электромагнитной волны, которая оказывает на неё давление.

**Давление** электромагнитной волны:

$$p = (1 + \rho)w, \quad (3.54)$$

где  $w$  — объёмная плотность энергии электромагнитного поля,

$\rho$  — коэффициент отражения от поверхности, на которую падает волна.



**Объёмная плотность энергии** электромагнитного поля:

$$w = \frac{\varepsilon_0 E_0^2}{2}, \quad (3.55)$$

где  $E_0$  — амплитудное значение напряжённости электрического поля волны.

**Коэффициент отражения** — отношение энергии отражённой волны к энергии падающей:

$$\rho = \frac{W_{\text{отр}}}{W_{\text{пад}}}. \quad (3.56)$$

### Единицы измерения

Давление измеряется в **паскалях**:

$$[p] = \text{Па} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

Объёмная плотность энергии измеряется в **джоулях на кубический метр**:

$$[w] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}.$$





## 4. ОПТИКА

**Оптика**, или **физическая оптика**, — раздел физики, в котором изучаются свойства света и взаимодействие его с веществом.

Оптика делится на **волновую** и **квантовую** оптику. Первая исходит из волновых представлений о свете и объясняет явления интерференции и дифракции света. Вторая рассматривает свет как поток частиц — фотонов — и способна объяснить явления, связанные с излучением и поглощением света веществом, в частности явление фотоэффекта. Таким образом, свет проявляет двойственную природу, выступая в виде волны или в виде потока частиц.

**Видимый свет** — электромагнитные волны, воспринимаемые глазом человека, длина волны которых лежит в пределах от 0,4 до 0,7 мкм.

**Источники света** — Солнце и звёзды, молния во время грозы, а также устройства, созданные руками человека, — лампы накаливания, газоразрядные трубки, электрическая дуга, световые полупроводниковые диоды.

**Оптические приборы**, вооружающие глаз — лупа, микроскоп, зрительная труба, бинокль, телескоп, — используют законы отражения и преломления света.

**Световые волны** служат инструментом для изучения строения и свойств веществ.

**Свет**, приходящий от далеких звёзд, несёт информацию об их движении и химическом составе.

**Оптические квантовые генераторы** — **лазеры** — созданы человеком в результате глубокого изучения свойств микромира.

**Излучение лазеров** обладает уникальными свойствами — высокой монохроматичностью и когерентностью, поэтому лазеры находят широкое применение во всех сферах человеческой деятельности.

## 4.1. Геометрическая оптика

Законы отражения и преломления света на границе раздела двух сред составляют предмет **геометрической оптики**. Она позволяет получить важные практические результаты, пользуясь простыми правилами построения изображений предметов в оптических системах.



### 4.1.1. ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ, ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

**Луч света** — линия, пересекающая фронт волны под прямым углом и показывающая направление его перемещения.

**Закон прямолинейного распространения света.** В однородной среде луч света распространяется по прямой линии.

**Закон отражения света.** Луч, отражённый от плоского зеркала, падающий луч и нормаль к его поверхности в точке падения лежат в одной плоскости, а углы, образованные этими лучами с нормалью, равны друг другу (рис. 4.1).

**Закон преломления света.** Лучи падающий, преломленный и нормаль к поверхности раздела сред лежат в одной плоскости, а углы их падения и преломления связаны соотношением (рис. 4.2):



$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{12}, \quad (4.1)$$

где  $\alpha$  — угол падения,  
 $\beta$  — угол преломления,  
 $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления сред относительно вакуума,  
 $n_{12}$  — показатель преломления второй среды относительно первой.

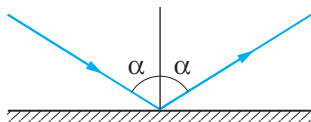


Рис. 4.1

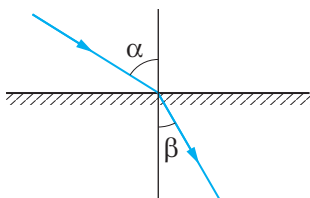


Рис. 4.2

**Абсолютный показатель преломления** среды (относительно вакуума):

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{v}, \quad (4.2)$$

где  $c$  и  $v$  — скорость света в вакууме и в среде.

**Явление полного внутреннего отражения** — зеркальное отражение луча света, распространяющегося в среде, от её границы с вакуумом, когда угол падения луча  $\beta$  превышает  $\beta_0$  — значение, удовлетворяющее уравнению:

$$\sin \beta_0 = \frac{1}{n}, \quad (4.3)$$

где  $n$  — показатель преломления среды (рис. 4.3).

**Дисперсия света** — зависимость показателя преломления от длины волны света.

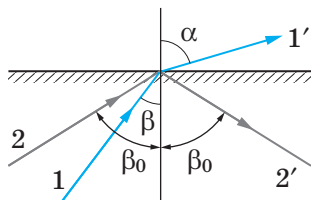


Рис. 4.3

1

Предмет находится на расстоянии  $l = 10$  см от плоского зеркала. На каком расстоянии от предмета окажется его изображение, если предмет отодвинуть на  $a = 5$  см от зеркала?



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Угол падения луча на плоское зеркало увеличили от  $\alpha_1 = 20^\circ$  до  $\alpha_2 = 40^\circ$ . Как изменился угол между падающим и отражённым лучами?



Ответ: \_\_\_\_\_

3

Луч света переходит из воздуха в стекло с показателем преломления  $n = 1,6$ . При каком угле падения преломлённый луч образует с отражённым лучом угол  $90^\circ$ ?



Ответ: \_\_\_\_\_







### 4.1.2. СОБИРАЮЩАЯ ЛИНЗА

**Собирающая линза** — круглое стеклянное тело, ограниченное двумя выпуклыми сферическими поверхностями (рис. 4.4, а).

На оптических схемах линза условно обозначается двойной стрелкой (рис. 4.4, б). Точка  $O$  в её центре называется **оптическим центром линзы**.

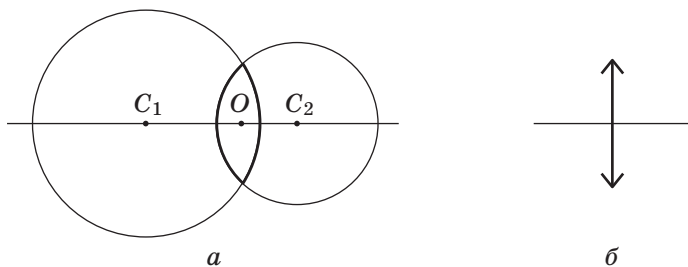


Рис. 4.4

Лучи, проходящие через оптический центр линзы, не испытывают преломления. Соответствующие прямые называются **оптическими осями** линзы. Таких осей существует бесконечно много.

**Главная оптическая ось** — ось, совпадающая с осью симметрии линзы — прямой, проходящей через центры сфер  $C_1$  и  $C_2$ .

Пучок параллельных лучей, идущих вдоль одной из оптических осей, проходя через линзу, собирается в точке  $P$  в её **фокальной плоскости**, перпендикулярной главной оптической оси и расположенной на расстоянии  $F$  от центра линзы (рис. 4.5).

**Фокус линзы** — точка на оптической оси, в которой сходятся лучи, идущие параллельно этой оси.

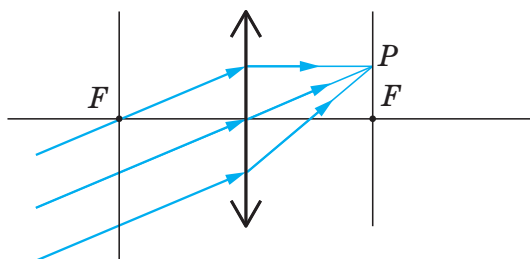


Рис. 4.5

**Правила** построения изображений в линзе:

1. Луч света, параллельный оптической оси линзы, пройдя через неё, пересекает точку фокуса линзы.
2. Луч, идущий через оптический центр линзы, не изменяет своего направления.

**Формула линзы:**

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{F}, \quad (4.4)$$

где  $a$  — расстояние от предмета до линзы,  
 $a'$  — расстояние от линзы до изображения,  
 $F$  — фокусное расстояние линзы.

Изображения предмета в собирающей линзе могут быть двух типов — **действительные** и **мнимые**.

Действительные изображения образуются в случае, когда расстояние от линзы до предмета  $AB$  больше фокусного расстояния линзы ( $a > F$ , рис. 4.6).

Изображение предмета  $A'B'$  — действительное и перевернутое — можно наблюдать на экране, поместив его на расстоянии  $a'$  от линзы. Размер изображения может быть как больше, так и меньше размера предмета в зависимости от соотношения между  $a$  и  $a'$ .

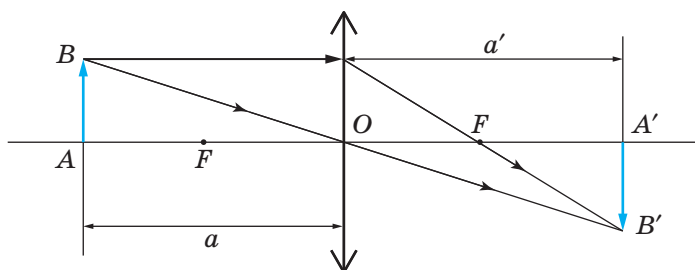


Рис. 4.6

Этот случай реализуется в фото- и кинокамерах, проекционных аппаратах, когда мы записываем или воспроизводим на экране картинку, видимую невооружённым глазом.

Второй случай, когда мы получаем мнимое изображение предмета, осуществляется, если предмет поместить «перед фокусом» линзы ( $a < F$ , рис. 4.7).

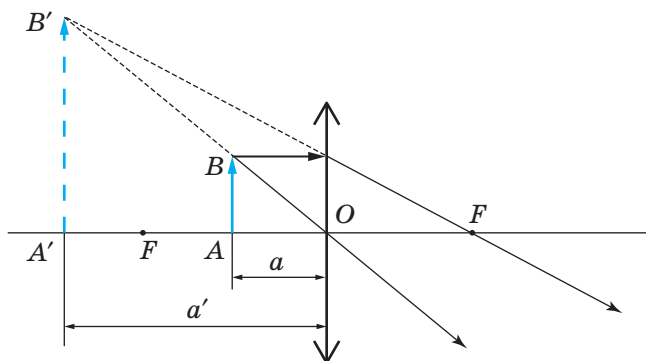


Рис. 4.7



Лучи, один из которых проходит через оптический центр линзы, а другой параллельно её оптической оси, расходятся. Продолжения этих лучей пересекаются в точке  $B'$ . Изображение точки  $B$  предмета — мнимое.

Формула линзы в этом случае приобретает вид:

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{a'} = \frac{1}{F}, \quad (4.5)$$

где расстояние  $a'$  от линзы до изображения берётся со знаком «минус» — в направлении против хода луча, — поскольку это мнимое изображение.

Мнимое изображение — прямое (не перевёрнутое). Размер его  $A'B'$  больше размера предмета  $AB$ .

**Оптическая сила линзы** — величина, обратная её фокусному расстоянию:

$$D = \frac{1}{F}. \quad (4.6)$$

**Оптическая сила** системы из двух соприкасающихся линз:

$$D = D_1 + D_2. \quad (4.7)$$

### Единицы измерения

Расстояния  $a$  и  $a'$  измеряются в **метрах**:

$$[a] = [a'] = \text{м}.$$

Фокусное расстояние измеряется в **метрах**:

$$[F] = \text{м}.$$

Единица измерения оптической силы — **диоптрия** (дптр):

$$[D] = \text{дптр} = \text{м}^{-1}.$$



1

Свеча находится на расстоянии  $a = 12,5$  см от собирающей линзы, оптическая сила которой  $D = 10$  дптр. На каком расстоянии от линзы получится изображение и каким оно будет?



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Рассматривая предмет в собирающую линзу и располагая его на расстоянии  $a = 4$  см от неё, получают его мнимое изображение в  $k = 5$  раз большее самого предмета. Какова оптическая сила линзы?



Ответ: \_\_\_\_\_



### 4.1.3. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Простейшим прибором для вооружения глаза является лупа, рассмотрением которой мы ограничимся.

**Лупа** — собирающая линза, через которую рассматривается предмет, располагаемый между линзой и её фокусом.

**Угол зрения** — угол между крайними лучами, попадающими в глаз от рассматриваемого предмета.

Видимый размер предмета определяется размером его изображения на сетчатке глаза, который, в свою очередь, определяется углом зрения  $\varphi$  (рис. 4.8).



На рис. 4.9 показан ход лучей при рассматривании небольшого предмета  $AB$  через лупу. Лучи, исходящие из точки  $B$  предмета длиной  $l$ , преломляются сначала в лупе, затем в преломляющих средах глаза и собираются в точке  $B''$  на сетчатке. В той же точке  $B''$  собрались бы лучи, если бы лупы не было, а источник находился в точке  $B'$ , т. е. если бы глаз непосредственно рассматривал предмет  $A'B'$  увеличенных размеров  $l'$ , представляющий мнимое изображение предмета, даваемое лупой.

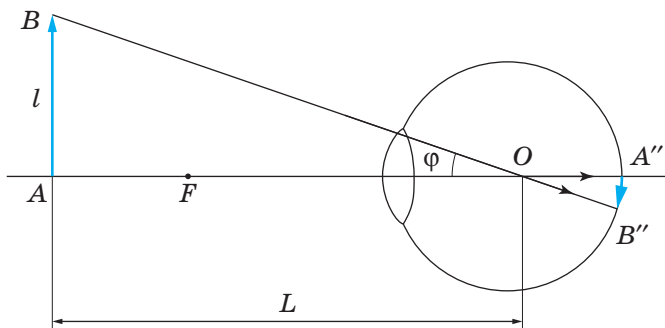


Рис. 4.8

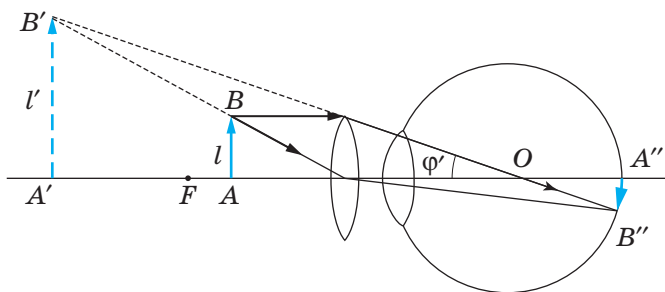


Рис. 4.9





**Увеличение оптического прибора** — отношение длины изображения на сетчатке в случае вооружённого глаза к длине изображения в случае невооружённого глаза.

Увеличение лупы равно отношению угла зрения  $\varphi'$  при рассматривании через неё предмета (рис. 4.9) к углу зрения  $\varphi$  для невооружённого глаза, когда предмет расположен от него на расстоянии наилучшего зрения  $L$  (рис. 4.8).

**Увеличение лупы:**

$$k = \frac{l'}{l} = \frac{L}{F}, \quad (4.8)$$

$L = 25$  см — расстояние наилучшего зрения,

$l$  — размер предмета,

$l'$  — размер мнимого изображения,

$F$  — главное фокусное расстояние лупы (в см).

1

Найти увеличение, даваемое лупой, фокусное расстояние которой  $F = 2$  см, в двух случаях: для нормального глаза с расстоянием наилучшего зрения  $L_1 = 25$  см и для близорукого глаза с расстоянием наилучшего зрения  $L_2 = 15$  см.



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Человек при чтении держит книгу на расстоянии  $L = 50$  см. Какой оптической силы очки нужны ему?



Ответ: \_\_\_\_\_



3

На сколько изменяется оптическая сила нормального глаза человека, если он переводит глаза от книги, которую читал, на рисунок, висящий на стене на расстоянии  $a = 2$  м от глаза?



Ответ: \_\_\_\_\_

## 4.2. Интерференция света

Волны, распространяющиеся в упругой среде, и электромагнитные волны имеют разную природу. Первые обусловлены колебаниями частиц среды, передающимися из одной точки пространства в другую вследствие взаимодействия этих частиц друг с другом. Вторые, согласно теории Максвелла, представляют собой распространяющиеся в пространстве со скоростью света колебания порождающих друг друга электрического и магнитного полей. Несмотря на различие, эти волны описываются одинаковыми математическими уравнениями.

Явление интерференции присуще волнам любой природы. Однако наблюдать интерференцию наиболее удобно в видимом свете, занимающем в спектре электромагнитных волн диапазон длин от 0,4 до 0,7 мкм.



### 4.2.1. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТОВЫХ ВОЛН

**Интерференция света** — перераспределение интенсивности света в пространстве вследствие наложения световых волн, входящих от когерентных источников.





**Когерентные источники света** — источники, излучающие волны с одинаковыми частотами, амплитудами, направлением плоскости поляризации, разность фаз колебаний которых постоянна во времени.

Плоская электромагнитная, или **световая**, волна, распространяющаяся вдоль оси  $X$  декартовой системы координат, изображена на рис. 4.10. Она имеет две составляющие — электрическую и магнитную. Вектор напряжённости электрического поля  $\vec{E}$  и вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  перпендикулярны друг другу и направлению распространения волны, так что электромагнитная волна **поперечна**.

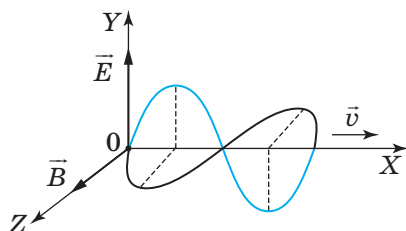


Рис. 4.10

В оптике ограничиваются описанием только электрической составляющей световой волны, полагая, что магнитная составляющая всегда присутствует, являясь неотъемлемой её частью. Вектор  $\vec{E}$  называют **световым вектором**, а плоскость, в которой он колеблется, — **плоскостью поляризации** волны.

**Интенсивность света** — энергия  $W$ , переносимая световой волной за единицу времени  $t$  через единичную площадку  $S$ , перпендикулярную направлению её распространения:



$$I = \frac{W}{St}. \quad (4.9)$$

**Интенсивность света** пропорциональна квадрату напряжённости электрического поля световой волны  $E_0$ :

$$I \sim E_0^2. \quad (4.10)$$

**Принцип суперпозиции** световых волн. Вектор напряжённости электрического поля в данной точке пространства равен сумме векторов напряжённости электрического поля каждой из складываемых волн:

$$\vec{E}_{\text{рез}} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2. \quad (4.11)$$

**Условие усиления света** — две одинаковые волны приходят в данную точку в одинаковых фазах (горбы и впадины волн совпадают, рис. 4.11, а):

$$\delta = d_2 - d_1 = m\lambda, \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (4.12)$$

где  $\delta$  — разность путей первого и второго луча,  $\lambda$  — длина световой волны.

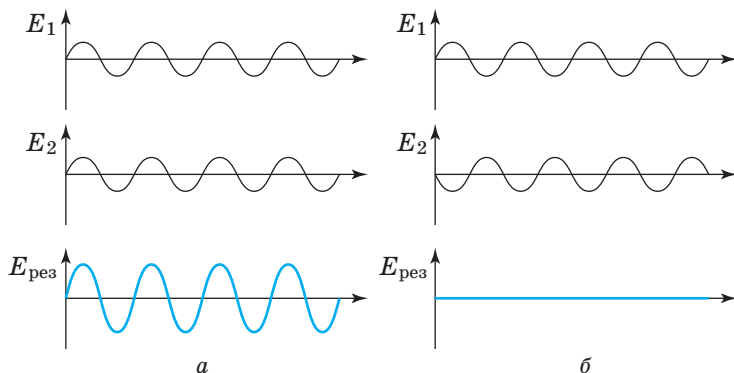


Рис. 4.11



Амплитуда созданных ими колебаний в данной точке вдвое превышает амплитуду колебаний  $E_0$ , порождаемых каждой из волн ( $E_{\text{рез}} = 2E_0$ ), а интенсивность света в этой точке, согласно (4.11), вчетверо выше интенсивности  $I_0$ , создаваемой каждой из волн в отдельности ( $I_{\text{рез}} = 4I_0$ ), т. е. вдвое больше суммы интенсивностей складываемых колебаний.

**Условие ослабления света** — наложение волн происходит в противофазах (горбы одной волны накладываются на впадины второй, рис. 4.11, б):

$$\delta = d_2 - d_1 = (2m - 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (m = 1, 2, 3, \dots). \quad (4.13)$$

Амплитуда результирующих колебаний в этой точке обращается в ноль, следовательно,  $I_{\text{рез}} = 0$ .

Таким образом, интенсивность света распределяется в пространстве неравномерно. Поместив на пути света экран, мы будем видеть на нём интерференционную картину, которая представляет собой чередующиеся максимумы и минимумы освещённости.

