

**Все темы
ОГЭ и ЕГЭ**

**СПРАВОЧНИК
ШКОЛЬНИКА**

**7-11
классы**

Физика

Доступное объяснение
всех тем школьного курса

Понятия, законы и формулы

Наглядные схемы и таблицы

Вопросы и типовые задания
в форме ОГЭ и ЕГЭ с ответами





СПРАВОЧНИК ШКОЛЬНИКА

Все темы ОГЭ и ЕГЭ

7-11
классы

А.В. Попов

Физика



Москва
2017

УДК 373:53
ББК 22.3я721
П58

Попов, Анатолий Васильевич.

П58 Физика / А. В. Попов. — Москва : Эксмо, 2017. — 352 с. —
(Справочник школьника. Все темы ОГЭ и ЕГЭ: 5—11 классы).

ISBN 978-5-699-95853-5

Справочник содержит сведения по всем темам, проверяемым на ОГЭ и ЕГЭ по физике. По каждому разделу приводится перечень необходимых понятий, физические законы, формулы, доступное объяснение тем, а также вопросы и типовые задания ОГЭ и ЕГЭ с ответами.

Справочник поможет актуализировать знания для успешной сдачи экзаменов, а также подготовиться к различным формам текущего контроля в процессе изучения физики на уроках.

Издание предназначено для учащихся 7—11 классов и учителей.

**УДК 373:53
ББК 22.3я721**

ISBN 978-5-699-95853-5

© Попов А.В., 2017
© Оформление. ООО «Издательство «Эксмо», 2017

Содержание

Предисловие	7
-------------------	---

1. МЕХАНИКА

1.1. КИНЕМАТИКА	10
1.1.1. Равномерное прямолинейное движение	11
1.1.2. Равноускоренное прямолинейное движение	15
1.1.3. Движение в однородном поле тяжести	18
1.1.4. Вращательное движение	22
1.2. ДИНАМИКА	26
1.2.1. Масса, плотность вещества, сила	26
1.2.2. Инерциальные системы отсчёта. Законы Ньютона	29
1.2.3. Принцип относительности Галилея	32
1.2.4. Сила трения	34
1.2.5. Сила упругости. Закон Гука	37
1.2.6. Сила тяжести. Закон всемирного тяготения	39
1.2.7. Явление невесомости. Искусственные спутники Земли	42
1.3. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ	45
1.3.1. Механическая работа и мощность	45
1.3.2. Кинетическая энергия	48
1.3.3. Потенциальная энергия. Закон сохранения энергии в механике	50
1.3.4. Импульс тела. Закон сохранения импульса	54
1.3.5. Упругое соударение тел	57
1.4. СТАТИКА	59
1.4.1. Простые механизмы. Золотое правило механики	59
1.4.2. Момент силы. Условия равновесия твёрдого тела	65
1.4.3. Гидростатика	68
1.4.4. Плавание тел. Закон Архимеда	74
1.5. ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ	76
1.5.1. Амплитуда, фаза, период и частота гармонических колебаний	76
1.5.2. Энергия гармонического осциллятора	81

1.5.3. Затухающие колебания	84
1.5.4. Вынужденные колебания. Резонанс	85
1.6. ВОЛНЫ В УПРУГОЙ СРЕДЕ	88
1.6.1. Механизм образования волн в упругой среде	88
1.6.2. Звуковые волны	93

2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

2.1. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА	97
2.1.1. Модели строения тел. Газы, жидкости и твёрдые тела	98
2.1.2. Внутренняя энергия и температура	101
2.1.3. Уравнение состояния идеального газа	104
2.2. ТЕРМОДИНАМИКА	108
2.2.1. Диаграммы состояния термодинамической системы. Виды процессов ...	108
2.2.2. Количество теплоты. Удельная теплоёмкость тел	112
2.2.3. Первое начало термодинамики. Закон сохранения энергии в тепловых процессах	116
2.2.4. Принцип работы тепловой машины. Второе начало термодинамики	120
2.3. ИЗМЕНЕНИЕ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ ТЕЛ	124
2.3.1. Испарение и конденсация. Кипение жидкости	125
2.3.2. Влажность воздуха	127
2.3.3. Плавление и кристаллизация	130

3. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

3.1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА	134
3.1.1. Электризация тел. Два рода зарядов	134
3.1.2. Закон сохранения заряда	136
3.1.3. Закон Кулона	137
3.1.4. Напряжённость электрического поля. Графическое изображение полей	139
3.1.5. Потенциал электрического поля	143
3.1.6. Проводники в электрическом поле	146
3.1.7. Электрическая ёмкость и энергия заряженного конденсатора	150
3.1.8. Соединение конденсаторов	154
3.1.9. Диэлектрики в электрическом поле	158
3.2. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК	162
3.2.1. Сила тока. Электродвижущая сила источника тока	162
3.2.2. Закон Ома. Электрическое сопротивление проводника	165
3.2.3. Соединение проводников	168
3.2.4. Работа и мощность тока. Закон Джоуля — Ленца	172
3.3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ	175
3.3.1. Взаимодействие магнитов. Магнитное поле	176
3.3.2. Опыт Эрстеда. Магнитное поле тока	178