На рис. 4.12 представлена оптическая схема опыта Т. Юнга, который в 1800 г. впервые выполнил демонстрационный эксперимент по наблюдению интерференции света.

Два когерентных источника света  $S_1$  и  $S_2$  расположены на расстоянии  $D$  от экрана  $FF$  и на расстоянии  $l$  друг от друга, много меньшем  $D$  ( $l \ll D$ ). В точку  $P$ , находящуюся на расстояниях соответственно  $d_1$  и  $d_2$  от этих источников, приходит две волны, которые, накладываясь друг на друга, создают на экране тёмные и светлые полосы.

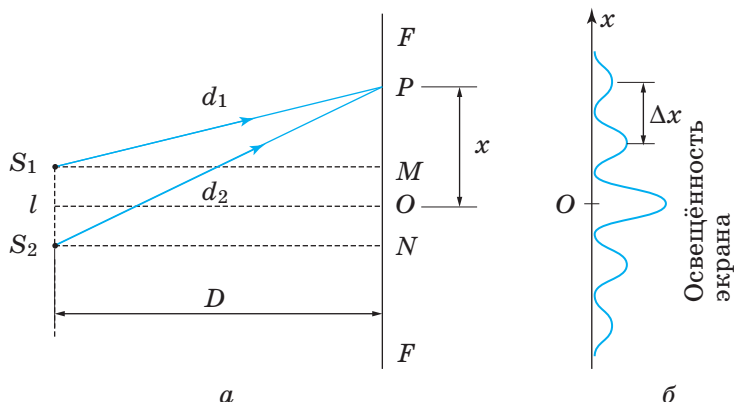


Рис. 4.12

**Ширина интерференционных полос** — расстояние между соседними максимумами интенсивности на экране:

$$\Delta x = \frac{D\lambda}{l}. \quad (4.14)$$

Зная  $l$  и  $D$  и измеряя расстояние  $\Delta x$ , можно найти длину световой волны  $\lambda$ .

Методы, основанные на явлении интерференции, позволяют измерять размеры тел и расстояния между ними с высокой точностью, поскольку в качестве измерительной единицы используют длины волн видимого света, составляющие доли микрона.

### Единицы измерения

Расстояния и длина волны измеряются в **метрах**:

$$[D] = [d] = [l] = [\Delta x] = [\lambda] = \text{м}.$$





Единица измерения интенсивности света — **ватт на квадратный метр**:

$$[I] = \text{Вт/м}^2.$$

1

В опыте Юнга (см. рис. 4.12) расстояние между источниками света  $\lambda = 0,5$  мм, а длина волны  $\lambda = 550$  нм. Каково расстояние  $D$  от источников до экрана, если расстояние между соседними максимумами освещённости на экране  $\Delta x = 1$  мм?



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Во сколько раз увеличится расстояние  $\Delta x$  между соседними интерференционными полосами на экране в опыте Юнга, если зелёный светофильтр, пропускающий свет с длиной волны  $\lambda_1 = 500$  нм, заменить на красный ( $\lambda_2 = 650$  нм)?



Ответ: \_\_\_\_\_

## 4.3. Дифракция света

**Дифракция** — отклонение луча света от прямолинейного распространения при прохождении световых волн вблизи препятствий.

В однородной среде, как показывает опыт, луч света распространяется вдоль прямой линии. Понятие луча,



которым мы пользовались при рассмотрении интерференции, предполагает, что пучок света, испущенного источником, может быть сколь угодно тонким. Однако, если ширина пучка становится соизмеримой с длиной волны света, этот пучок начинает расходиться — расплывается в пространстве. Вблизи препятствий, если их размеры соизмеримы с длиной световой волны, наблюдается попадание света в область геометрической тени.

Явление дифракции (от латинского слова *diffractus* — преломление), как и явление интерференции, присуще всем волнам — в упругой среде или электромагнитным. Объяснить это явление можно с волновой точки зрения. Теория дифракции света, созданная в начале XIX века Огюстом Френелем, окончательно утвердила представление о волновой природе света, которое стало господствующим в науке вплоть до начала XX века.



### 4.3.1. ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА

**Фронт волны** — поверхность, отделяющая область пространства, в которой происходят колебания, от остальной части пространства, где колебания ещё не начались.

Процесс распространения колебаний в пространстве сопровождается перемещением фронта волны со скоростью, называемой **фазовой**. Этот процесс изображают в виде последовательности волновых поверхностей, показывающих положение фронта волны через малые промежутки времени. Каждую из этих поверхностей можно построить, используя **принцип Гюйгенса**.

**Принцип Гюйгенса.** Каждая точка фронта волны является источником вторичных сферических волн, огибающая



которых (общая касательная) показывает его положение в более поздний момент времени (рис. 4.13).

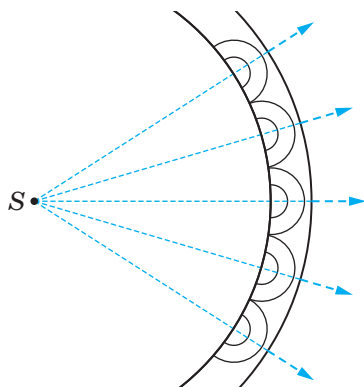


Рис. 4.13

Френель, в развитие принципа Гюйгенса, предложил метод расчёта амплитуды результирующих колебаний, возникающих в точке наблюдения под действием этих вторичных источников, — **метод зон Френеля**.

Суть его заключается в том, что в однородной среде свет распространяется вдоль прямой линии, если вся поверхность фронта волны «видна» из точки наблюдения. Если же часть волновой поверхности закрыть непрозрачным экраном, появится отклонение света от прямолинейного распространения, которое и называется дифракцией.



### 4.3.2. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКЕ

**Дифракционная решётка** — совокупность параллельных щелей одинаковой ширины, находящихся на равных расстояниях друг от друга.

Дифракционную решётку изготавливают из стеклянной пластинки, на которую тонким алмазным резцом наносят параллельные штрихи, между которыми остаются прозрачные для света полосы.

На рис. 4.14 показано сечение дифракционной решётки плоскостью, перпендикулярной направлению её щелей. Ширина каждой щели обозначена буквой  $a$ , ширина разделяющей их непрозрачной полосы — буквой  $b$ . Их сумма  $d = a + b$  называется **постоянной** или **периодом** дифракционной решётки.

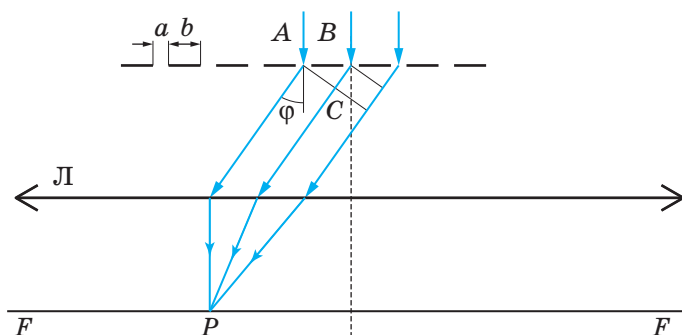


Рис. 4.14

Смысл названия «период» заключается в том, что дифракционную решётку можно построить, транслируя совокупность щелей и непрозрачной полосы в перпендикулярном





к ним направлении вправо и влево вдоль плоскости, в которой они расположены.

Дифракция света наблюдается на каждой из щелей. Параллельные лучи, прошедшие через разные щели и отклонившиеся на угол  $\varphi$ , собираются линзой  $L$  в её фокальной плоскости  $FF$  в точке  $P$ . Складываясь, они создают на экране интерференционную картину.

В точке  $P$  наблюдается максимум интенсивности света, если разность хода  $BC$  лучей, прошедших через две соседние щели  $A$  и  $B$ , составляет целое число длин волн. Поскольку щели, как и промежутки между ними, одинаковые, это условие выполняется для любой пары щелей и все лучи будут иметь в точке  $P$  одинаковые фазы колебаний.

**Условие максимума интенсивности** при дифракции света на дифракционной решётке (рис. 4.14):

$$d \sin \varphi = m \lambda, \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots), \quad (4.15)$$

где  $\varphi$  — угол отклонения луча от первоначального направления,

$d = a + b$  — период решётки,

$\lambda$  — длина волны света.

Эта формула показывает, что разным длинам волн  $\lambda$  соответствуют разные углы  $\varphi$ . Это позволяет использовать дифракционную решётку в качестве **спектрального прибора**.

Число  $m$  обозначает порядок спектра. Разложение света на спектр наблюдается в спектрах 1-го и более высоких порядков.

**Голография** — способ записи и воспроизведения объёмного изображения предметов, использующий явление дифракции света (см. Приложение 2).



## Единицы измерения

Период решётки и длина волны света измеряются в **метрах**:

$$[d] = [\lambda] = \text{м.}$$

1

Постоянная дифракционной решётки, установленной в спектрометре,  $d = 2$  мкм. Под каким углом к оси коллиматора следует установить зрительную трубу для наблюдения спектральной линии длиной волны  $\lambda = 410$  нм?



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Дифракционная решётка содержит  $N = 100$  штрихов на каждый  $l = 1$  мм её длины. Определить длину волны монохроматического света, падающего на решётку нормально, если угол между двумя спектрами первого порядка  $\alpha = 8^\circ$ .



Ответ: \_\_\_\_\_

3

Спектры дифракционной решётки второго и третьего порядков в видимой области спектра частично перекрываются. Какой длине волны в спектре третьего порядка соответствует  $\lambda = 700$  нм в спектре второго порядка?



Ответ: \_\_\_\_\_





## 4.4. Специальная теория относительности

Специальная теория относительности была создана в 1905 г. великим немецким физиком Альбертом Эйнштейном. Своё название она получила спустя десять лет, когда появилась общая теория относительности — теория гравитации, лежащая в основе космологии — науки о строении Вселенной.

В настоящем разделе мы рассмотрим некоторые вопросы **релятивистской механики**, в которой речь идёт о движении материальных тел и которая является частью специальной теории относительности (латинское слово *relativus* означает «относительный»). Полученные здесь результаты составляют рабочий инструмент современных разделов физики. В частности, зависимость массы тела от его скорости используется при проектировании ускорителей заряженных частиц, а связь массы и энергии — при расчётах ядерных реакторов, работающих на атомных электростанциях.



### 4.4.1. ПОСТУЛАТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

**Релятивистская механика** — раздел теории относительности, в котором рассматривается движение материальных тел.

**Инерциальная система отсчёта** — система отсчёта, относительно которой тело покоится или движется с постоянной скоростью, если сумма приложенных к нему сил равна нулю.



В основе специальной теории относительности лежат два принципа (или постулата):

1. **Принцип постоянства скорости света.** В любой инерциальной системе отсчёта скорость света имеет одно и то же значение.
2. **Принцип относительности Эйнштейна.** Все явления природы относительно любой инерциальной системы отсчёта протекают одинаковым образом и описываются одинаковыми законами.



#### 4.4.2. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ОДНОВРЕМЕННОСТИ И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАССТОЯНИЯ

В релятивистской механике рассматривается движение тела относительно неподвижной системы отсчёта  $K$  и относительно системы отсчёта  $K'$ , которая сама движется со скоростью  $V$  вдоль координатной оси  $X$  относительно системы отсчёта  $K$  (рис. 4.15).

Применение принципов теории относительности при рассмотрении событий позволяет сделать следующие заключения:

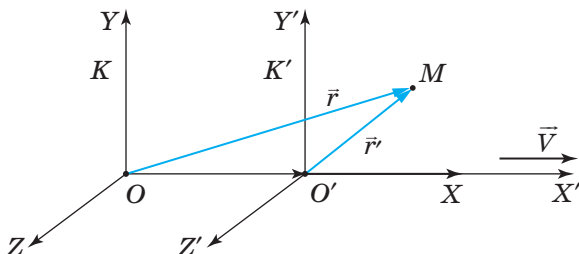


Рис. 4.15



- События, одновременные в неподвижной системе отсчёта  $K$ , не являются одновременными в движущейся системе  $K'$ .
- Длина тела в неподвижной системе отсчёта  $K$ , не совпадает с его длиной, взятой в направлении его движения, в системе отсчёта  $K'$ .



### 4.4.3. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЛОРЕНЦА

Принципы специальной теории относительности, лежащие в её основе, соблюдаются, если координаты тела и время в инерциальных системах отсчёта  $K$  и  $K'$  связаны уравнениями, называемыми **преобразованием Лоренца**:

$$\begin{aligned}x' &= \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - (V/c)^2}}, \\y' &= y, \quad z' = z, \\t' &= \frac{t - (V/c^2)x}{\sqrt{1 - (V/c)^2}},\end{aligned}\tag{4.16}$$

где  $x, y, z$  — координаты тела и время в системе отсчёта  $K$ ,  
 $x', y', z'$  — координаты тела и время в системе отсчёта  $K'$ ,  
 $V$  — скорость системы отсчёта  $K'$  относительно системы отсчёта  $K$ ,  
 $c$  — скорость света.

Формулы (4.16) теряют смысл при  $v \geq c$ . Поэтому никакое материальное тело не может двигаться со скоростью, большей скорости света.



### Единицы измерения

Численные значения координат указываются в **метрах**:

$$[x] = [x'] = \text{м.}$$

Скорость измеряется в **метрах в секунду**:

$$[V] = [c] = \text{м/с.}$$



### 4.4.4. ЗАКОН СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ

**Закон сложения скоростей** в классической механике:

$$v = u + V, \quad (4.17)$$

где  $v$  — скорость тела относительно системы отсчёта  $K$ ,  
 $u$  — скорость тела относительно системы отсчёта  $K'$ ,  
 $V$  — скорость, с которой система отсчёта  $K'$  движется относительно системы отсчёта  $K$  вдоль направления скорости тела  $v$ .

**Закон сложения скоростей** в релятивистской механике:

$$v = \frac{u + V}{1 + \frac{uV}{c^2}}. \quad (4.18)$$

Проверка уравнений (4.17) и (4.18) была осуществлена в эксперименте, поставленном в 1851 г. французским физиком Арманом Физо. Этот эксперимент решает следующий вопрос. В покоящейся жидкости свет распространяется с определённой скоростью  $u$ .

С какой скоростью он распространяется в жидкости, если она течёт в трубе в том же направлении со скоростью  $V$  (рис. 4.16)?



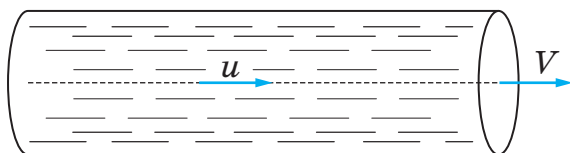


Рис. 4.16

Если предположить, что относительно жидкости свет распространяется всегда с одной и той же скоростью, независимо от того, движется она или неподвижна, то нам известны скорость света относительно жидкости  $u$  и скорость жидкости относительно трубы  $V$ . Требуется найти скорость света  $v$  относительно трубы.

Скорость света относительно трубы выразится либо уравнением (4.17), либо уравнением (4.18), в зависимости от того, соответствует действительности преобразование Галилея или преобразование Лоренца.

Эксперимент решает вопрос в пользу уравнения (4.18), полученного в теории относительности. Влияние скорости течения жидкости  $V$  на распространение света, согласно последним измерениям, выражается этим уравнением с ошибкой, меньшей 1 %.

Из формулы (4.18) следует, что скорость света в любой инерциальной системе отсчёта одинакова и равна  $c$ : полагая в ней  $u = c$ , найдём, что и  $v = c$ , что подтверждает 1-й принцип специальной теории относительности.

В случае малых скоростей ( $v \ll c$ ) эта формула переходит в формулу (4.17) классической механики.

1

Две нейтральные частицы, расстояние между которыми  $l = 10$  м, летят навстречу друг другу со скоростями





$v = 0,6 \cdot c$  ( $c$  — скорость света). Через сколько времени они встретятся?

Ответ: \_\_\_\_\_

2

На ракете, движущейся со скоростью  $V = 0,9 \cdot c$ , установлен ускоритель, сообщаящий частицам скорость  $u = 0,8 \cdot c$  относительно ракеты (по направлению её движения). Найти скорость  $v$  частиц в системе отсчёта, связанной с неподвижными звёздами. Решить задачу и для случая, когда частицы движутся в противоположную сторону.



Ответ: \_\_\_\_\_



#### 4.4.5. МАССА И ЭНЕРГИЯ В СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Классическая механика нуждается в модификации, чтобы быть в согласии с требованиями теории относительности. Это касается законов быстрых движений, когда скорости тел приближаются к скорости света. Такими телами являются электроны или ионы, движущиеся в ускорителях заряженных частиц, а также элементарные частицы, возникающие при делении атомных ядер. Отклонения от законов классической механики в других случаях слишком малы, чтобы их можно было заметить практически.







**Энергия тела**, движущегося со скоростью  $v$ :

$$W = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad (4.19)$$

где  $m$  — масса тела,  
 $c$  — скорость света.

Это выражение становится бесконечным, когда скорость тела  $v$  приближается к скорости света. Следовательно, скорость любого тела будет оставаться меньшей скорости света, как бы велика ни была энергия, затраченная на его ускорение.

**Энергия покоящегося тела** массой  $m$ :

$$W = mc^2. \quad (4.20)$$

Эта формула называется **формулой Эйнштейна**. Она связывает энергию тела с её массой. Из неё следует, что «исчезновение» массы должно сопровождаться «выделением» энергии — вещество может превращаться в энергию. Пример исчезновения массы — аннигиляция электрона и позитрона. Позитрон — это электрон с положительным зарядом. При столкновении они превращаются в два рентгеновских фотона.

В силу того, что  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с — очень большая величина, «запас» энергии в веществе огромен. Однако полностью превратить вещество в энергию невозможно. Существует основанный на опыте закон, согласно которому общее количество протонов и нейтронов, из которых построены ядра атомов, не может изменяться — они не могут исчезать, превращаясь в энергию.

Уменьшение массы наблюдается при распаде ядер атомов радиоактивных элементов, который сопровождается выделением большого количества энергии в виде



кинетической энергии продуктов деления — ядер более лёгких элементов. Суммарная их масса меньше массы исходного ядра на величину  $\Delta m$ , называемую **дефектом массы**.

**Энергия**, выделяемая при распаде ядер атомов радиоактивных элементов:

$$\Delta W = \Delta m \cdot c^2, \quad (4.21)$$

где  $\Delta m$  — разность между массой исходного ядра и массой ядер продуктов деления.

### Единицы измерения

Масса измеряется в **килограммах**:

$$[m] = \text{кг}.$$

Энергия измеряется в **джоулях**:

$$[W] = \text{Дж}.$$

1

Найти скорость электрона  $v$ , если его полная энергия в  $n = 10$  раз больше энергии покоя:  $W = nW_0$ .

Ответ: \_\_\_\_\_



2

При делении ядра урана  $^{235}\text{U}$  освобождается энергия  $W = 200$  МэВ. Найти уменьшение массы вещества  $\Delta m$ , происходящее при делении 1 киломоля урана.

Ответ: \_\_\_\_\_





3

Солнце ежеминутно излучает энергию  $W_0 = 6,5 \cdot 10^{21}$  кВт·ч. Считая излучение Солнца постоянным, найти, за какое время  $\Delta t$  его масса  $M_0 = 1,97 \cdot 10^{30}$  кг уменьшится в  $n = 2$  раза?



Ответ: \_\_\_\_\_



#### 4.4.6. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА И ЭНЕРГИИ

В теории относительности определение кинетической энергии совпадает с классическим: кинетическая энергия — это энергия, обусловленная движением тела. Её можно найти, вычитая из полной энергии (4.19) энергию покоя (4.20).

**Кинетическая энергия** тела:

$$K = \left( \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \right) mc^2, \quad (4.22)$$

где  $m$  — масса тела,  
 $v$  — его скорость.

**Импульс** тела:

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (4.23)$$

Закон сохранения импульса и закон сохранения энергии перестают быть независимыми и объединяются в единый **закон сохранения импульса и энергии**.

**Закон сохранения импульса и энергии:**

$$W^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4, \quad (4.24)$$



где  $W$  — энергия тела,  
 $p$  — его импульс,  
 $c$  — скорость света.

Эта формула справедлива для отдельного тела и связывает его энергию  $W$ , импульс  $p$  и массу  $m$ .

### Единицы измерения

Единица измерения импульса:

$$[p] = \text{кг} \cdot \text{м/с}.$$





## 5. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Слово **квант** означает — неделимая порция. Представление о квантах заряда оказалось естественным после открытия электрона — носителя элементарного заряда, не подвергающегося делению на более мелкие части. Неделимой порцией вещества естественно было считать массу атома водорода — самого легкого из существующих в природе вещества.

На рубеже XIX и XX веков появилась теория, описывающая свойства теплового излучения, исходящего от нагретых тел. Её создатель — немецкий физик Макс Планк — предположил, что энергия этого излучения складывается из энергии отдельных частиц, которые впоследствии были названы **фотонами**. Это позволило объяснить ряд явлений, открытых экспериментально — эффект Комптона, тормозное рентгеновское излучение, фотоэффект. Они составили предмет **квантовой оптики**, рассматривающей свет как поток частиц. Такое представление о свете существовало в науке со времён И. Ньютона и было отвергнуто в начале XIX века благодаря успехам волновой теории О. Френеля.

**Квантовая физика** — раздел физики, в котором рассматривается поведение микрочастиц.

**Микрочастицы** в квантовой физике — электроны, протоны, нейтроны и другие элементарные частицы.

**Квантовомеханическая система** — атом, молекула, кристалл — объекты исследования квантовой физики.



## 5.1. ФОТОНЫ

Частицы света — **фотоны** — признаны в физике реальными частицами, поскольку с их помощью можно объяснить явления, связанные с взаимодействием света с веществом. Это — **тормозное рентгеновское излучение**, возникающее при бомбардировке поверхности металла быстрыми электронами, **эффект Комптона**, заключающийся в изменении частоты рентгеновского излучения при рассеянии его на свободных электронах, **фотоэффект**.



### 5.1.1. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

**Фотоэлектрический эффект** — вырывание электронов с поверхности твёрдых тел под действием света.

**Уравнение Эйнштейна** для фотоэффекта:

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}, \quad (5.1)$$

где  $\nu$  — частота падающего света,  
 $A$  — работа выхода электрона из вещества,  
 $m$  — масса электрона,  
 $v_{\max}$  — его скорость,  
 $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж · с — постоянная Планка.

**Работа выхода** — минимальная энергия, необходимая для извлечения электрона из вещества.

Схема экспериментальной установки для изучения свойств фотоэффекта приведена на рис. 5.1. Она состоит из откачанного стеклянного сосуда с двумя плоскими металлическими электродами, соединёнными



с источником тока. На отрицательный электрод — катод — направляется пучок света, в результате чего в цепи возникает электрический ток — **фототок**, измеряемый микроамперметром. Силу тока  $i$  можно регулировать, изменяя приложенное к электродам напряжение  $U$ . Частоту  $\nu$  и интенсивность света  $I$  можно изменять с помощью светофильтров и диафрагмы, расположенных на его пути.

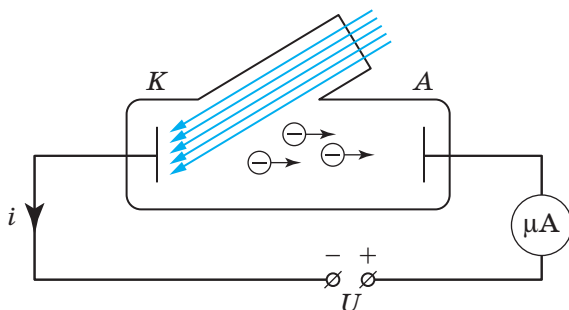


Рис. 5.1

Зависимость фототока от приложенного напряжения представлена на рис. 5.2.

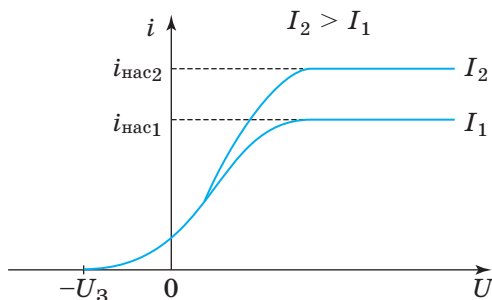


Рис. 5.2



С увеличением напряжения ток в цепи возрастает и достигает постоянного значения, называемого **током насыщения**  $i_{\text{нас}}$ , когда все электроны, покидающие катод под действием света (их называют **фотоэлектронами**), попадают на анод.

**Задерживающее напряжение  $U_3$**  — напряжение обратного знака, которое нужно приложить к аноду, чтобы прекратить фототок.

В этом случае  $\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = eU_3$  и уравнение (5.1) можно записать в виде:

$$h\nu = A + eU_3, \quad (5.2)$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл — заряд электрона.

**Скорость фотоэлектронов:**

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2}{m}(h\nu - A)}. \quad (5.3)$$

**Закономерности фотоэффекта:**

- безынерционность — ток в цепи возникает сразу после включения лампы, освещающей катод;
- ток насыщения  $i_{\text{нас}}$  пропорционален интенсивности падающего света  $I$ :

$$i_{\text{нас}} \sim I;$$

- скорость фотоэлектронов зависит только от частоты падающего света и не зависит от его интенсивности;
- фотоэффект наблюдается при частотах света  $\nu$ , превышающих минимальное значение  $\nu_{\text{min}}$ , называемое **красной границей фотоэффекта**:

$$\nu > \nu_{\text{min}} = \frac{A}{h}. \quad (5.4)$$







Закономерности фотоэффекта нельзя объяснить, используя волновую точку зрения на природу света. В частности, повышение интенсивности света равносильно увеличению амплитуды волны и должно приводить к росту скорости фотоэлектронов, чего в действительности не наблюдается.

Фотоэффект демонстрирует корпускулярные свойства света, подтверждая гипотезу о световых квантах, выдвинутую М. Планком для объяснения законов теплового излучения.

### Единицы измерения

Работа выхода измеряется в **джоулях**:

$$[A] = \text{Дж.}$$

Частота света измеряется в **герцах**:

$$[\nu] = \text{Гц.}$$

Масса электрона измеряется в **килограммах**:

$$[m] = \text{кг.}$$

Задерживающее напряжение измеряется в **вольтах**:

$$[U_3] = \text{В.}$$

1

Красная граница фотоэффекта для ртути  $\lambda_{\text{max}} = 275 \text{ нм}$ . Найти работу выхода  $A$  электрона и максимальную скорость  $v_{\text{max}}$  электронов, вырываемых из ртути светом с длиной волны  $\lambda = 180 \text{ нм}$ .



Ответ: \_\_\_\_\_



2

Определить постоянную Планка, если известно, что фотоэлектроны, вырывающиеся с поверхности некоторого металла светом частотой  $\nu_1 = 2,2 \cdot 10^{15}$  Гц, полностью задерживаются напряжением  $U_{31} = 6,6$  В, а вырывающиеся светом, частота которого  $\nu_2 = 4,6 \cdot 10^{15}$  Гц, — напряжением  $U_{32} = 16,5$  В.



Ответ: \_\_\_\_\_

3

Никелевый фотокатод освещается светом с длиной волны  $\lambda = 200$  нм. Покидающие его электроны попадают в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 10^{-4}$  Тл перпендикулярно его силовым линиям. Каков максимальный радиус окружности  $R$ , по которой движутся электроны? Красная граница фотоэффекта для никеля  $\lambda_{\max} = 248$  нм.



Ответ: \_\_\_\_\_



## 5.1.2. ФОТОНЫ

**Фотон** — частица света, существующая только в движении, скорость которого равна скорости света.

**Энергия фотона:**

$$W_{\text{ф}} = h\nu, \quad (5.5)$$

где  $\nu$  — частота света, представляемого этим фотоном,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж · с — постоянная Планка.



### Импульс фотона:

$$p_{\Phi} = \frac{W_{\Phi}}{c} = \frac{h}{\lambda}, \quad (5.6)$$

где  $\lambda$  — длина волны света,  
 $c$  — скорость света.

**Рентгеновское излучение** — электромагнитное излучение с длинами волн от 0,01 до 0,1 нм.

В 1895 г. немецким физиком Вильгельмом Конрадом Рентгеном было открыто излучение, невидимое человеческому глазу и обладающее большой проникающей способностью. Оно возникает при торможении пучка быстрых электронов на поверхности металла, отчего получило название **тормозного рентгеновского излучения**.

**Источник рентгеновского излучения** — рентгеновская трубка — откачанный стеклянный сосуд с электродами, к которым приложено высокое напряжение (рис. 5.3).

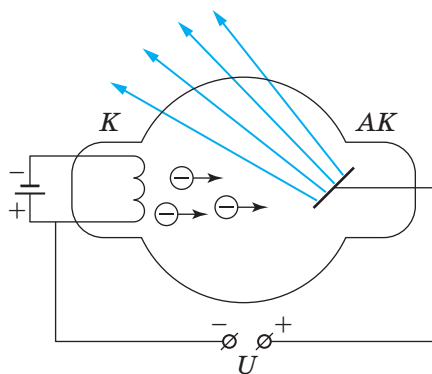


Рис. 5.3

Отрицательный электрод трубки — **катод К**, изготовленный в виде спирали из вольфрама, — нагревается электрическим током от отдельного источника. Электроны, испущенные накалившимся катодом, ускоряются электрическим полем, созданным источником высокого напряжения. Попадая на анод — **антикатод АК**, — они резко тормозятся.

Согласно теории Максвелла, заряженные частицы, движущиеся ускоренно, излучают электромагнитные волны. Поэтому в результате торможения электронов возникают рентгеновские лучи. Кривые зависимости их интенсивности  $I$  от длины волны  $\lambda$  при двух значениях ускоряющего напряжения  $U$  приведены на рис. 5.4.

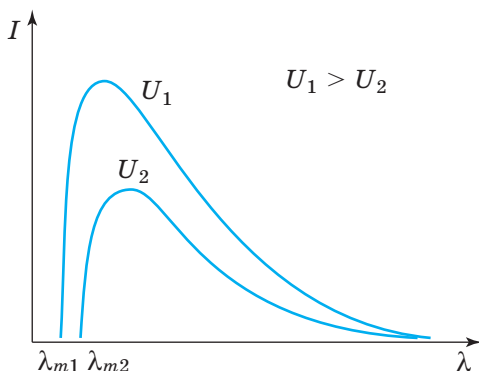


Рис. 5.4

В области коротких волн кривые круто спадают вниз, обозначая на оси абсцисс минимальную длину волны  $\lambda_{\min}$ , соответствующую данной величине  $U$ . Существование этой граничной длины волны рентгеновских лучей можно объяснить в рамках корпускулярных представлений об их природе.



Испускание рентгеновских лучей — процесс, обратный фотоэффекту. В уравнении (5.2)  $U_3$  играет теперь роль **ускоряющего напряжения  $U$** . Поскольку величина его составляет десятки киловольт,  $eU_3 \gg A$  и работой выхода  $A$  в этом уравнении можно пренебречь. Тогда

$$h\nu_{\max} = eU.$$

Смысл этого уравнения состоит в том, что энергия  $eU$ , которую приобрёл электрон, пройдя разность потенциалов  $U$ , передаётся излучаемому при его торможении фотону, энергия которого  $h\nu_{\max}$ .

Выразив частоту рентгеновских лучей через их длину волны, найдём:

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{\nu_{\max}} = \frac{ch}{eU}. \quad (5.7)$$

Экспериментально установлено, что произведение минимальной длины волны рентгеновских лучей  $\lambda_{\min}$  на ускоряющее напряжение остаётся постоянным при любом  $U$ :

$$\lambda_{\min} U = \text{const}.$$

Сравнивая это уравнение с (5.7), получим  $\lambda_{\min} U = \frac{ch}{e}$ ,

откуда, измерив на опыте  $U$  и  $\lambda_{\min}$ , можно найти численное значение постоянной Планка:

$$h = \frac{eU}{c} \lambda_{\min}.$$

Этот способ определения постоянной Планка считается самым точным из всех известных.



## Единицы измерения

Длина волны рентгеновского излучения измеряется в **нанометрах**:

$$[\lambda] = \text{нм}, (1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}).$$

1

Полагая среднюю длину волны излучения лампочки накаливания  $\lambda = 1,2 \text{ мкм}$ , найти число фотонов  $N$ , испускаемых каждую секунду лампочкой мощностью  $P = 200 \text{ Вт}$ .



Ответ: \_\_\_\_\_

2

С какой скоростью  $v$  должен двигаться электрон, чтобы его кинетическая энергия  $K$  была равна энергии фотона, которому соответствует длина волны  $\lambda = 500 \text{ нм}$ ?



Ответ: \_\_\_\_\_

3

Под каким напряжением работает рентгеновская трубка, если самые короткие лучи в рентгеновском спектре этой трубки имеют частоту  $\nu_{\text{max}} = 10^{19} \text{ Гц}$ ?



Ответ: \_\_\_\_\_





### 5.1.3. ДАВЛЕНИЕ СВЕТА С КОРПУСКУЛЯРНОЙ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ

Одно из экспериментальных подтверждений наличия у фотонов импульса — существование светового давления, рассмотренного нами с волновой точки зрения в 3.54. С квантовой точки зрения давление света на поверхность тела обусловлено соударением с ней фотонов, которые передают ей свой импульс.

**Давление** — сила  $F$ , действующая на единичную площадку  $S$  перпендикулярно ей:

$$p = \frac{F}{S}. \quad (5.8)$$

**Давление света:**

$$p = w(1 + \rho), \quad (5.9)$$

где  $w = \frac{W}{V}$  — энергия падающих на поверхность тела фотонов, заключённых в единице объёма пространства, заполненного излучением (рис. 5.5),

$\rho$  — коэффициент отражения света от его поверхности.

**Коэффициент отражения света** — отношение числа фотонов  $N_{\text{отр}}$ , отражённых от поверхности, к числу падающих на неё фотонов  $N$ :

$$\rho = \frac{N_{\text{отр}}}{N}.$$

Для полностью поглощающего тела  $\rho = 0$ , для полностью отражающего —  $\rho = 1$ .

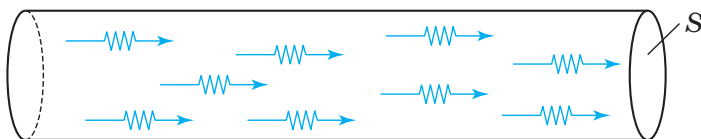


Рис. 5.5

Рассмотренные здесь и в разделе «Оптика» явления показывают двойственную природу света. Имеет место **корпускулярно-волновой дуализм** (двойственность) свойств электромагнитного излучения (табл. 5.1). Ниже мы увидим, что волновую природу могут проявлять и микрочастицы. Корпускулярно-волновой дуализм — общее свойство материи, существующей в виде вещества и в виде поля.

Таблица 5.1

Электромагнитное излучение	Энергия	Импульс
Волны (интерференция, дифракция)	$W = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2}$	$p = \frac{W}{c}$
Частицы (фотоэффект, эффект Комптона, тормозное рентгеновское излучение)	$W_\phi = h\nu$	$p_\phi = \frac{h\nu}{c}$







## Единицы измерения

Давление измеряется в **паскалях**:

$$[p] = \text{Па} = \text{Н/м}^2.$$

Объёмная плотность энергии измеряется в **джоулях на кубический метр**:

$$[w] = \text{Дж/м}^3.$$

1

Кванты света с энергией  $W_{\text{ф}} = 4,9$  эВ вырывают фотоэлектроны из металла с работой выхода  $A = 4,5$  эВ. Найти максимальный импульс  $p_{\text{max}}$ , передаваемый поверхности металла при вылете каждого электрона.



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Во сколько раз отличается давление света, производимое на идеально белую поверхность, от давления на идеально чёрную при прочих равных условиях?



Ответ: \_\_\_\_\_

## 5.2. Строение атома

Оптические явления, рассмотренные в предыдущих разделах, показывают двойственную природу света, проявляющего себя в виде волны или в виде потока частиц света — фотонов. Электромагнитное излучение, одним



из видов которого является видимый свет, порождается, как следует из электродинамики, заряженными частицами, движущимися с ускорением. Возникновение же фотонов как сгустков электромагнитного излучения в рамках этой теории не может быть объяснено. Естественно предположить, что фотоны испускаются атомами вещества в момент изменения их энергетического состояния. Механизм этого процесса стал понятен после того, как Э. Резерфорд в 1911 г. опытным путём установил строение атома, а Н. Бор вслед за ним построил элементарную теорию атома, которая описывала спектр излучения простейшего из них — атома водорода. Успех теории Бора открыл новое направление в исследовании свойств микромира, наилучшим образом проявляющихся в оптических явлениях, которые и дали человеку ключ к разгадке строения вещества.



### 5.2.1. ОПЫТЫ ПО РАССЕЯНИЮ $\alpha$ -ЧАСТИЦ ВЕЩЕСТВОМ

**Атом** — мельчайшая частица вещества, входящая в состав молекул и твёрдых тел.

**Электрон** — элементарная частица, входящая в состав атомов, несущая отрицательный элементарный заряд.

**Протон** — ядро атома водорода — элементарная частица, существующая в ядрах атомов, имеющая положительный заряд, равный заряду электрона, и массу, в 1840 раз большую.

**Нейтрон** — частица, аналогичная протону, не имеющая заряда.

**Альфа-частица** — ядро атома гелия — частица, состоящая из двух протонов и двух нейтронов.



В 1897 г. Дж. Дж. Томсон открыл существование электрона, входящего в состав атомов. Э. Резерфорд с сотрудниками провел эксперимент, позволивший установить строение атома. Они поместили тонкую металлическую фольгу на пути узкого пучка  $\alpha$ -частиц, источником которых служил радиоактивный препарат (рис. 5.6).

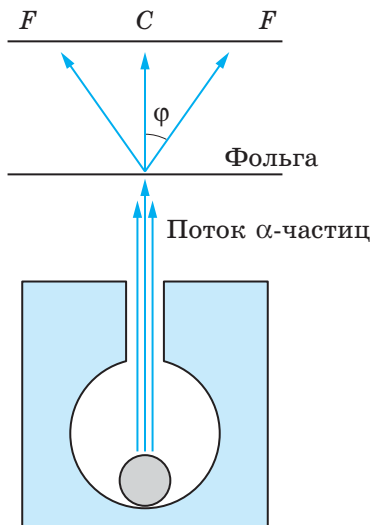


Рис. 5.6

Оказалось, что некоторые из частиц отклоняются от прямолинейного пути на значительный угол  $\varphi$  так, как будто встречаются с тяжёлыми рассеивающими центрами очень малых размеров. Обработка результатов наблюдений позволила установить, что этими центрами являются положительно заряженные ядра атомов, размеры которых примерно в  $10^5$  раз меньше размера самого атома. Атом представляет собой по существу пустое



пространство с крошечным ядром, сосредоточивающим в себе практически всю его массу. Если земной шар принять за атом, то его ядро будет размером с большой многоэтажный дом.

Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов, которые объединяются общим названием — **нуклоны**. Состав ядер был неизвестен до начала 30-х годов прошлого века — времени открытия нейтрона.

Тяжёлое, положительно заряженное ядро и электроны, окружающие его, — суть модели атома, предложенной Резерфордом на основании опытов. Эта модель послужила основой теории водородоподобного атома, развитой вскоре после её появления датским физиком Нильсом Бором.



### 5.2.2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ В СПЕКТРЕ ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА

**Спектр излучения** — совокупность лучей света разных длин волн, зависящих от свойств источника.

**Линейчатый спектр** — спектр, состоящий из отдельных линий.

**Спектральная серия** — совокупность линий, объединяющихся в группы, сходные друг с другом по своему строению.

Атомы простых веществ излучают линейчатые спектры. В частности, спектр простейшего элемента — водорода — состоит из пяти спектральных серий — спектральные линии в них сгущаются к одному и тому же краю





каждой группы (рис. 5.7). Частоты линий спектра водорода  $\nu_{ik}$  описываются формулой, предложенной Бальмером.



Рис. 5.7

**Формула Бальмера** для частот линий спектра атома водорода:

$$\nu_{ik} = R \left( \frac{1}{i^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (5.10)$$

где  $\nu_{ik}$  — частоты, излучаемые атомом,  
 $i, k$  — целые числа ( $k > i$ ),

$R = 3,3 \cdot 10^{15}$  Гц — постоянная Ридберга.

Совокупность линий, образующих первую серию — **серию Лаймана**, — соответствует числам  $i = 1, k = 2, 3, 4, \dots$  и расположена в ультрафиолетовой области спектра. Далее идут:

$i = 2, k = 3, 4, 5, \dots$  **серия Бальмера**,

$i = 3, k = 4, 5, 6, \dots$  **серия Пашена**,

$i = 4, k = 5, 6, 7, \dots$  **серия Брэкетта**,

$i = 5, k = 6, 7, 8, \dots$  **серия Пфунда**.