3.3.3. Силы, действующие в магнитном поле на движущиеся заряды и токи	181
3.3.4. Сила взаимодействия двух параллельных проводников. Единица силы тока — ампер	185
3.3.5. Движение заряженных частиц в магнитном поле. Принцип работы циклотрона	186
3.4. ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ	190
3.4.1. Явление электромагнитной индукции. Опыты Фарадея	190
3.4.2. Закон Фарадея. Магнитный поток	191
3.4.3. Правило Ленца	195
3.4.4. Явление самоиндукции	197
3.4.5. Вихревые токи, или токи Фуко	200
3.4.6. Энергия магнитного поля	201
3.5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ	204
3.5.1. Электрический колебательный контур	204
3.5.2. Электромагнитное поле	208
3.5.3. Излучение электромагнитных волн. Опыты Герца	211
3.5.4. Давление электромагнитной волны. Опыты Лебедева по измерению давления света	213
3.5.5. Изобретение радиотелеграфа А. С. Поповым в России	216

4. ОПТИКА

4.1. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА	219
4.1.1. Прямолинейное распространение, отражение и преломление света	219
4.1.2. Дисперсия света	224
4.1.3. Собирающая линза	225
4.1.4. Рассеивающая линза	231
4.1.5. Глаз как оптическая система	234
4.1.6. Оптические приборы	237
4.2. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА	239
4.2.1. Интерференция световых волн	239
4.2.2. Интерференция света от двух точечных источников	242
4.2.3. Бипризма Френеля	245
4.2.4. Применение явления интерференции	247
4.3. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА	250
4.3.1. Принцип Гюйгенса. Метод зон Френеля	250
4.3.2. Дифракция света на дифракционной решётке	253
4.4. СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	258
4.4.1. Постулаты теории относительности	258
4.4.2. Относительность одновременности и пространственного расстояния . .	260
4.4.3. Преобразование Лоренца	262
4.4.4. Закон сложения скоростей. Опыт Физо	263
4.4.5. Масса и энергия в специальной теории относительности	266
4.4.6. Закон сохранения импульса и энергии	271

5. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

5.1. ФОТОНЫ	275
5.1.1. Фотоэлектрический эффект	275
5.1.2. Опыт Боте. Фотоны	281
5.1.3. Давление света с корпускулярной точки зрения	285
5.2. СТРОЕНИЕ АТОМА	288
5.2.1. Опыты по рассеянию α -частиц веществом	289
5.2.2. Закономерности в спектре излучения атомарного водорода	290
5.2.3. Теория Бора для водородоподобного атома	293
5.3. КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ СВОЙСТВ МИКРОЧАСТИЦ	298
5.3.1. Гипотеза де Бройля	299
5.3.2. Опыты Дэвиссона и Джермера по обоснованию корпускулярно-волнового дуализма свойств микрочастиц	302
5.3.3. Соотношения неопределённостей Гейзенберга	305
5.3.4. Спин электрона. Принцип Паули	307
5.4. ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СВЕТА	309
5.4.1. Спонтанное и вынужденное излучение света	309
5.4.2. Инверсная населенность уровней. Отрицательное поглощение света	312
5.4.3. Трёхуровневая схема. Лазер на рубине	313
5.5. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЁРДЫХ ТЕЛ	317
5.5.1. Элементы зонной теории электропроводности твёрдых тел	317
5.5.2. Электропроводность полупроводников	321
5.5.3. Принцип работы полупроводникового выпрямителя	324
5.6. АТОМНОЕ ЯДРО	327
5.6.1. Заряд, масса и размер ядер атомов	328
5.6.2. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада	330
5.6.3. Энергия связи ядер	334
5.6.4. Получение ядерной энергии. Цепная ядерная реакция	335
5.6.5. Ядерные реакторы	338
5.6.6. Термоядерные реакции. Проблема управляемого термоядерного синтеза	341

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Векторные величины в физике	344
2. Принципы голографии	346
3. Тормозное рентгеновское излучение	349

Предисловие

Уважаемый читатель!

В ваших руках — справочник, который станет помощником при обучении в 5–11 классах, поможет сдать экзамены, даст возможность без труда поступить в вуз.

В этом справочнике вы найдёте теоретический материал по всем темам, которые проверяются на ОГЭ и ЕГЭ. Для итогового контроля при освоении каждой темы в справочнике приведены типовые вопросы, организованные как задания в учебнике, на ОГЭ и ЕГЭ. Перечень вопросов охватывает все разделы школьного курса — механику, молекулярную физику, электродинамику, оптику, физику атома и атомного ядра.