Видимый глазом человека диапазон частот занимает серия Бальмера, остальные три серии принадлежат инфракрасной части спектра.

Столь простой формулы, как (5.10), описывающей спектр излучения какого-либо другого вещества, найти не удалось. Формула Бальмера навела Н. Бора на

мысль построить теорию, в которой она получила бы физическое обоснование, а не являлась результатом чудесного прозрения ученого, которому удалось языком цифр описать замечательную закономерность, которую природа как бы специально подарила человеку, осветив ему путь дальнейших исследований.

## Единицы измерения

Частота измеряется в **герцах**:

$$[\nu_{ik}] = \Gamma_{\text{ц}} = \text{с}^{-1}.$$

1

Во сколько раз длина волны излучения атома водорода при переходе электрона с третьей орбиты на вторую больше длины волны, обусловленной переходом электрона со второй орбиты на первую?



Ответ: \_\_\_\_\_



### 5.2.3. ТЕОРИЯ БОРА ВОДОРОДОПОДОБНОГО АТОМА

**Водородоподобный атом** — атом, лишённый всех электронов, кроме одного.

Согласно модели, предложенной Резерфордом, атом вещества, имеющего в таблице Менделеева порядковый номер  $Z$ , состоит из положительного ядра с зарядом  $Ze$  ( $e$  — заряд электрона) и окружающих его  $Z$  электронов, несущих отрицательный заряд той же величины, так что атом в целом электронейтрален. Атом водорода ( $Z = 1$ ) имеет в своём составе один протон и один электрон,



движущийся по круговой орбите вокруг протона — ядра атома (рис. 5.8).

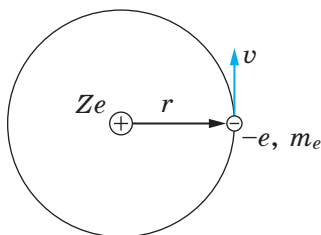


Рис. 5.8

Водородоподобными атомами могут служить ионы гелия  $\text{He}^+$ , лития  $\text{Li}^{++}$ , бериллия  $\text{Be}^{+++}$ ...

**Теория Бора** основана на двух постулатах:

1. Атом может длительное время находиться в определённых **стационарных состояниях**, в которых его энергия принимает дискретный ряд значений  $W_1, W_2, W_3, \dots$ .
2. При переходе из стационарного состояния с энергией  $W_i$  в состояние с энергией  $W_k$  атом излучает или поглощает фотон, энергия которого  $W_\Phi = h\nu_{ik}$  равна их разности:

$$h\nu_{ik} = W_i - W_k. \quad (5.11)$$

Это соотношение называется **правилом частот Бора**.

**Стационарные состояния** — состояния атома, в которых он не излучает и не поглощает энергию.

Изменение энергии атома обусловлено переходом его электрона с одной стационарной орбиты на другую (рис. 5.9).



Рис. 5.9

**Момент импульса** электрона:

$$L = p \cdot r, \quad (5.12)$$

где  $p = m_e v$  — его импульс,  
 $r$  — радиус орбиты, по которой он движется,  
 $m_e$  — масса электрона.

На  $n$ -й орбите момент импульса электрона

$$L = n \cdot \frac{h}{2\pi}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (5.13)$$







Число  $n$  в теории Бора обозначает номер орбиты и называется **квантовым числом**.

**Радиус орбиты** электрона:

$$r_n = \frac{h^2}{4\pi^2 Ze^2 m_e k_0} \cdot n^2, \quad (5.14)$$

где  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$  — коэффициент пропорциональности в законе Кулона,  
 $e$  — заряд электрона.

**Скорость** электрона на орбите:

$$v_n = k_0 \frac{2\pi Ze^2}{h} \cdot \frac{1}{n}. \quad (5.15)$$

**Полная энергия** электрона в стационарном состоянии, характеризуемом квантовым числом  $n$ :

$$W_n = -k_0^2 \frac{2\pi^2 Z^2 e^4 m_e}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (5.16)$$

Схема расположения этих уровней энергии, отмеченных горизонтальными прямыми, приведена на рис. 5.9 (с. 223).

Переходы электрона со всех более высоких уровней на первый уровень соответствуют **серии Лаймана**, на второй уровень — **серии Бальмера** и т. д.

Верхний уровень, обозначенный пунктиром, соответствует энергии свободного электрона, когда он покидает атом (при  $n \rightarrow \infty$ ). Разность энергий между ним и нижним уровнем равна **энергии ионизации атома**:

$$W_{\text{ион}} = W_{\infty} - W_1.$$

Для водорода она составляет 13,6 эВ.



Формула (5.11) после деления на  $h$  и подстановки туда (5.16) приобретает вид, аналогичный формуле Бальмера (5.10) для частот света, излучаемого атомом:

$$\nu_{ik} = k_0^2 \frac{2\pi^2 Z^2 e^4 m_e}{h^3} \cdot \left( \frac{1}{i^2} - \frac{1}{k^2} \right).$$

Сравнение их позволяет записать выражение для постоянной Ридберга.

**Постоянная Ридберга:**

$$R = k_0^2 \frac{2\pi^2 Z^2 e^4 m_e}{h^3}. \quad (5.17)$$

Численное её значение  $R = 3,289842 \cdot 10^{15}$  Гц совпадает с экспериментальным значением  $R_{\text{эксп}}$  с относительной погрешностью

$$\frac{|R - R_{\text{эксп}}|}{R} = 4,6 \cdot 10^{-6}.$$

Замечательное совпадение с экспериментом свидетельствовало об успехе теории Бора, которая показала, что в масштабах атома действуют законы, отличные от классических. Но это была полуклассическая теория, касающаяся лишь атома водорода, не применимая к более сложным атомам. Она использовала представление об электроны как о частице, имеющей определённую скорость и определённые координаты, — представление, которое в квантовой механике оказалось несостоятельным. Классической физике противоречило и отсутствие излучения, порождаемого электроном, движущимся по орбитам, на которых он может находиться длительное время. Противоречия эти были устранены в новой — созданной позже — физике микромира, путеводной звездой которой послужила теория Бора. Она заложила





идейные основы квантовой механики, характерной особенностью которой является дискретность физических величин. Правило частот Бора (5.11) квантовая механика использует как свой рабочий инструмент.

### Единицы измерения

Энергия электрона измеряется в **джоулях**:

$$[W_i] = \text{Дж.}$$

Единица измерения момента импульса — **джоуль-секунда**:

$$[L] = \text{Дж} \cdot \text{с.}$$

1

При переходе электрона атома водорода с одной орбиты на другую, более близкую к ядру, энергия атома уменьшается на  $\Delta W = 1,982$  эВ. При этом атом водорода излучает квант света. Определить длину волны излучения.



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Какую наименьшую энергию (в электронвольтах) должны иметь электроны, чтобы при возбуждении атомов водорода ударами этих электронов спектр водорода имел три спектральные линии? Найти длины волн этих линий.



Ответ: \_\_\_\_\_

## 5.3. Корпускулярно-волновой дуализм свойств микрочастиц

Оптические явления, относящиеся к волновой и квантовой оптике, свидетельствуют о двойственной природе света. Дифракция и интерференция объясняются его волновой природой, излучение и взаимодействие с веществом находят объяснение, если считать поток лучистой энергии состоящим из отдельных частиц — фотонов.

Успех боровской теории атома водорода заставил признать, что микрочастицы, например электроны, нельзя считать частицами вещества в классическом понимании — внутри атома энергия электрона может принимать только дискретный ряд значений, а движение его по стационарным орбитам не сопровождается излучением электромагнитных волн, требуемым законами классической электродинамики. Разрешение этих противоречий было найдено в созданной в 1926 г. **квантовой механике** — теории, описывающей поведение микрочастиц. Её возникновению предшествовало появление гипотезы де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме (двойственности) свойств микрочастиц, нашедшей подтверждение в теории и в экспериментах.



### 5.3.1. ГИПОТЕЗА ДЕ БРОЙЛЯ

**Длина волны де Бройля** частицы:

$$\lambda_{\text{Б}} = \frac{h}{p}, \quad (5.18)$$

где  $p = mv$  — импульс частицы,  
 $h$  — постоянная Планка.



В 1923 г. французский физик Луи де Бройль выдвинул смелую гипотезу, согласно которой движущаяся материальная частица может рассматриваться как волна, имеющая длину, выражаемую уравнением (5.18). Она называется **длиной волны де Бройля**.

Согласно теории Бора электрон в атоме может длительное время пребывать на круговых стационарных орбитах радиусами

$$r_n = \frac{h^2 n^2}{4\pi^2 Z e^2 m_e k_0},$$

имея скорость

$$v_n = k_0 \frac{2\pi Z e^2}{nh}.$$

Разделив длину окружности  $2\pi r_n$  на длину волны де Бройля  $\lambda_B = \frac{h}{m_e v_n}$ , получим целое число:

$$\frac{2\pi r_n}{\lambda_B} = n.$$

Это значит, что на  $n$ -й орбите укладывается целое число волн де Бройля — на орбите как бы существует стоячая волна, которая не переносит энергию (рис. 5.10). В этом де Бройль увидел подтверждение правильности своей гипотезы.

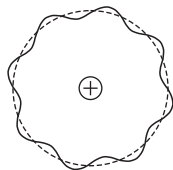


Рис. 5.10

Длина волны де Бройля электрона в атоме соизмерима с размером атома и составляет десятые доли нанометра. Таков же порядок величины длин волн рентгеновских лучей ( $\lambda_p \sim 0,01 \dots 0,1$  нм).

Микрочастицы вещества, встречающиеся в повседневной жизни, свои волновые свойства не проявляют,



и речь может идти только об электронах, протонах или нейтронах, входящих в состав атомов, где согласно теории Бора законы классической физики приходят в противоречие с опытом.

### Единицы измерения

Длина волны де Бройля измеряется в **нанометрах**:

$$[\lambda_B] = \text{нм}, (1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}).$$

1

Найти длину волны де Бройля электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов  $U = 100 \text{ В}$ . Во сколько раз она отличается от длины волны де Бройля протона, прошедшего ту же разность потенциалов?



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Вычислить кинетическую энергию молекулы кислорода, если её длина волны де Бройля  $\lambda_B = 100 \text{ пм}$ .



Ответ: \_\_\_\_\_



### 5.3.2. ОПЫТЫ ДЭВИССОНА И ДЖЕРМЕРА ПО ОБОСНОВАНИЮ КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОГО ДУАЛИЗМА СВОЙСТВ МИКРОЧАСТИЦ

Гипотеза де Бройля о волновой природе вещества была проверена в 1927 г. американскими физиками К. Дэвиссоном и Л. Джермером в экспериментах по рассеянию





электронов на поверхности металлов. Было установлено, что при отражении электронных пучков от металлов наблюдается отклонение от той картины, которую предсказывает классическая теория: число электронов, отражённых в некоторых направлениях, оказывается больше, а в других — меньше, чем следовало ожидать в случае зеркального их отражения от плоской поверхности. Картина очень напоминала отражение рентгеновских лучей от кристаллографических плоскостей, которое позволило установить их волновую природу.

Опыты Дэвиссона и Джермера явились экспериментальным доказательством существования волн вещества. Длина волны электронов, ускоренных напряжением  $U = 10\,000\text{ В}$ , лежит в области длин волн жёстких рентгеновских лучей ( $\lambda_{\text{Б}} = 0,01\text{ нм}$ ). Поэтому пучки таких электронов можно использовать при изучении структуры различных материалов.

**Корпускулярно-волновой дуализм** свойств микрочастиц — двойственная природа материальных частиц, проявляющаяся в том, что движущуюся частицу можно рассматривать как волну де Бройля.

**Явление дифракции электронов** — отражение пучка электронов от поверхности кристалла, показывающее сходство его с пучком рентгеновских лучей.

**Условие максимумов** интенсивности рентгеновских лучей, отражённых от поверхности кристалла:

$$2d \sin \theta_k = k\lambda, \quad (k = 1, 2, 3, \dots), \quad (5.19)$$

где  $d$  — расстояние между кристаллографическими плоскостями (рис. 5.11),

$\theta$  — угол между лучом и поверхностью кристалла,

$\lambda$  — длина волны.

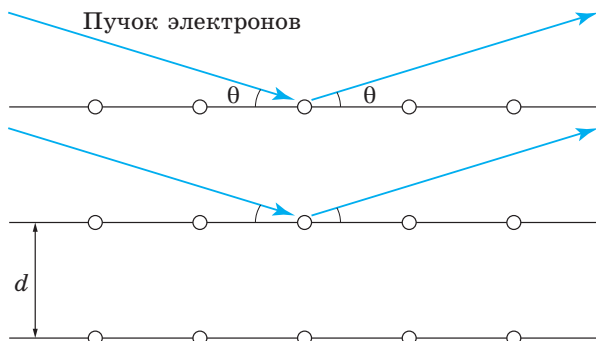


Рис. 5.11

**Микрочастицы** — частицы, длина волны де Бройля которых соизмерима с размерами атома.

### Единицы измерения

Расстояние  $d$  и длина волны рентгеновских лучей измеряются в **нанометрах**:

$$[d] = [\lambda] = \text{нм}.$$



### 5.3.3. СООТНОШЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЕЙ ГЕЙЗЕНБЕРГА

Двойственная природа материи присуща как свету, так и веществу. Она накладывает определённые ограничения на способ математического описания поведения частиц вещества, которые называются микрочастицами. Мелкие материальные частицы, состоящие из огромного количества атомов или молекул, как показывает расчёт, не проявляют волновых







свойств. Частицы же, входящие в состав атомов — электроны, протоны или нейтроны, как и сами атомы, — не могут рассматриваться лишь с корпускулярной точки зрения, поскольку присущие им длины волн де Бройля — в атомах, молекулах или кристаллах — сравнимы с размерами атомов или расстояниями между атомами в твёрдых телах.

Говоря о частице в классическом смысле, мы должны охарактеризовать её состояние, указав её координаты и скорость (или импульс). Поскольку физика — наука экспериментальная, нужно иметь способ измерения этих величин. Для микрочастиц существует предел точности, с которой можно одновременно указать значения их координат и импульсов, связанный с процессом их измерения. Трудности технического характера, обусловленные возмущением, вносимым при измерении, перерастают в принципиальные.

Немецкий физик Вернер Гейзенберг сформулировал соотношения между погрешностями измерения координат микрочастицы  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  и погрешностями измерения компонент её импульса  $\Delta p_x$ ,  $\Delta p_y$ ,  $\Delta p_z$ .

**Соотношения неопределённостей Гейзенберга:**

$$\begin{aligned}\Delta x \cdot \Delta p_x &\geq h, \\ \Delta y \cdot \Delta p_y &\geq h, \\ \Delta z \cdot \Delta p_z &\geq h,\end{aligned}\tag{5.20}$$

где  $h$  — постоянная Планка.

Согласно им, постоянная Планка устанавливает предел точности одновременного измерения координат и импульса частицы. Чем точнее мы хотим определить координаты частицы, тем меньше имеем информации о её скорости, и наоборот — чем выше точность определения

скорости, тем неопределённое положение частицы в пространстве ( $\Delta\vec{p} = m\Delta\vec{v}$ ).

Для определения координат и импульса электрона следует использовать фотон с длиной волны  $\lambda$ . При этом, чем меньше  $\lambda$ , тем точнее определяются координаты электрона. С другой стороны, фотон рассеивается на электроне (эффект Комптона), который получает дополнительный импульс, и его скорость становится неопределённой. Таким образом, невозможно одновременно измерить координаты и импульс электрона.

Микрочастицами являются все существующие в природе элементарные частицы — электроны, протоны, нейтроны и множество других частиц, открытых в последние десятилетия. Все они характеризуются не только величиной заряда и массы, но имеют ещё одну характеристику — *спин*. Впервые спин был обнаружен у электрона.

### Единицы измерения

Линейные величины измеряются в **метрах**:

$$[\Delta x] = [\Delta y] = [\Delta z] = \text{м.}$$

Проекции импульса измеряются в **килограмм-метрах в секунду**, так что:

$$[\Delta p_x] = [\Delta p_y] = [\Delta p_z] = \text{кг·м/с.}$$



### 5.3.4. СПИН ЭЛЕКТРОНА. ПРИНЦИП ПАУЛИ

В 1925 г. Уленбек и Гаудсмит выдвинули гипотезу, согласно которой электрон помимо поступательных имеет ещё и вращательную степень свободы: подобно волчку, он как бы вращается вокруг своей оси — обладает **моментом**





**импульса** (см. п. 5.2.3). Это свойство электрона было названо **спином** (по английски *spin* — веретено). Спин — такая же неотъемлемая характеристика электрона, как его заряд и масса.

Представление о спине электрона позволяет объяснить ряд экспериментальных фактов, в частности возникновение дублетов — двойных линий — в спектрах излучения щелочных металлов.

**Спин** — собственный момент импульса электрона:

$$L_s = s\hbar, \quad (5.21)$$

где  $s = \frac{1}{2}$  — его спиновое квантовое число,  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ .

Помимо электрона собственным моментом импульса обладают и другие частицы.

**Бозоны** — частицы с целым значением спина (в единицах  $\hbar$ ):

$$s = 0, 1, 2, \dots$$

**Фермионы** — частицы с полуцелым значением спина:

$$s = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$$

К бозонам относятся, в частности, фотоны. Фермионами являются электроны, протоны, нейтроны.

Свойства бозонов и фермионов принципиально различны друг от друга. Бозоны проявляют коллективистские свойства — чем их больше, тем вероятнее появление новых таких же частиц. Фермионы, наоборот, являются индивидуалистами. Руководящим для них служит **принцип Паули**.

**Принцип Паули.** В любой квантовомеханической системе (атом, кристаллический образец металла или



полупроводника) характеристики движения двух или нескольких электронов не могут полностью совпадать. Ограничения, накладываемые принципом Паули на движение электронов в твёрдых телах, проявляются в том, что значения их координат и импульсов должны различаться настолько, чтобы они удовлетворяли соотношениям неопределённостей Гейзенберга. Соответственно, не могут совпадать и значения энергии отдельных электронов, образующих в них электронный газ.

### Единицы измерения

Собственный момент импульса частиц измеряется в **джоуль-секундах**:

$$[L_s] = \text{Дж} \cdot \text{с}.$$

## 5.4. Вынужденное излучение света

В квантовой механике процесс испускания фотонов атомами или молекулами обусловлен переходом их электронов с верхних энергетических уровней на более низкие. И если переход в возбуждённое состояние всегда является **вынужденным**, то обратный переход — с верхних уровней энергии на нижние — может быть не только **самопроизвольным**, что представляется естественным, но и совершаться под влиянием фотонов, испущенных другими атомами или молекулами, т. е. тоже может быть **вынужденным**. Это было показано А. Эйнштейном в 1917 г. и имело принципиальное значение, поскольку привело впоследствии к созданию оптических квантовых генераторов — **лазеров**.





### 5.4.1. СПОНТАННОЕ И ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СВЕТА

В своей теории Эйнштейн использовал модельную двухуровневую систему, с помощью которой ему удалось получить формулу Планка, правильно описывающую спектр излучения нагретого тела. Вывод формулы основывался на предположении о существовании вынужденных (индуцированных) переходов молекул из возбуждённого состояния в основное и тем самым явился прямым их обоснованием.

**Двухуровневая система** — модель вещества, молекулы которого могут пребывать только на двух энергетических уровнях —  $W_i$  и  $W_k$  (рис. 5.12).

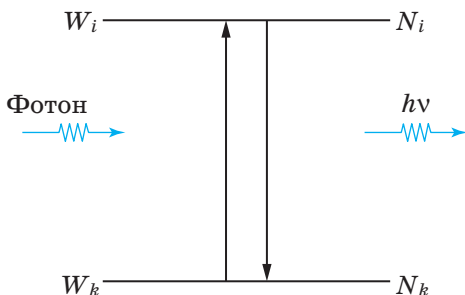


Рис. 5.12

**Основное состояние** — молекула находится на нижнем уровне, на котором её энергия имеет наименьшее возможное значение.

**Возбуждённое состояние** — молекула, поглотив фотон, перешла на верхний уровень.



**Населённость уровня** — число молекул  $N_k$ , находящихся на уровне  $k$ , т. е. имеющих энергию  $W_k$ .

**Спонтанный переход** — самопроизвольный переход молекулы с верхнего уровня на нижний.

**Вынужденный переход** — переход молекулы с одного уровня на другой, происходящий под влиянием фотонов, энергия которых равна разности энергий молекулы на этих уровнях:

$$h\nu = W_i - W_k. \quad (5.22)$$

**Динамическое равновесие** — число переходов молекул за единицу времени с нижнего уровня на верхний в среднем равно числу переходов с верхнего уровня на нижний.

**Спектральная плотность излучения** — энергия электромагнитного излучения, занимающего единичный интервал частот вблизи  $\nu$  и заключённого в единице объёма:

$$u(\nu, T) = \frac{\Delta W}{\Delta V \cdot \Delta \nu}, \quad (5.23)$$

где  $T$  — температура вещества, взаимодействующего с излучением.

### Единицы измерения

Частота измеряется в **герцах**:

$$[\nu] = \text{Гц} = 1/\text{с}.$$

Спектральная плотность излучения измеряется в **джоуль-секундах на кубический метр**:

$$[u(\nu, T)] = \text{Дж} \cdot \text{с} / \text{м}^3.$$





## 5.4.2. ИНВЕРСНАЯ НАСЕЛЁННОСТЬ УРОВНЕЙ. ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА

При прохождении света через вещество он может поглощаться или рассеиваться. Механизм рассеяния света заключается в возбуждении молекул вещества падающим светом и последующем излучении ими фотонов в разных направлениях. Уменьшение интенсивности света описывается законом Бугера.

**Закон Бугера:**

$$I = I_0 e^{-\alpha d}, \quad (5.24)$$

где  $I$  — интенсивность света, прошедшего слой вещества толщиной  $d$ ,

$I_0$  — интенсивность падающего света,

$\alpha$  — коэффициент поглощения.

Для усиления света необходимо создать инверсную населённость уровней (см. рис. 5.12).

**Инверсная населённость** уровней — число молекул, находящихся на верхнем энергетическом уровне, превышает число молекул на нижнем.

Падающий свет, частота которого удовлетворяет уравнению (5.22), вызывает **индуцированный переход** молекул с верхнего уровня на нижний и появление дополнительного количества фотонов той же частоты. Наблюдается «отрицательное поглощение» света — интенсивность света, прошедшего через слой такого вещества, превышает интенсивность падающего света (рис. 5.13). В формуле (5.24) коэффициент поглощения  $\alpha$  становится отрицательным:

$$I = I_0 e^{|\alpha|d}.$$

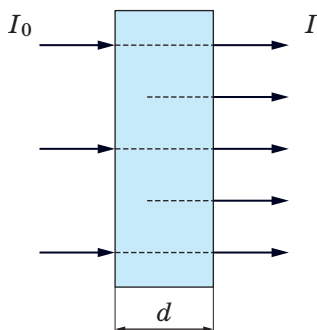


Рис. 5.13

**Свойства** индуцированного излучения:

- индуцированные фотоны (световые волны) движутся в том же направлении, что и падающие;
- частота и плоскость поляризации индуцированного света совпадают с таковыми у падающего света;
- фазы колебаний индуцированной и падающей волн одинаковы.

Пучок света, возникающий в результате вынужденного излучения, представляет собой совокупность **когерентных** волн.

### Единицы измерения

Интенсивность света измеряется в **ваттах на квадратный метр**:

$$[I] = \text{Вт/м}^2.$$

Толщина слоя вещества измеряется в **метрах**:

$$[d] = \text{м}.$$

Единица измерения коэффициента поглощения — **обратный метр**:

$$[\alpha] = \text{м}^{-1}.$$







### 5.4.3. ТРЁХУРОВНЕВАЯ СХЕМА. ЛАЗЕР НА РУБИНЕ

**Лазер** — оптический квантовый генератор.

Слово *лазер* происходит от первых букв английского предложения **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation** (усиление света с помощью индуцированного излучения).

Первым был **лазер на рубине**, построенный в 1960 г. Т. Мейманом в США.

Кристалл рубина представляет собой прозрачный минерал красного цвета, в быту относящийся к драгоценным камням. Химически — это окись алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , в которой часть атомов алюминия заменена атомами хрома, концентрация которых составляет 0,03...0,05 %. Хром в рубине присутствует в виде ионов  $\text{Cr}^{+++}$ , участвующих в генерации света лазером. Их энергетические уровни изображены на рис. 5.14. Уровень 1 — основной уровень. Под действием света от внешнего источника электроны с него попадают на уровень 3, приобретая энергию  $W_3$ . Этот уровень на рисунке изображен широким — в виде полосы. На уровне 3 время жизни электрона  $\tau \approx 10^{-8}$  с.

**Связь ширины уровня энергии  $\Delta W$  с временем  $\tau$  пребывания на нём электрона:**

$$\Delta W \cdot \tau > h, \quad (5.25)$$

где  $h$  — постоянная Планка.

С уровня 3 электрон без излучения фотона переходит на более низкий уровень 2, передав часть своей энергии окружающим атомам. Время жизни электрона на уровне 2 гораздо больше и составляет приблизительно  $10^{-3}$  с. Электроны накапливаются на нём, создавая инверсную населённость по отношению к уровню 1.

Ширина уровня 2, согласно (5.25), намного меньше ширины уровня 3, в силу чего фотоны, испускаемые при переходах с него на уровень 1, имеют строго определённую частоту.

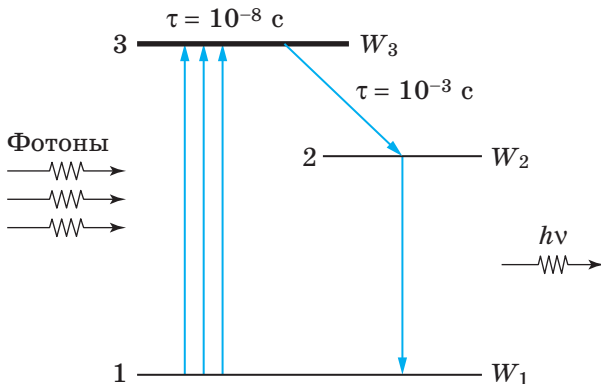


Рис. 5.14

Принципиальная схема лазера на рубине приведена на рис. 5.15.

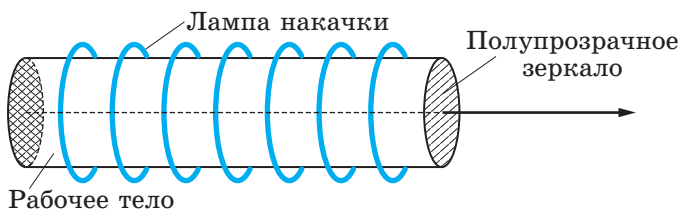


Рис. 5.15

**Составные части** лазера:

- источник энергии,
- рабочее тело,
- резонатор.



**Источник энергии — лампа накачки** — переводит электроны из основного состояния в возбуждённое («оптическая накачка»). Лампой накачки служит ксеноновая газоразрядная трубка, охватывающая кристалл рубина в виде спирали и создающая мощный поток света в широком диапазоне длин волн.

Благодаря большой ширине уровня 3 (см. рис. 5.14) доля поглощаемых рубином фотонов, при переходах на него электронов с основного уровня, достаточно велика, т. к. их энергия, отсчитанная от уровня 1, лежит в интервале  $\Delta W = W_{3\max} - W_{3\min}$ .

**Рабочее тело** — кристалл рубина в виде цилиндра, в котором создаётся инверсная населённость уровней.

**Резонатор** — два параллельных зеркала, которыми служат основания цилиндра, покрытые слоем серебра. Одно из зеркал полностью отражает падающие на него лучи, второе — часть света пропускает.

Резонатор служит для усиления света за счёт вынужденного излучения фотонов рубином, находящимся в состоянии с инверсной населённостью уровней. Среди фотонов, спонтанно испускаемых возбуждёнными ионами хрома (находящимися на уровне 2), всегда найдётся хотя бы один, движущийся вдоль оси цилиндра. На своём пути он порождает себе подобные фотоны, заставляя ионы хрома совершать вынужденные переходы в основное состояние — на уровень 1. Отразившись от зеркала, они снова попадают в активную среду кристалла, которая даёт новое увеличение количества фотонов. Зеркала резонатора, направляя поток света внутрь кристалла рубина, создают тем самым лавину фотонов.

Всякий раз при отражении от полупрозрачного зеркала некоторая часть фотонов (около 8%) проходит сквозь



него. Когда интенсивность пучка достигает своего максимума, эта часть становится заметной и составляет собственно излучение лазера. Фотоны, излученные спонтанно и движущиеся под углом к оси цилиндра, покидают его через его боковую поверхность, не успев создать лавины.

Рубиновый лазер работает в импульсном режиме — должно пройти некоторое время, чтобы с помощью лампы накачки перевести электроны из основного состояния на уровень 2, после чего процесс генерации света возникает сам по себе. Частота его повторения зависит от мощности лампы накачки и составляет несколько импульсов в минуту.

**Свойства излучения** лазера:

- строгая монохроматичность ( $\Delta\lambda \approx 0,01$  нм);
- высокая когерентность;
- большая интенсивность и малая расходимость пучка.

## 5.5. Электропроводность твёрдых тел

Значение спина — целого или полуцелого — определяет свойства совокупности микрочастиц. Фотоны — частицы со спином единица — проявляют коллективистские свойства: чем их больше, тем более вероятно появление новых частиц, что видно на примере работы лазера. Электроны, наоборот, имеют свойства индивидуалистов, поскольку подчиняются принципу Паули. Квантовомеханическая теория электропроводности, учитывающая этот факт, называется **зонной теорией твёрдых тел**. Она позволяет объяснить существование в природе



проводников, диэлектриков и так называемых полупроводников, теория которых была разработана в 30-е годы прошлого века английским физиком А. Х. Вильсоном.



### 5.5.1. ЭЛЕМЕНТЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

**Твёрдое тело** — упорядоченное расположение в пространстве атомов, образующих кристаллическую решётку.

**Период кристаллической решётки** — расстояние между соседними атомами, из которых она образована.

**Квантовомеханическая система** — атом, молекула или твёрдое тело, объединяющие в себе ядра атомов и электроны.

**Электронная оболочка атома** — совокупность электронов, обращающихся вокруг его ядра.

**Принцип Паули:** характеристики движения электронов твёрдого тела не могут полностью совпадать.

При объединении атомов в кристалл их электронные оболочки пространственно перекрываются. В силу принципа Паули, это приводит к расщеплению каждого из энергетических уровней на множество подуровней, которые образуют полосы или **энергетические зоны** (рис. 5.16).

**Энергетическая зона** — совокупность подуровней энергии, образованных в результате расщепления энергетических уровней атомов при объединении их в кристалл. Уровни энергии расходятся независимо от того, заняты они электронами или свободны. Число подуровней в зоне порядка числа атомов в кристалле, а расстояние



между ними  $\approx 10^{-15}$  эВ, т. е. энергия электронов в пределах каждой зоны изменяется **квазинепрерывно**.

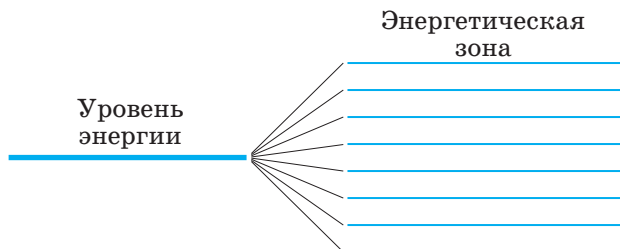


Рис. 5.16

В одних веществах расстояния между атомами таковы, что перекрывающиеся верхние уровни содержат электроны, в других — образуемая из них верхняя зона оказывается пустой. Поскольку внешние электроны атома определяют валентность вещества, она называется **валентной зоной** (ВЗ).

**Валентная зона** — последняя из зон, отсчитываемых по шкале энергии в направлении её возрастания, в которой есть электроны, заполняющие её полностью или частично.

Вслед за валентной следует зона, называемая **зоной проводимости** (ЗП). Эти зоны разделены промежутком шириной  $\Delta W$ , в котором отсутствуют разрешённые уровни энергии, — **запрещённой зоной** (ЗЗ).

**Зона проводимости** — зона, следующая за валентной, заполняемая электронами частично.

**Запрещённая зона** — зона, образующая промежуток между валентной зоной и зоной проводимости, в котором нет уровней энергии, на которых могли бы находиться электроны.



В зависимости от заполненности валентной зоны и ширины запрещённой зоны вещества делятся на **проводники**, **полупроводники** и **диэлектрики** (рис. 5.17).

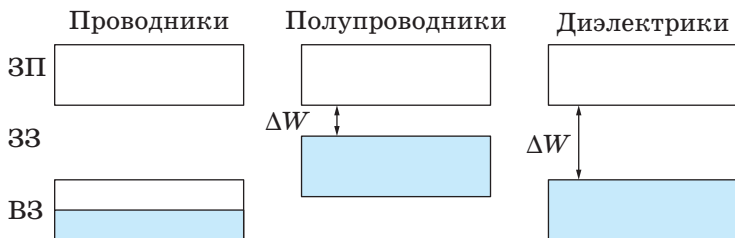


Рис. 5.17

**Проводники** — вещества, валентная зона которых заполнена только наполовину или перекрывается с зоной проводимости.

Проводниками являются все **металлы**. Валентная зона одновалентных металлов заполнена электронами наполовину и выступает в роли зоны проводимости. У металлов большей валентности зона проводимости перекрывается с полностью заполненной валентной зоной (рис. 5.18). В обоих случаях в верхней зоне наряду с заполненными имеются и свободные уровни энергии.

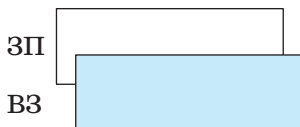


Рис. 5.18

Выясним, почему металлы хорошо проводят электрический ток. С точки зрения классической теории электропроводности валентные электроны в металлах



отщепляются от своих атомов и могут свободно перемещаться по всему объёму проводника, образуя идеальный газ. Процесс электропроводности заключается в движении носителей тока — дрейфе электронов — вдоль направления электрического поля, возникающего в проводнике при создании на его концах разности потенциалов. Наряду с хаотическим — тепловым движением — электроны участвуют в упорядоченном движении вдоль этого направления с дрейфовой скоростью  $v_{\text{др}}$ , что приводит к увеличению их энергии.

Поскольку дрейфовая скорость ( $v_{\text{др}} \approx 10^{-5}$  м/с) составляет лишь малую долю скорости их теплового движения, примерно равной  $10^5$  м/с, это увеличение весьма незначительно. Поэтому для возникновения электрического тока должны существовать вышележащие очень близко расположенные друг к другу незаполненные энергетические уровни, на которые электроны могут перейти, что и имеет место в энергетических зонах твёрдых тел. Таким образом, условие электропроводимости тела — частичное заполнение электронами верхней энергетической зоны.

Вещества, имеющие узкую запрещённую зону, называются **полупроводниками**. Так, у германия ширина запрещённой зоны  $\Delta W = 0,67$  эВ, у кремния —  $\Delta W = 1,12$  эВ.

Если ширина запрещённой зоны достаточно велика — например, у углерода с  $\Delta W = 5,47$  эВ, — вещество является **диэлектриком**.

**Полупроводники** — вещества, имеющие узкую запрещённую зону.

**Диэлектрики** — вещества с широкой запрещённой зоной.





При температуре, близкой к нулю ( $T \approx 0$ ), валентная зона у полупроводников и диэлектриков полностью заполнена, а зона проводимости — пуста. Электрическое поле, заставляющее электроны двигаться, не может сообщить им столь большую энергию, чтобы они преодолели запрещённую зону и перешли в зону проводимости. Ток может возникнуть лишь в очень сильном поле, когда приложенная разность потенциалов достигает напряжения пробоя.

### Единицы измерения

Ширина запрещённой зоны измеряется в **электрон-вольтах**:

$$[\Delta W] = \text{эВ}.$$



## 5.5.2. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

**Полупроводники** — вещества, электропроводность которых с ростом температуры возрастает:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\Delta W / 2kT}, \quad (5.26)$$

где  $\sigma_0$  — электропроводность при  $T \rightarrow \infty$ ,  
 $\Delta W$  — ширина запрещённой зоны,  
 $k$  — постоянная Больцмана.

Повышение температуры приводит к быстрому падению электрического сопротивления полупроводников. По этому признаку полупроводники легко отличить от металлов, сопротивление которых с температурой растёт. Зависимость электропроводности полупроводников от температуры используется, в частности, в термометрах сопротивления.



При низких температурах полупроводники, подобно диэлектрикам, являются изоляторами. Электропроводность полупроводников становится заметной в двух случаях — при повышении температуры и при внесении в чистый полупроводник примеси в виде атомов вещества, отличающегося от него валентностью. В первом случае электропроводность называется **собственной**, во втором — **примесной**.

**Собственная электропроводность** — электропроводность чистых полупроводников.

Электроны, перешедшие в зону проводимости из валентной зоны полупроводника в результате теплового движения атомов кристаллической решётки, становятся свободными и, подобно электронам в металле, обеспечивают его электропроводность. В валентной зоне при этом образуются вакантные места, называемые «дырками». Они выступают в роли частиц, несущих положительный заряд и способных перемещаться от атома к атому. Электрон, перешедший от соседнего атома на место имеющейся вакансии, создаёт новую вакансию — дырку, которая возникает на его месте. Такие переходы электронов равносильны движению дырок в направлении, обратном направлению движения электронов. Таким образом, собственная электропроводность полупроводников обусловлена движением электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне.

**Электронная проводимость** — электропроводность полупроводников, обусловленная движением электронов в зоне проводимости.

**Дырки** — вакантные места в валентной зоне, образовавшиеся в результате перехода части её электронов в зону проводимости.



**Дырочная проводимость** — электропроводность полупроводников, обусловленная движением дырок в валентной зоне.

**Примесная электропроводность** — электропроводность полупроводника, содержащего примесь в виде вещества с большей или меньшей валентностью.

Если часть атомов полупроводника заменить атомами другой валентности, его электропроводность будет носить иной характер. При добавлении 5-валентного фосфора (P) к 4-валентным германию или кремнию четыре валентных электрона атома фосфора будут участвовать в связях с соседними атомами, а пятый электрон легко от него отделяется и свободно перемещается по всему кристаллу (рис. 5.19). В запрещённой зоне появляются **примесные уровни** энергии, расположенные у «дна» зоны проводимости (рис. 5.20). Расстояние между ними и зоной проводимости столь мало, что при комнатной температуре все они становятся свободными, поскольку населяющие их электроны переходят в зону проводимости. Проводимость полупроводников, обусловленная

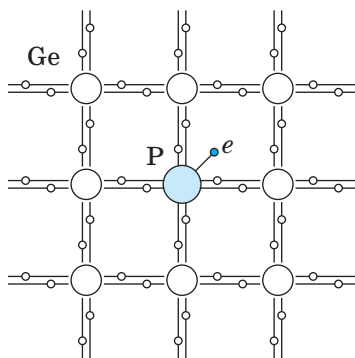


Рис. 5.19

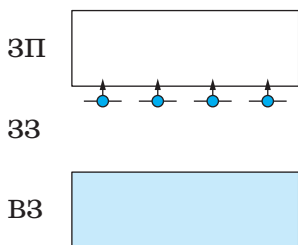


Рис. 5.20



этими примесными электронами, не зависит от температуры, а определяется только концентрацией примесных атомов, составляющей 0,00001 %.

Примесь бóльшей валентности, поставляющая электроны в зону проводимости, называется **донорной**. Полупроводники обладают в этом случае **электронной** проводимостью и называются **полупроводниками *n*-типа** (от английского слова *negativ* — отрицательный).

**Полупроводник *n*-типа** — полупроводник, имеющий электронную примесную проводимость.

При добавлении к чистому полупроводнику атомов 3-валентного вещества, например атомов бора (В), для образования связей с соседними атомами полупроводника им будет недоставать одного электрона, который они забирают у одного из соседних атомов. Вблизи него образуется вакансия электрона — дырка, которая может перемещаться по всему объёму полупроводника (рис. 5.21).

Примесные уровни в запрещённой зоне располагаются вблизи «потолка» валентной зоны (рис. 5.22). Эти уровни при комнатной температуре оказываются занятыми электронами из валентной зоны, в результате чего в ней образуются дырки, создающие **дырочную** проводимость полупроводника. Примесь атомов меньшей валентности, создающая дырки в валентной зоне, называется **акцепторной**, а полупроводник — **полупроводником *p*-типа** (от английского слова *pozitiv* — положительный).

**Полупроводник *p*-типа** — полупроводник с дырочной примесной проводимостью.

**Основные носители тока** — электроны в зоне проводимости или дырки — в валентной зоне, возникающие при внесении в чистый полупроводник примеси соответствующей валентности.



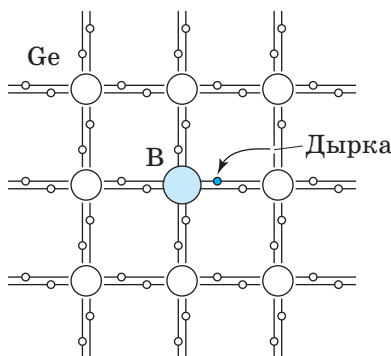


Рис. 5.21

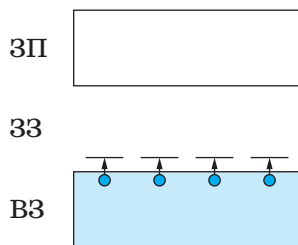


Рис. 5.22

Электропроводность полупроводников, обусловленная наличием примеси, играет при комнатной температуре главную роль.

### Единицы измерения

Электропроводность измеряется в **сименсах на метр**:

$$[\sigma] = \text{См/м}, (\text{См} = \text{Ом}^{-1}).$$



### 5.5.3. ПРИНЦИП РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

**Выпрямитель** — устройство, преобразующее переменный ток в постоянный.

В качестве выпрямителя до открытия полупроводников использовалась вакуумная электронная лампа с двумя электродами — **вакуумный диод** (рис. 5.23). Электроны, испускаемые нагреваемым катодом, движутся в электрическом поле, созданном источником тока,

к положительному аноду, создавая в цепи электрический ток. При изменении полярности приложенного к лампе напряжения электроны не попадают на анод и ток в цепи прекращается — электронная лампа проводит электрический ток только в одном направлении. Включённая в цепь переменного тока, она позволяет преобразовать его в ток, постоянный по направлению (рис. 5.24). Пульсирующий ток можно сгладить с помощью фильтров из конденсаторов и катушек индуктивности и получить ток, постоянный по величине.

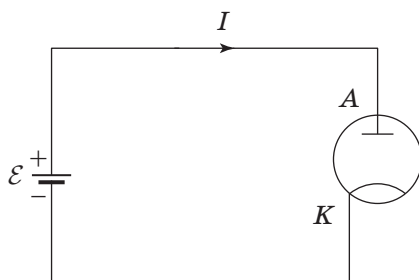


Рис. 5.23

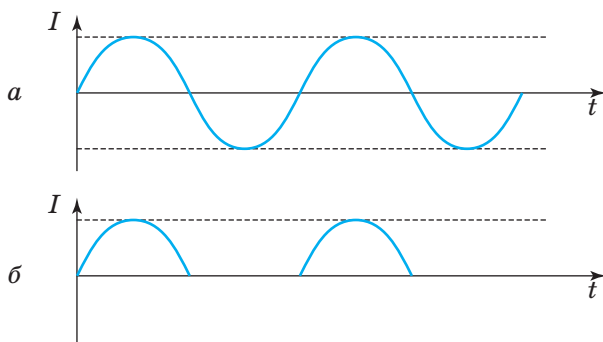


Рис. 5.24

Задачу выпрямления переменного тока в настоящее время чаще всего выполняют полупроводниковые выпрямители. Рабочим элементом их служит контакт двух полупроводников, имеющих разные типы проводимости. Он называется ***n-p-переходом*** и обладает, подобно электронной лампе, односторонней проводимостью.

**Полупроводниковый диод** — совокупность двух полупроводников с разными типами проводимости, приведённых в контакт друг с другом.

Если полупроводники *n*- и *p*-типа соединить друг с другом, на их границе раздела возникнет двойной электрический слой (рис. 5.25). Электроны, являющиеся основными носителями тока в полупроводнике *n*-типа, переходят из его приграничной области в полупроводник *p*-типа, рекомбинируют с дырками, служащими для него основными носителями тока, и создают там избыточный отрицательный заряд. В то же время в первом из них появляется избыточный положительный заряд.

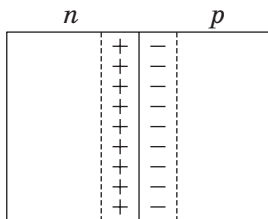


Рис. 5.25

На границе полупроводников возникает электрическое поле, направленное от *n*- к *p*-полупроводнику. Оно препятствует дальнейшему переходу электронов в указанном направлении, а приграничные области обоих полупроводников оказываются лишёнными своих основных носителей тока.

Соединим наш составной полупроводник с источником тока, подключив положительный полюс источника к  $n$ -полупроводнику, а отрицательный полюс — к  $p$ -полупроводнику (рис. 5.26, а). Созданное источником электрическое поле заставит электроны двигаться влево, а дырки — вправо. Приграничная область, обеднённая носителями тока, расширится, и сопротивление её возрастёт. Этот режим подключения источника тока называется **запирающим**.

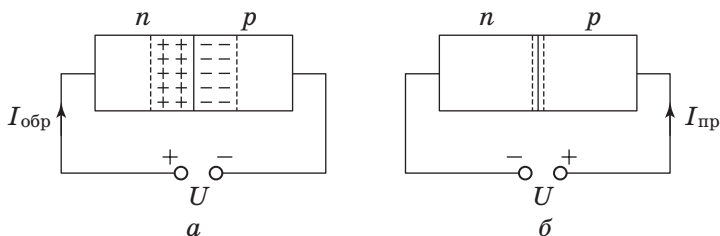


Рис. 5.26

**Запирающий режим включения диода** — положительный полюс источника тока соединён с полупроводником  $n$ -типа, отрицательный — с полупроводником  $p$ -типа.

Изменение полярности подключения источника приводит к уменьшению ширины запирающего слоя, сопротивление его резко падает, а ток в цепи — возрастает:  $n$ - $p$ -переход находится теперь в **пропускном** режиме (рис. 5.26, б).

**Пропускной режим** — положительный полюс источника тока соединён с полупроводником  $p$ -типа, отрицательный полюс — с полупроводником  $n$ -типа.

**Прямой ток** — ток в цепи при пропускном режиме включения диода.





**Обратный ток** — ток, текущий через диод в запирающем режиме его включения.

Зависимость силы тока, протекающего через полупроводниковый диод, от приложенного напряжения — его **вольтамперная характеристика** — приведена на рис. 5.27.

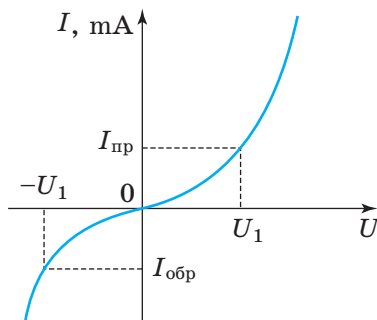


Рис. 5.27

**Коэффициент выпрямления** выпрямителя — отношение прямого тока к обратному, взятых при одном и том же напряжении:

$$k = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{обр}}} . \quad (5.27)$$

Численные его значения у полупроводниковых диодов составляют несколько тысяч единиц.

Наряду с полупроводниковыми диодами существуют полупроводниковые триоды — **транзисторы**, имеющие два  $n$ - $p$ -перехода и предназначенные для усиления мощности переменного тока. Устройства с тремя такими переходами, называемые **тиристорами**, используются для управления большими токами, заменяя механические реле.

## Единицы измерения

Сила тока измеряется в **амперах**:

$$[I] = \text{A}.$$

## 5.6. Атомное ядро

В середине XX века человечество овладело мощным источником энергии — делением ядер атомов, при котором выделяется мощность, в миллион раз превосходящая мощность химических реакций горения топлива, являющихся и до настоящего времени главным источником энергии, потребляемой человеком. Наряду с оружием огромной разрушительной силы, использующим деление ядер, была создана сеть электростанций, называемых атомными, которые вырабатывают значительную часть всей производимой человечеством электроэнергии. Достижения физики в области изучения атомного ядра, как и в других её областях, нашли здесь своё практическое применение, явившееся составной частью общего прогресса в развитии человеческой цивилизации, который стал особенно заметным во второй половине XX века — эпохе, называемой научно-технической революцией.



### 5.6.1. ЗАРЯД, МАССА И РАЗМЕР ЯДЕР АТОМОВ

**Ядро атома** — центр атома, в котором находятся протоны и нейтроны, называемые **нуклонами**, связанные друг с другом ядерными силами.





Ядро атома открыто в 1911 г. Э. Резерфордом. Масса атома практически вся сосредоточена в его ядре. Оно несёт положительный заряд, равный по величине суммарному заряду обращающихся вокруг него электронов, число которых равно числу протонов.

**Массовое число  $A$**  — число нуклонов в ядре.

**Радиус ядра атома:**

$$R_{\text{я}} = 1,3 \cdot 10^{-15} A^{1/3} \text{ м.} \quad (5.28)$$

Размер ядра по порядку величины в  $10^5$  раз меньше размера атома. Объём ядра пропорционален числу содержащихся в нём нуклонов, а плотность ядра приблизительно одинакова для всех ядер.

**Протон** — ядро атома водорода — элементарная частица, существующая в ядрах атомов, имеющая положительный заряд, равный заряду электрона, и массу, в 1840 раз бóльшую.

**Нейтрон** — частица, аналогичная протону, не имеющая заряда.

**Ядерные силы** — силы притяжения между нуклонами, действующие на расстояниях, сравнимых с размерами атомных ядер.

**Заряд ядра  $Z$**  — число протонов в ядре атома, равное его порядковому номеру в таблице Менделеева.

**Изотопы** — ядра с одинаковыми  $Z$ , но разными  $A$ , т. е. с разным числом нейтронов:

$$N = A - Z.$$

Ядра атомов обозначают тем же символом, что и соответствующий химический элемент, указывая слева от него вверху число нуклонов  $A$ , а внизу — число протонов  $Z$ . Так, например, изотопы урана имеют обозначение  ${}_{92}^{238}\text{U}$  и  ${}_{92}^{235}\text{U}$ . Часто, однако, значение  $Z$  не приводится,



поскольку оно однозначно определяется химическим символом элемента, и тогда пишут  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ .

1

Сколько протонов и нейтронов содержится в ядре изотопа урана  $^{235}_{92}\text{U}$ ?



Ответ: \_\_\_\_\_



### 5.6.2. РАДИОАКТИВНОСТЬ. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

**Радиоактивность** — распад ядер атомов с образованием элементов, расположенных в таблице Менделеева ближе к её началу.

В 1896 г. французский физик Анри Беккерель открыл **радиоактивность** урана. Спустя два года Мария Склодовская-Кюри и Пьер Кюри выделили из урановой руды два новых радиоактивных элемента — **полоний** и **радий**.

Радиоактивность веществ проявляется в почернении фотоэмульсии, ионизации газов, свечении флуоресцирующих веществ под действием испускаемых ими невидимых лучей. Такими лучами могут быть:

- $\alpha$ -лучи — поток ядер атома гелия;
- $\beta$ -лучи, представляющие собой поток электронов или позитронов;
- $\gamma$ -лучи, являющиеся электромагнитным излучением с длинами волн, меньшими рентгеновских.

#### Закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (5.29)$$

где  $N$  — число атомов радиоактивного элемента, имеющих в наличии в момент времени  $t$ ,





$N_0$  — число таких атомов в момент времени  $t = 0$ ,  
 $\lambda$  — постоянная распада.

**Постоянная распада** — вероятность распада атома за 1 секунду.

**Период полураспада  $T$**  — промежуток времени, в течение которого распадается половина начального количества атомов.

**Связь** периода полураспада с постоянной распада:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{0,693}{T}. \quad (5.30)$$

**Активность радиоактивного препарата** — число распадов атомов, происходящих в нём за единицу времени:

$$a = \lambda N, \quad (5.31)$$

$$a = a_0 e^{-\frac{t \ln 2}{T}}, \quad (5.32)$$

где  $a_0$  — активность в начальный момент времени.

**Альфа-частица** — ядро атома гелия — частица, состоящая из двух протонов и двух нейтронов.

**Бета-частицы** — электроны или позитроны (электроны с положительным зарядом).

### Единицы измерения

Период полураспада измеряется в **секундах**:

$$[T] = \text{с}.$$

Внесистемные единицы — **минута, час, год**.

Единица измерения постоянной распада —  $\text{с}^{-1}$ :

$$[\lambda] = \frac{1}{\text{с}}.$$



Единица измерения активности — **беккерель**:

$$[a] = \text{Бк} = \frac{1}{\text{с}}.$$

Внесистемная единица — **кюри**:

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}.$$

1

Некоторый радиоактивный препарат имеет постоянную распада  $\lambda = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$ . Через сколько времени  $t$  распадётся 75 % первоначального количества атомов?



Ответ: \_\_\_\_\_

2

Найти постоянную распада радона  $\lambda$ , если число его атомов уменьшается за сутки на 18,2 %. Каков период полураспада  $T$  радона?



Ответ: \_\_\_\_\_

3

Найти массу полония  ${}_{84}^{210}\text{Po}$ , активность которого  $a = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ . Период полураспада полония  $T = 138 \text{ сут}$ .



Ответ: \_\_\_\_\_





### 5.6.3. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЯДЕР

В то время как заряд атомного ядра равен сумме зарядов входящих в его состав протонов, масса ядра меньше суммы масс отдельных нуклонов. Дело в том, что нуклоны в ядре сильно связаны между собой, и чтобы освободить все протоны и нейтроны, нужно затратить энергию, которая называется **энергией связи ядра**  $W_{\text{св}}$ . При образовании ядра из свободных нуклонов эта энергия должна выделяться. Согласно теории относительности между энергией и массой существует соотношение  $W = mc^2$  (где  $c$  — скорость света). Поэтому выделение энергии приводит к уменьшению массы образовавшегося ядра на величину  $\Delta m = \frac{W_{\text{св}}}{c^2}$ , называемую **дефектом массы**.

**Дефект массы** — уменьшение массы ядра по сравнению с суммой масс нуклонов, входящих в его состав:

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m, \quad (5.33)$$

где  $m_p$  — масса протона,  
 $m_n$  — масса нейтрона,  
 $m$  — масса ядра атома.

**Энергия связи ядра** — энергия, необходимая для разделения ядра атома на отдельные нуклоны:

$$W_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2, \quad (5.34)$$

где  $c$  — скорость света.

**Удельная энергия связи** — энергия, приходящаяся на один нуклон  $W_{\text{св}}/A$ , — для средних и тяжёлых ядер, начиная с  $A = 25$ –30, равна 7–8 МэВ. Для сравнения укажем, что энергия связи валентных электронов в атомах в  $10^6$  раз меньше — порядка 10 эВ.

На рис. 5.28 представлен график, показывающий зависимость удельной энергии связи от массового числа  $A$ . Она быстро растёт у ядер с малыми  $A$ , а затем медленно убывает у тяжёлых ядер. Такой ход кривой показывает, что с энергетической точки зрения возможны два процесса преобразования ядер атомов — деление тяжёлых ядер на несколько более лёгких и слияние (синтез) лёгких ядер с образованием более тяжёлого ядра. Оба эти процесса должны сопровождаться выделением большого количества энергии. Первый из них используется человеком для получения электроэнергии и в военных целях, второй — находится в стадии разработки и не нашёл пока практического применения в мирных целях.

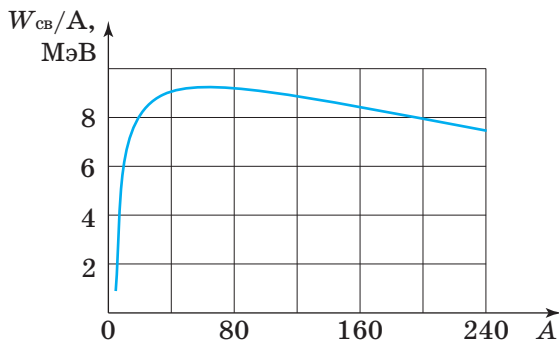


Рис. 5.28

## Единицы измерения

Масса ядра измеряется в **атомных единицах массы**:

$$[m] = \text{а.е.м.}, (1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}).$$

Энергия связи ядра измеряется в **мегаэлектронвольтах**:

$$[W_{св}] = \text{МэВ}, (1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}).$$







### 5.6.4. ПОЛУЧЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ. ЦЕПНАЯ ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ

**Ядерные реакции** — процессы, в которых участвуют частицы, взаимодействующие друг с другом с помощью ядерных сил.

В ядерных реакциях участвуют нуклоны и ядра атомов. Подобно химическим реакциям, позволяющим получать новые вещества, ядерные реакции приводят к образованию ядер, отличающихся от исходных своим составом. Примером таких реакций, протекающих в природных условиях, служит распад ядер радиоактивных элементов — урана, радия, тория, при котором в исходном образце количество этих ядер уменьшается, а вместо них образуются ядра других элементов, в частности свинца. Путём бомбардировки ядер  $\alpha$ -частицами, протонами, нейтронами удалось получить множество не встречающихся в природе радиоактивных изотопов. Эксперименты такого рода с использованием нейтронов привели к открытию **цепной ядерной реакции**, нашедшей практическое применение.

**Цепная ядерная реакция** — реакция деления ядер урана, происходящая при облучении их нейтронами, когда осколки деления испускают новые нейтроны, вызывая деление новых ядер урана (рис. 5.29).

**Коэффициент размножения нейтронов** — отношение среднего числа нейтронов, образовавшихся в  $n$ -м поколении цепной реакции, к среднему числу нейтронов в предыдущем поколении:

$$k = \frac{N_n}{N_{n-1}}. \quad (5.35)$$

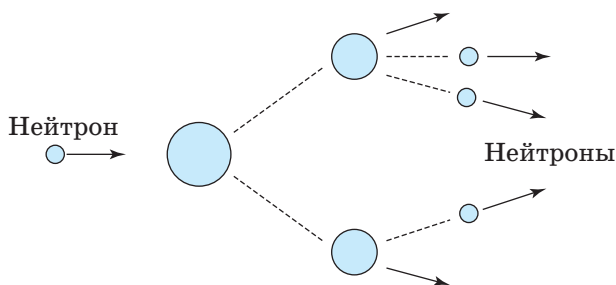


Рис. 5.29

Часть нейтронов, освобождающихся при делении ядер урана, покидает образец, другая их часть участвует в поддержании цепной реакции, приводя к появлению следующего поколения нейтронов в результате деления новых ядер.

Для осуществления управляемой цепной реакции нужно поддерживать коэффициент размножения равным единице ( $k = 1$ ). Условием её начала является наличие такого количества делящегося вещества, чтобы на пути нейтронов, образующихся при делении ядер, число ядер, с которыми они встретятся, в следующем поколении было не меньше числа таких ядер в предыдущем поколении. Отсюда возникает понятие о **критическом объёме** делящегося вещества. Для урана-235 — это шар радиусом  $R_{кр} = 9,2$  см. Масса содержащегося в нём урана — **критическая масса** —  $m_{кр} \approx 62$  кг (плотность урана  $\rho = 18,9$  г/см<sup>3</sup>).

**Критическая масса** — минимальная масса делящегося вещества, необходимая для начала цепной реакции.

Режим реакции называется **критическим**, если  $k = 1$ , и **надкритическим** при  $k > 1$ .

Надкритический режим осуществляется при взрыве атомной бомбы. В качестве взрывчатого вещества в ней используется уран-235 или плутоний-239. Общая его масса, превышающая критическую, разделена в бомбе

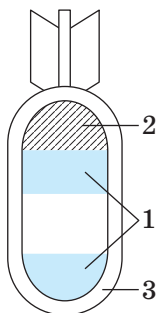


Рис. 5.30

на две или несколько частей, масса каждой из которых меньше критической (1 на рис. 5.30). Для их объединения используется обычное взрывчатое вещество — запал (2), с помощью которого одной частью вещества выстреливают в другую. Оболочка (3) из тяжёлого металла обеспечивает плотное их соединение и одновременно служит отражателем нейтронов. Несмотря на это, во время взрыва успевает прореагировать только часть ядерного заряда.



## 5.6.5. ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ

**Ядерный реактор** — агрегат, осуществляющий цепную реакцию деления ядер урана для производства тепловой энергии.

**Ядерное топливо** — природный уран, обогащённый изотопом  $^{235}\text{U}$ .

Оно изготавливается в виде цилиндрических стержней — тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), которые располагаются в его теле на некотором расстоянии друг от друга (рис. 5.31). Между ними находится замедлитель.

Нейтроны, образовавшиеся в процессе деления ядер урана, нужно замедлить до тепловых скоростей, прежде чем они вступят во взаимодействие с новыми атомами урана.

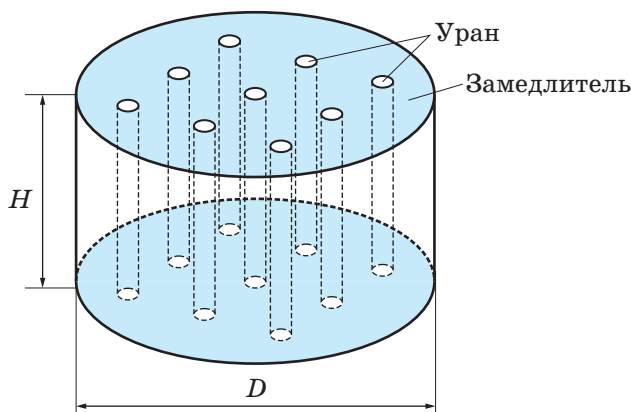


Рис. 5.31

**Замедлитель** — графит или тяжёлая вода  $D_2O$ , частично поглощающие кинетическую энергию нейтронов.

Потеря нейтронов в замедлителе, ядрах урана-238 и продуктах деления заставляет строить реакторы, обладающие надкритическими размерами, способными вырабатывать излишек нейтронов (диаметр такого реактора цилиндрической формы составляет приблизительно 6 м, высота — 5,5 м). Излишек нейтронов устраняется добавочно вводимыми в реактор поглотителями в виде стержней из бора или кадмия (не показанных на рисунке). Перемещение стержней в активной зоне реактора позволяет регулировать скорость цепной реакции, поддерживая её на постоянном уровне. Стержни используются для быстрого прекращения реакции в случае аварии.

**Поглотитель нейтронов** — бор или кадмий, предназначенные для быстрой остановки цепной реакции.



**Теплоноситель** — тяжёлая вода, служащая для отвода тепла из тела реактора.

**Тяжёлая вода** — вода, в состав молекул которой вместо атомов водорода входят атомы его изотопа — дейтерия с ядрами, состоящими из протона и нейтрона ( $D$  — дейтерий  ${}^2_1\text{H}$ ).

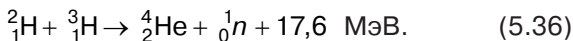
Теплоноситель циркулирует в теле реактора по трубам, а затем в теплообменнике нагревает воду, которая, превращаясь в пар, вращает лопасти паровой турбины, соединённой с генератором, вырабатывающим электроэнергию.



#### 5.6.6. ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ. ПРОБЛЕМА УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

**Термоядерные реакции** (реакции синтеза) — ядерные реакции, в которых лёгкие ядра путём их слияния превращаются в более тяжёлые.

Реакции синтеза широко распространены в природе — в недрах Солнца и звёзд изотопы водорода  ${}^2_1\text{H}$  и  ${}^3_1\text{H}$  (дейтерий и тритий) «сгорают» с образованием атомов гелия  ${}^4_2\text{He}$ . При этом образуются нейтроны, а выделяющаяся энергия примерно в четыре раза превосходит энергию, которую можно получить в реакциях распада тяжёлых ядер (в расчёте на одно ядро):



Соединение ядер происходит под действием ядерных сил, которые проявляют себя на коротких расстояниях  $r_{\min} \approx 10^{-15}$  м, соизмеримых с размерами самих ядер,



поэтому ядра атомов нужно сблизить до этого расстояния. Поскольку все ядра несут положительный заряд, между ними действуют кулоновские силы отталкивания, тем большие, чем больше этот заряд.

Легче всего осуществить сближение ядер изотопов водорода ( $Z = 1$ ). Это можно сделать, если газ из них нагреть до температуры, при которой кинетической энергии ядер будет достаточно, чтобы совершить работу по преодолению этих сил и сблизиться до расстояния  $r_{\min}$ .

Температура, при которой возможно осуществление реакций синтеза составляет примерно 150 млн градусов. В силу этого они называются **термоядерными реакциями**. Столь высокие температуры наблюдаются в недрах звёзд. В земных условиях в качестве «запала» используется взрыв атомной бомбы, при котором также развивается высокая температура. Мощность водородной бомбы принципиально ничем не ограничена.

Сложность термоядерной проблемы заключается в том, что при очень высоких температурах вещество находится в ионизированном состоянии — в виде **плазмы**, которая проявляет множество неустойчивостей.

Для осуществления термоядерной реакции требуется создать плазму достаточно высокой плотности, нагреть её и поддерживать в подвешенном состоянии достаточно большое время ( $\sim 1$  с), не давая соприкоснуться со стенками сосуда, в котором она находится. При этом нужно ещё осуществить отвод выделившейся энергии и добиться, чтобы её количество превышало количество энергии, затраченной на запуск реакции. Несмотря на достигнутые здесь успехи, осуществить управляемую термоядерную реакцию, имеющую промышленное значение, человечеству пока не удалось.





# Приложения

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ВЕКТОРНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ В ФИЗИКЕ

Физические величины, характеризующиеся не только численным значением, но и направлением в пространстве, называются **векторными**.

Векторными являются **перемещение**, **скорость**, **ускорение**, **сила**, **импульс** и ряд других величин. Векторы на рисунках изображают отрезком прямой со стрелкой, а в формулах их отмечают стрелкой над символом, обозначающим данный вектор.

Принадлежность какой-либо величины к векторным устанавливается опытным путём по признаку, подчиняется ли она правилу сложения векторов.

Рассмотрим перемещение тела из точки  $A$  сначала в точку  $B$ , а затем в точку  $C$  (рис. П.1.1). Результирующее перемещение изобразится отрезком  $AC$ . Обозначая каждое из перемещений векторами  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$ , приходим к заключению, что

$$\vec{a} + \vec{b} = \vec{c}. \quad (\text{П.1.1})$$

Формула (П.1.1) и рис. П.1.1 устанавливают **правило сложения векторов**:

Чтобы получить сумму векторов  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ , нужно совместить начало вектора  $\vec{b}$  с концом вектора  $\vec{a}$  и соединить начало вектора  $\vec{a}$  с концом вектора  $\vec{b}$  направленным отрезком  $\vec{c}$ , который и будет равен сумме векторов  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ .

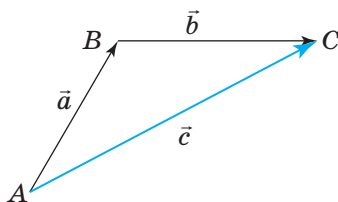


Рис. П.1.1

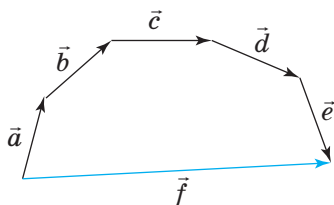


Рис. П.1.2

Векторы  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  называются **слагаемыми** векторами, вектор  $\vec{c}$  — **геометрической суммой** или **результующим** вектором. Очевидно, что от перестановки слагаемых сумма векторов не меняется:

$$\vec{a} + \vec{b} = \vec{b} + \vec{a}.$$

Чтобы образовать сумму  $N$  векторов  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$ , ..., используют **правило многоугольника**:

Векторы следует расположить так, чтобы начало каждого следующего слагаемого вектора совпало с концом предыдущего. Сумма векторов — вектор, проведённый из начала первого к концу последнего из них (рис. П.1.2).

**Разность векторов  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$**  можно найти, отложив оба вектора  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  из общего начала и соединив конец вектора  $\vec{b}$  с концом вектора  $\vec{a}$ , который и будет вектором  $\vec{a} - \vec{b}$  (рис. П.1.3).

Диагональ параллелограмма, построенного на векторах  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ , даёт их сумму (**правило параллелограмма**). Другая диагональ этого параллелограмма будет их разностью (рис. П.1.4).





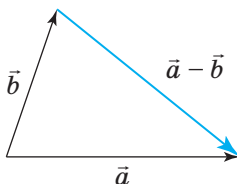


Рис. П.1.3

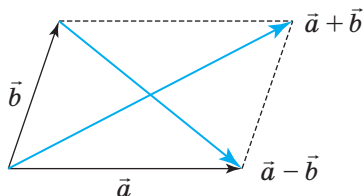


Рис. П.1.4

Помимо сложения и вычитания, векторы можно умножать на **скаляр**, т. е. величину, характеризующую только своим численным значением.

Умножив вектор  $\vec{a}$  на число  $\alpha$ , получим вектор  $\vec{b}$ , параллельный исходному, но имеющий длину, в  $\alpha$  раз отличающуюся от длины вектора  $\vec{a}$ :

$$\vec{b} = \alpha \vec{a}. \quad (\text{П.1.2})$$

Модуль (или длину) вектора обозначают той же буквой, но без стрелки:

$$|\vec{a}| = a.$$

Векторы единичной длины — **орты**, задающие направления осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  декартовой системы координат, — обозначаются соответственно буквами  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$  (рис. П.1.5). Пользуясь правилом сложения векторов (П.1.1) и правилом умножения на скаляр (П.1.2), вектор  $\vec{a}$  можно представить в виде суммы

$$\vec{a} = a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k},$$

где  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$  — проекции его на координатные оси, называемые **составляющими** (**компонентами**) вектора  $\vec{a}$ .

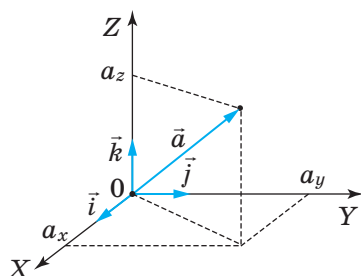


Рис. П.1.5

Длина вектора  $\vec{a}$  равна диагонали прямоугольного параллелепипеда, сторонами которого являются его проекции на оси координат. По теореме Пифагора

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}. \quad (\text{П.1.3})$$

Если два вектора равны между собой, то их проекции также равны между собой и наоборот, т. е. если  $\vec{a} = \vec{b}$ , то

$$a_x = b_x, a_y = b_y, a_z = b_z.$$

Проекция геометрической суммы нескольких векторов равна алгебраической сумме проекций слагаемых векторов: если  $\vec{a} = \vec{b} + \vec{c}$ , то

$$a_x = b_x + c_x, a_y = b_y + c_y, a_z = b_z + c_z. \quad (\text{П.1.4})$$





## ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ПРИНЦИПЫ ГОЛОГРАФИИ

Слово «голография» в переводе с греческого означает «полная запись». Так называется способ записи информации о каком-либо предмете, который позволяет воспроизвести его объёмное изображение. Принцип получения голограмм предложен в 1948 году английским физиком Д. Габором и предполагает наличие источника света высокой монохроматичности и когерентности. Таким источником явился лазер, созданный лишь в 1961 году.

Голограмма, подобно традиционной фотографии, записывается на фотопластинке. Принцип записи голограмм использует явление интерференции света, поэтому, в отличие от фотографии, «изображение» предмета на голограмме, если рассматривать голограмму как плоское его изображение, не имеет с этим предметом ничего общего.

Рассмотрим, как получается на голограмме изображение простейшего предмета — точки (рис. П.2.1, а). Пучок когерентных монохроматических лучей света падает на фотопластинку. Часть из них рассеивается предметом — точкой А — и, складываясь с нерассеянным пучком, создаёт на фотопластинке интерференционную картину. После проявления мы обнаружим на ней светлые и темные кольца переменной ширины, представляющие собой интерференционные полосы. Монохроматический свет испытывает на этой пластинке дифракцию как на дифракционной решётке, а прошедшие через неё лучи будут казаться выходящими из одной точки — изображения предмета А' (рис. П.2.1, б).

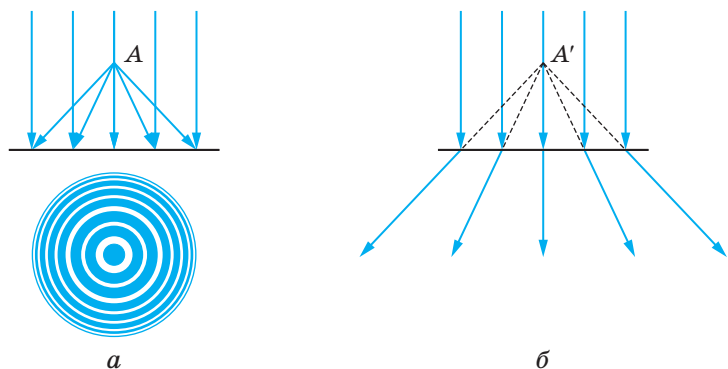


Рис. П.2.1

Совокупность большого числа точек, принадлежащих какому-либо предмету, имеющему пространственную протяжённость, даёт при записи голограммы накладываются друг на друга системы колец. В результате на фотопластинке возникает сложная, на первый взгляд бессмысленная, картина, которая, однако, при освещении её монохроматическим светом воспроизводит изображение этого предмета.

Схема установки для записи голограммы приведена на рис. П.2.2. Пучок света лазера, расширенный специальной оптической системой, падает на плоское зеркало и на предмет, голограмма которого записывается. Отразившись от зеркала, лучи света образуют так называемый **опорный пучок** и направляются на фотопластинку, на которую одновременно с ними попадают лучи, рассеянные предметом, — **предметный пучок**. Поскольку от предмета лучи отражаются диффузно, т. е. по всем направлениям, свет, отражённый от каждой его точки, достигает каждой точки фотопластинки. Таким образом,



информация о любой точке предмета будет содержаться в любой точке голограммы.

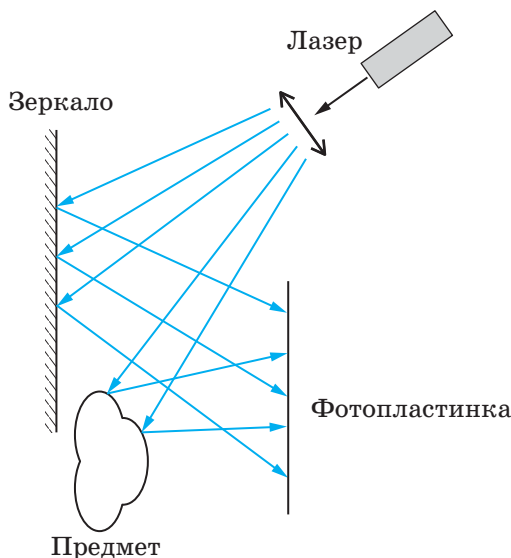


Рис. П.2.2

Воспроизвести изображение предмета можно на той же установке. Фотопластинка — голограмма предмета — выступает в роли окна, через которое мы рассматриваем предмет (рис. П.2.3). Поэтому, выбирая разные позиции для наблюдения или поворачивая саму голограмму, этот предмет можно видеть с разных сторон в пределах этого «окна», т. е. предмет представляется на голограмме в объёмном виде. В этом состоит принципиальное отличие голограммы от фотографии, дающей плоское изображение предмета.

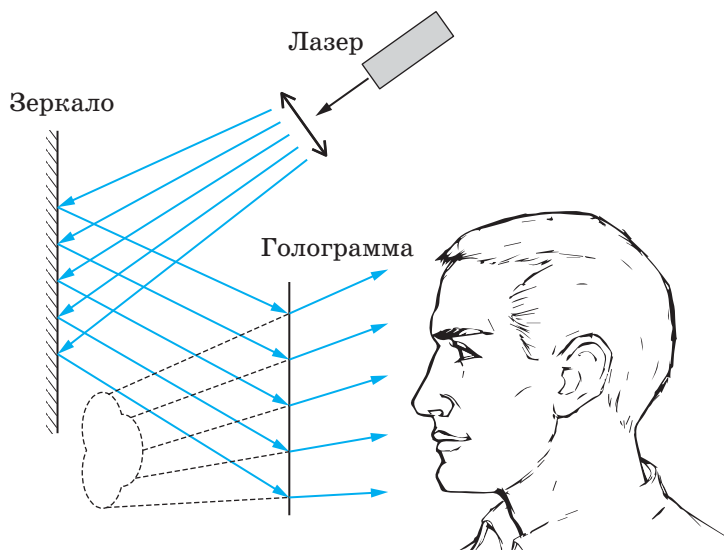


Рис. П.2.3

Если голограмму записать на фотопластинке с толстым слоем фотоэмульсии — в десятки длин световых волн, то её можно рассматривать при естественном освещении. Изображение предмета будет в этом случае цветным. Этот способ записи был разработан советским физиком Ю. Н. Денисюком.

Голограмма принципиально отличается от фотографии ещё и тем, что если её разбить на части, то через любую из них будет виден весь предмет с той только разницей, что чем меньше размер части, тем меньше «окно» и хуже качество изображения.



## Ответы

### с. 13

1.  $v_{\text{ср}} = 24,8 \text{ км/ч.}$
2.  $x_0 = 150 \text{ км, } t_0 = 2,5 \text{ ч.}$
3.  $t = 115 \text{ с, } \beta = 60^\circ.$

### с. 16

1.  $a = 6 \text{ м/с}^2, v_0 = 3 \text{ м/с.}$
2.  $a = 0,05 \text{ м/с}^2, t = 53 \text{ с.}$
3.  $h = 1238 \text{ м, } v = -159 \text{ м/с.}$

### с. 19

1.  $t_1 = 2,8 \text{ с, } h_2 = 40 \text{ м.}$
2.  $t_0 = 1,5 \text{ с.}$
3.  $h_{\text{max}} = 6 \text{ м, } \alpha = 30^\circ,$   
 $l = 42 \text{ м.}$

### с. 22

1.  $v_1 = 465 \text{ м/с,}$   
 $a_{\text{ц1}} = 3,4 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2,$   
 $v_2 = 233 \text{ м/с,}$   
 $a_{\text{ц2}} = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2.$
2. Увеличится в 8 раз.
3.  $n = 1,59 \text{ об/с.}$

### с. 25

1.  $V = 0,13 \text{ л.}$
2.  $F = 0,4 \text{ Н.}$
3.  $m = 1 \text{ кг.}$

### с. 27

1.  $F_{\text{сопр}} = 800 \text{ Н.}$
2.  $F_{\text{тр}} = 6 \text{ кН, } t = 50 \text{ с,}$   
 $s = 375 \text{ м.}$
3.  $a = 3,3 \text{ м/с}^2, T = 3,3 \text{ Н.}$

### с. 30

1.  $V = 0,5 \text{ м/с, } s = 120 \text{ м.}$
2.  $t_2 = 1,6 \text{ ч.}$

### с. 31

1.  $v_0 = 7,5 \text{ м/с.}$

2.  $a > 2 \text{ м/с}^2.$

3.  $\alpha_{\text{max}} = 11,3^\circ.$

### с. 33

1.  $k = 100 \text{ Н/м.}$
2.  $l = 0,125 \text{ м.}$

### с. 35

1.  $M = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг,}$   
 $\rho = 5,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$
2.  $T = 3,2 \cdot 10^7 \text{ с (1 год),}$   
 $v = 29,8 \text{ км/с.}$
3.  $T_1 = 1,55 \text{ ч, } v_1 = 7,67 \text{ км/с,}$   
 $T_2 = 1,62 \text{ ч, } v_2 = 7,56 \text{ км/с,}$   
 $\frac{T_2}{T_1} = 1,05.$  Увеличится на 5%.

### с. 37

1.  $A = 3 \cdot 10^5 \text{ Дж.}$
2.  $\sin a = 0,306, a = 17^\circ.$
3.  $P = 100 \text{ кВт.}$

### с. 38

1.  $K = 480 \text{ Дж.}$
2.  $A_2 = 420 \text{ кДж.}$
3.  $F = 25 \text{ кН.}$

### с. 42

1.  $v = 4 \text{ м/с.}$
2.  $P = 490 \text{ кВт.}$
3.  $A_{\text{тр}} = 3,8 \text{ кДж.}$

### с. 44

1.  $K = 0,18 \text{ Дж.}$
2.  $s = 0,07 \text{ м.}$
3.  $x = 0,27 \text{ м.}$

### с. 47

1. Нейтрон передаёт атому замедлителя 28 % своей



энергии. Эта доля тем больше, чем меньше разница в массах частиц.

**с. 50**

1.  $x = 1,9$  см.

2.  $F = 50$  Н.

**с. 53**

1.  $F_1 = 100$  Н,  $F_2 = 60$  Н.

2.  $F = 67$  Н.

3.  $F_A = 6 \cdot 10^3$  Н,  $F_B = 9 \cdot 10^3$  Н.

**с. 57**

1.  $h_1 = 4$  см,  $h_2 = 1$  см.

2.  $h = 4,7$  см.

3.  $F_2 = 9,8 \cdot 10^4$  Н,  $h_2 = 1$  мм.

**с. 60**

1.  $x = 5,2$  см.

2.  $\rho = 2,4$  г/см<sup>3</sup>.

**с. 66**

1.  $v = 0,5$  Гц.

2. Период уменьшится в 2 раза.

3.  $l_1 = 16$  см,  $l_2 = 9$  см.

**с. 68**

1.  $v_{\max} = 4,8 \cdot 10^{-2}$  м/с.

2.  $K_{\max} = 0,44$  Дж.

3.  $a = 3g$ .

**с. 72**

1.  $v = 21$  м/с.

**с. 75**

1.  $s = 0,28$  м.

2. Скорость катера  $V = 15$  м/с, скорость волны  $v = 5$  м/с.

**с. 78**

1.  $\lambda_{\min} = 1,65 \cdot 10^{-2}$  м,

$\lambda_{\max} = 21$  м.

2.  $v_{\max} = 0,785$  м/с,  
 $v = 350$  м/с.

**с. 87**

1.  $\bar{v}_2 = \sqrt{2} \cdot \bar{v}_1$ .

**с. 89**

1.  $V = 2,3$  л.

2.  $p_2 = 3,2 \cdot 10^5$  Па.

3.  $p_1 = 40$  атм.

**с. 93**

1.  $p_2 = 1,54 \cdot 10^5$  Па.

2.  $T_1 = 308$  К,  $t_1 = 35$  °С.

3.  $t_2 = 166$  °С.

**с. 96**

1.  $c = 860 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ .

2.  $\eta = 34,2\%$ .

**с. 100**

1.  $A = 166$  кДж,  $\Delta U = 0$ .

2.  $\Delta T = 58$  К.

**с. 104**

1.  $\eta = 20\%$ ,  $A = 1,26$  Дж.

2.  $\eta = 18\%$ .

**с. 107**

1.  $m_{\text{п}} = 0,07$  кг.

**с. 109**

1.  $D_2 = 43\%$ .

2.  $m = 510$  г.

**с. 111**

1.  $\tau = 2,1 \cdot 10^3$  с = 35 мин.

**с. 115**

1.  $m = 5,7 \cdot 10^{-19}$  г,  
 $\gamma = 5,7 \cdot 10^{-15}$ .

**с. 117**

1.  $r = 1,72$  м.







2. На расстоянии  $x = 2$  см от большего заряда. Равновесие заряда  $q$  неустойчивое.

**с. 120**

1.  $E = 100 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ .

2.  $s = 2,35$  см,  $t = 47$  нс.

**с. 123**

1.  $\varphi_R = 2,02$  кВ.

2.  $r_{\min} = 6$  см.

**с. 124**

1.  $\varphi'_1 = \varphi'_2 = 77$  В,

$\Delta q = 0,24$  нКл. Поскольку  $\varphi_1 > \varphi'_1$ , заряд первого шара уменьшается, а второго — увеличивается.

2.  $\varphi_R = 4$  В.

**с. 128**

1.  $U_2 = 400$  В.

2.  $q_1 = q_2 = 1,5 \cdot 10^{-4}$  Кл,  
 $U_1 = 150$  В,  $U_2 = 50$  В.

3.  $Q = 0,25$  Дж,  $U = 500$  В.

**с. 130**

1.  $C = 2,5$  мкФ.

2.  $U = 260$  В.

3.  $\Delta W = 3,3 \cdot 10^{-6}$  Дж.

**с. 133**

1.  $\varepsilon = 2,2$ .

2.  $\Delta q = 1,2 \cdot 10^{-5}$  Кл,  
 $\Delta W = 8,4 \cdot 10^{-3}$  Дж.

3.  $d = 1$  мм.

**с. 136**

1.  $N = 6,25 \cdot 10^{18}$ .

**с. 139**

1.  $I = 1,2$  А,  $U_R = 10,8$  В,

$U_r = 1,2$  В.

2.  $R = 8$  Ом,  $l = 14,5$  м.

3.  $I_{\max} = 5,5$  А.

**с. 141**

1.  $R_1 = 10$  Ом,  $R_2 = 30$  Ом.

2.  $R_{\text{ш}} = 0,05$  Ом.

**с. 143**

1.  $\mathcal{E} = 12$  В,  $r = 2$  Ом.

2.  $P_1 = 14,6$  Вт,  $P_1 = 9,8$  Вт.

**с. 149**

1. К наблюдателю.

**с. 152**

1.  $F_L = 3,2 \cdot 10^{-23}$  Н,  
 $a = 3,5 \cdot 10^7$  м/с<sup>2</sup>.

2.  $B = 0,04$  Тл,  $A = 5 \cdot 10^{-3}$  Дж.

3.  $F_{ab} = F_{cd} = 10^{-3}$  Н. Плоскость рамки расположится перпендикулярно линиям  $\vec{B}$ .

**с. 155**

1.  $B = 5,7 \cdot 10^{-3}$  Тл.

2.  $R = 3,6$  см,  
 $n = 1,5 \cdot 10^6$  об/с.

**с. 159**

1.  $U = 0,61$  В.

2.  $\varepsilon_{\text{инд}} = 0,018$  В.

3.  $\varepsilon_{\text{инд}} = 400$  В.

**с. 163**

1.  $\Delta t = 91,2$  с.

2.  $S = 0,014$  м<sup>2</sup>.

3.  $Z = 70$  Ом.

**с. 164**

1.  $t = 0,01$  с.

2.  $W_M = 2,5$  Дж.

**с. 166**

1.  $L = 5,1$  мкГн.



2. Частота колебаний возрастает в 2 раза.

3.  $I = 1,96$  мА.

**с. 168**

1.  $\lambda_{\min} = 60$  м,  $\lambda_{\max} = 188$  м.

2.  $s = 30$  км.

3.  $N = 5000$ .

**с. 175**

1.  $A_1 A'_1 = 30$  см.

2. Увеличился на  $\Delta\theta = 40^\circ$ .

3.  $\operatorname{tg} \alpha = 1,6$ ,  $\alpha = 58^\circ$ .

**с. 180**

1.  $a' = 50$  см, изображение увеличенное действительное, перевёрнутое.

2.  $D = 20$  дптр.

**с. 182**

1.  $k_1 = 12,5$ ,  $k_2 = 7,5$ .

2.  $D = 2$  дптр.

3. Уменьшается на 3,5 дптр.

**с. 188**

1.  $D = 0,91$  м.

2.  $\frac{\Delta x_2}{\Delta x_1} = 1,3$ .

**с. 193**

1.  $\varphi_1 = 11^\circ 50'$ ,  $\varphi_2 = 24^\circ 12'$ ,  
 $\varphi_3 = 37^\circ 57'$ ,  $\varphi_4 = 55^\circ 04'$ .

2.  $\lambda = 0,7$  мкм.

3.  $\lambda_3 = 467$  нм.

**с. 198**

1.  $t = 38$  нс.

2.  $v_1 = 2,96 \cdot 10^8$  м/с,  
 $v_2 = 1,07 \cdot 10^8$  м/с.

**с. 201**

1.  $v = 2,985 \cdot 10^8$  м/с.

2.  $\Delta m = 0,217$  кг.

3.  $\Delta t = 7,2 \cdot 10^{12}$  лет.

**с. 208**

1.  $A = 4,51$  эВ,

$v_{\max} = 9 \cdot 10^5$  м/с.

2.  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

3.  $R = 3,7$  см.

**с. 213**

1.  $N = 1,2 \cdot 10^{21}$ .

2.  $v = 9,3 \cdot 10^5$  м/с.

3.  $U = 41$  кВ.

**с. 216**

1.  $\rho_{\max} = 3,43 \cdot 10^{-25}$  кг·(м/с).

2. На белую поверхность давление в 2 раза больше.

**с. 221**

1.  $\lambda_{23} = 5,4 \lambda_{12}$ .

**с. 226**

1.  $\lambda = 6,3 \cdot 10^{-7}$  м.

2.  $W = 12,1$  эВ,  $\lambda_1 = 102$  нм,  
 $\lambda_2 = 121$  нм,  $\lambda_3 = 655$  нм.

**с. 229**

1.  $\lambda_{\text{Бе}} = 0,12$  нм,  $\lambda_{\text{Бр}} = \frac{\lambda_{\text{Бе}}}{43}$ .

2.  $K = 2,6 \cdot 10^{-3}$  эВ.

**с. 259**

1.  $Z = 92$ ,  $N = 143$ .

**с. 261**

1.  $t = 960$  ч.

2.  $\lambda = 2,3 \cdot 10^{-6}$  с $^{-1}$ ,  $T = 83$  ч.

3.  $m = 0,22$  мг.



# Предметный указатель

Амплитуда колебаний 62  
Влажность воздуха 108  
Второе начало  
    термодинамики 104  
Давление 54, 87, 169, 214  
Дефект массы 201, 262  
Диаграмма состояния 90  
Дисперсия света 174  
Дифракционная  
    решётка 191  
Дифракция 188  
Диффузия 83  
Диэлектрическая  
    проницаемость 132  
Длина волны 74  
    • де Бройля 227  
Ёмкость конденсатора 125,  
    132  
Закон  
    • Архимеда 59  
    • Бугера 238  
    • всемирного тяготения 34  
    • Гука 32  
    • Дальтона 88  
    • Джоуля — Ленца 142  
    • Кулона 116, 132  
    • Ньютона 26, 43  
    • Ома 137, 138  
    • отражения света 173  
    • Паскаля 55  
    • преломления света 173  
    • прямолинейного  
        распространения  
        света 173

- радиоактивного  
    распада 259
- сложения скоростей 29,  
    197
- сохранения заряда 115
- сохранения импульса 43
- сохранения энергии 41
- Фарадея 156

Заряд конденсатора 125  
Золотое правило  
    механики 48, 57  
Импульс  
    • тела 43  
    • фотона 210  
Индуктивность 160  
Интерференция 183  
Колебания  
    • вынужденные 70  
    • гармонические 61  
    • затухающие 69  
Количество  
    • вещества 88  
    • теплоты 94  
Конденсатор 125  
Коэффициент  
    • отражения 171  
    • отражения света 214  
    • полезного действия 102,  
        143  
Красная граница  
    фотоэффекта 207  
Магнитный поток 156, 160  
Масса 24  
Массовое число 258  
Молярная масса 88



Момент импульса 223

Мощность

- источника тока 143
- тока 142

Напряжение

- задерживающее 207
- пробоя 130

Напряжённость

- электрического поля 118, 123

Насыщенный пар 108

Первое начало

термодинамики 97

Период 154

- вращения 21
- колебаний 62
- обращения 21
- полураспада 260
- электромагнитных колебаний 166

Плечо силы 51

Плотность

- вещества 24
- энергии магнитного поля 164
- энергии электромагнитного поля 171

Постоянная

- распада 260
- Ридберга 225
- универсальная газовая 88
- электрическая 116

Потенциал электрического поля 121

Правило

- левой руки 150

• Ленца 157

- многоугольника 271
- параллелограмма 271
- правого винта 147
- сложения векторов 270

Преобразование

- Галилея 28
- Лоренца 196

Принцип

- Гюйгенса 189
- относительности Галилея 29
- относительности Эйнштейна 195
- Паули 234, 244
- постоянства скорости света 195
- суперпозиции 24, 118, 185

Проводник 123, 246

Протон 217, 258

Процесс

- адиабатный 98
- изобарный 91
- изотермический 91
- изохорный 92
- циклический 92

Работа 102

- выхода 205
- кулоновской силы 142
- постоянной силы 36

Разность потенциалов 121

Сила 24

- Ампера 150
- взаимодействия двух параллельных прямолинейных проводников 151
- гармоническая 61





- консервативная 39
  - кулоновская 121
  - Лоренца 150
  - оптическая 179
  - тока 136
  - трения 31
  - упругости 32
- Скорость
- волны 74
  - линейная 21
  - первая космическая 34
  - тела 12
  - угловая 20
  - электромагнитной волны 168
- Соотношения  
неопределённости  
Гейзенберга 232
- Температура 85
- Теория Бора 222
- Тепловая машина 101
- Точка росы 109
- Удельная
- теплоёмкость 95
  - теплота  
парообразования 107
  - теплота плавления 110
- Упругая деформация 32
- Уравнение
- Клапейрона —  
Менделеева 88
  - состояния идеального  
газа 87
  - теплового баланса 95
  - Эйнштейна 205
- Ускорение тела 14
- Условие
- максимума  
интенсивности 192
  - максимумов 230
  - ослабления света 186
  - плавления тел 59
  - равновесия 48, 52
  - усиления света 185
- Фаза колебаний 64
- Фазовый переход 106
- Фокус линзы 176
- Формула
- Бальмера 220
  - линзы 177
  - Эйнштейна 200
- Центр масс тела 50
- Центростремительное  
ускорение 21
- Частота
- звука 76
  - колебаний 62
  - циклическая 63
- ЭДС 135, 157, 160
- Электрический ток 134
- Электрическое поле 118
- Электромагнитная волна 167
- Электропроводность 141
- Энергия 68, 200, 209, 224
- внутренняя 94
  - заряженного  
конденсатора 127, 132
  - кинетическая 38
  - магнитного поля 163
  - потенциальная 40
- Эффект
- фотоэлектрический 205
- Ядро 257



# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>6</b>
-----------------------	----------

## 1. МЕХАНИКА

1.1. Кинематика .....	10
1.1.1. Равномерное прямолинейное движение .....	10
1.1.2. Равноускоренное прямолинейное движение .....	14
1.1.3. Движение в однородном поле тяжести .....	17
1.1.4. Вращательное движение .....	20
1.2. Динамика .....	23
1.2.1. Масса, плотность вещества, сила .....	24
1.2.2. Инерциальные системы отсчёта. Законы Ньютона .....	26
1.2.3. Принцип относительности Галилея .....	28
1.2.4. Сила трения .....	30
1.2.5. Сила упругости. Закон Гука .....	32
1.2.6. Сила тяжести. Закон всемирного тяготения. ....	34
1.3. Законы сохранения в механике .....	36
1.3.1. Механическая работа и мощность .....	36
1.3.2. Кинетическая энергия .....	38
1.3.3. Потенциальная энергия. Закон сохранения энергии в механике .....	39
1.3.4. Импульс тела. Закон сохранения импульса .....	43
1.3.5. Упругое соударение тел .....	45
1.4. Статика .....	47
1.4.1. Простые механизмы. Золотое правило механики .....	47
1.4.2. Момент силы. Условия равновесия твёрдого тела .....	50
1.4.3. Гидростатика .....	54
1.4.4. Плавание тел. Закон Архимеда .....	59
1.5. Гармонические колебания .....	60
1.5.1. Амплитуда, фаза, период и частота гармонических колебаний .....	61
1.5.2. Энергия гармонического осциллятора .....	67
1.5.3. Затухающие колебания .....	69
1.5.4. Вынужденные колебания. Резонанс .....	70
1.6. Волны в упругой среде .....	72
1.6.1. Механизм образования волн в упругой среде .....	72
1.6.2. Звуковые волны .....	75





## 2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

2.1. Молекулярная физика.....	80
2.1.1. Модели строения тел. Газы, жидкости и твёрдые тела .....	81
2.1.2. Внутренняя энергия и температура.....	84
2.1.3. Уравнение состояния идеального газа.....	87
2.2. Термодинамика	
2.2.1. Диаграммы состояния термодинамической системы. Виды процессов .....	90
2.2.2. Количество теплоты. Удельная теплоёмкость тел.....	94
2.2.3. Первое начало термодинамики. Закон сохранения энергии в тепловых процессах.....	97
2.2.4. Принцип работы тепловой машины. Второе начало термодинамики .....	101
2.3. Изменение агрегатного состояния тел.....	105
2.3.1. Испарение и конденсация .....	106
2.3.2. Влажность воздуха .....	108
2.3.3. Плавление и кристаллизация .....	110

## 3. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

3.1. Электростатика .....	113
3.1.1. Электризация тел. Два рода зарядов.....	114
3.1.2. Закон сохранения заряда.....	115
3.1.3. Закон Кулона .....	116
3.1.4. Напряжённость электрического поля. Графическое изображение полей .....	118
3.1.5. Потенциал электрического поля.....	121
3.1.6. Проводники в электрическом поле.....	123
3.1.7. Электрическая ёмкость и энергия заряженного конденсатора.....	125
3.1.8. Соединение конденсаторов.....	129
3.1.9. Диэлектрики в электрическом поле .....	131
3.2. Постоянный электрический ток .....	134
3.2.1. Сила тока. Электродвижущая сила источника тока.....	134
3.2.2. Закон Ома. Электрическое сопротивление проводника .....	137
3.2.3. Соединение проводников .....	140
3.2.4. Работа и мощность тока. Закон Джоуля — Ленца .....	142
3.3. Магнитное поле .....	144
3.3.1. Взаимодействие магнитов. Магнитное поле .....	145



3.3.2. Магнитное поле тока .....	146
3.3.3. Силы, действующие в магнитном поле на движущиеся заряды и токи .....	150
3.3.4. Движение заряженных частиц в магнитном поле.....	154
3.4. Явление электромагнитной индукции.....	156
3.4.1. Закон Фарадея. Магнитный поток.....	156
3.4.2. Явление самоиндукции.....	160
3.4.3. Энергия магнитного поля .....	163
3.5. Электромагнитное поле .....	164
3.5.1. Электромагнитные колебания .....	165
3.5.2. Электромагнитное поле.....	167
3.5.3. Давление электромагнитной волны.....	169

#### 4. ОПТИКА

4.1. Геометрическая оптика.....	173
4.1.1. Прямолинейное распространение, отражение и преломление света .....	173
4.1.2. Собирающая линза.....	176
4.1.3. Оптические приборы .....	180
4.2. Интерференция света.....	183
4.2.1. Интерференция световых волн.....	183
4.3. Дифракция света .....	188
4.3.1. Принцип Гюйгенса.....	189
4.3.2. Дифракция света на дифракционной решётке.....	191
4.4. Специальная теория относительности.....	194
4.4.1. Постулаты теории относительности .....	194
4.4.2. Относительность одновременности и пространственного расстояния.....	195
4.4.3. Преобразование Лоренца.....	196
4.4.4. Закон сложения скоростей.....	197
4.4.5. Масса и энергия в специальной теории относительности.....	199
4.4.6. Закон сохранения импульса и энергии .....	202

#### 5. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

5.1. Фотоны .....	205
5.1.1. Фотоэлектрический эффект .....	205
5.1.2. Фотоны .....	209
5.1.3. Давление света с корпускулярной точки зрения.....	214
5.2. Строение атома .....	216
5.2.1. Опыты по рассеянию $\alpha$ -частиц веществом .....	217







5.2.2. Закономерности в спектре излучения атомарного водорода.....	219
5.2.3. Теория Бора водородоподобного атома .....	221
5.3. Корпускулярно-волновой дуализм свойств микрочастиц.....	227
5.3.1. Гипотеза де Бройля.....	227
5.3.2. Опыты Дэвиссона и Джермера по обоснованию корпускулярно-волнового дуализма свойств микрочастиц .....	229
5.3.3. Соотношения неопределённостей Гейзенберга .....	231
5.3.4. Спин электрона. Принцип Паули .....	233
5.4. Вынужденное излучение света .....	235
5.4.1. Спонтанное и вынужденное излучение света.....	236
5.4.2. Инверсная населённость уровней. Отрицательное поглощение света .....	238
5.4.3. Трёхуровневая схема. Лазер на рубине .....	240
5.5. Электропроводность твёрдых тел.....	243
5.5.1. Элементы зонной теории электропроводности твёрдых тел.....	244
5.5.2. Электропроводность полупроводников .....	248
5.5.3. Принцип работы полупроводникового выпрямителя...	252
5.6. Атомное ядро.....	257
5.6.1. Заряд, масса и размер ядер атомов.....	257
5.6.2. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада.....	259
5.6.3. Энергия связи ядер.....	262
5.6.4. Получение ядерной энергии. Цепная ядерная реакция .....	264
5.6.5. Ядерные реакторы.....	266
5.6.6. Термоядерные реакции. Проблема управляемого термоядерного синтеза.....	268
<b>Приложения</b> .....	270
Приложение 1. Векторные величины в физике.....	270
Приложение 2. Принципы голографии .....	274
<b>Ответы</b> .....	278
<b>Предметный указатель</b> .....	282

# СУПЕРМОБИЛЬНЫЙ СПРАВОЧНИК

Приводятся все темы,  
проверяемые на ЕГЭ по физике,  
и задания для самоконтроля  
с возможностью быстро проверить ответ  
и получить дополнительную информацию.

## ФИЗИКА

Установите любое бесплатное приложение  
для считывания QR-кодов, и вы получите  
мгновенный доступ к дополнительной  
информации и подробным  
комментариям к ответам!

**Эффективно и современно!**