В начале каждого раздела приводятся определения понятий, составляющих его основу. Теоретический материал разделён на три части. В первой из них даны определения величин и формулировки законов. Во второй части дается их подробное разъяснение, а в третьей, где это возможно, — примеры решения задач. Такое разделение позволяет быстро отыскать нужные формулы, вспомнить определения и научиться решать задачи. Разбор ряда задач содержит дополнительные сведения и как бы продолжает изложение материала, начатое в теоретической части.

Решение задач — применение полученных знаний на практике — конечная цель всякого обучения. Поэтому вопросы, предлагаемые на ЕГЭ и ОГЭ, формулируются главным образом в виде задач: даже те из них, в которых нужно выбрать один из вариантов ответа, требуют решения.

В конце справочника приведён тематический указатель, который поможет легко найти интересующую вас информацию.

как пользоваться справочником

Повторяем термины

Вспоминаем определения и формулы

1. МЕХАНИКА

Движение — природное свойство материи. Простейшая его форма — перемещение тел относительно друг 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*.

● **Основные понятия**

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. Если форма и размеры твёрдого тела не существенны для решения данной задачи, его называют **материальной точкой**.

Языком физики служат **математика**. На языке математики сформулированы законы механики, позволяющие решать её задачи. Механика использует понятие **поля** — области пространства, в которой на материальное тело действует сила.

Гравитационное поле (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 предсказывать лунные и солнечные затмения, определять 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. КИНЕМАТИКА

1.1.1. Равномерное прямолинейное движение

● **Определения и основные формулы**

- **Механическое движение** — перемещение тел друг относительно друга.
- **Материальная точка** — тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.
- **Прямолинейное движение** — движение тела вдоль прямой линии, которую принимают за координатную ось X .
- **Координата тела** — расстояние от начала координат до тела в данный момент времени. Координата — функция времени: $x = x(t)$.
- **Число степеней свободы тела** — число независимых координат, определяющих его положение в пространстве.
- **Траектория движения тела** — линия, которую оно описывает в пространстве при своём движении.
- **Путь s** — длина отрезка траектории, пройденного телом за время t .
- **Скорость тела** — быстрота изменения его координаты со временем:
$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1.1)$$
- **Среднее значение скорости тела** — отношение пройденного пути ко времени, за которое он был пройден:
$$v_{cp} = \frac{s}{t} \quad (1.2)$$
- **Путь и координата тела** при равномерном прямолинейном движении:
$$s = x - x_0 = vt, \quad (v = \text{const}), \quad (1.3)$$
 где x_0 — начальная координата (при $t = 0$).

● **Единицы измерения**

- Координата тела и путь в системе СИ измеряются в **метрах**: $[x] = [s] = \text{м}$.
- Скорость измеряется в **метрах в секунду**: $[v] = \text{м/с}$.

Выполняем задания

Изучаем рисунки

1. МЕХАНИКА

а через A_1 — работу, затраченную фактически, получим КПД механизма, взяв их отношение

$$\eta = \frac{A_{\text{по}}}{A_{\text{зп}}}$$

Чтобы оценить прилагаемую силу, необходимую для подъёма груза, согласно (1.55), вес тела P следует разделить на η :

$$F = \frac{1}{\eta} P = \frac{1}{\eta} m g$$

Сила всегда превышает теоретическое её значение, даваемое приведёнными выше формулами. Численные значения η определяются конкретными условиями работы механизмов.

● **Примеры решения задач**

ОГЭ Стержень цилиндрической формы длиной $l = 40$ см состоит на половину своей длиной из свинца и наполовину — из железа. Найти его центр тяжести. Плотность свинца $\rho_1 = 11,4 \text{ г/см}^3$, плотность железа $\rho_2 = 7,8 \text{ г/см}^3$.

► **Решение.** **Центр тяжести тела** (центр масс) — точка приложения силы притяжения его к Земле — веса тела P . 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**. Мысленно закрепим стержень AB на оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его центр тяжести C , отстоящий от его геометрического центра O на расстоянии x в сторону более тяжёлой половины стержня.

Воспользуемся условием равновесия рычага (1.53):

$$m_1 g \left(\frac{l}{4} - x \right) = m_2 g \left(\frac{l}{4} + x \right) \quad (1)$$

где $m_1 = \rho_1 \cdot V$, $m_2 = \rho_2 \cdot V$ — массы каждой из половины стержня, V — объём половины.

Из уравнения (1) найдём:

1.4 СТАТИКА

$$x = \frac{(m_1 - m_2) l}{2(m_1 + m_2)} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \cdot \frac{l}{4}$$

► Ответ. $x = 1,9$ см.

ЕГЭ 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?

► **Решение.**
Условие равновесия ворота:
$$mg \cdot R = 2F \cdot l.$$

Отсюда
$$F = mg \frac{R}{2l}$$

► Ответ. $F = 50$ Н.

1.4.2. Момент силы. Условия равновесия твёрдого тела

● **Определения и основные формулы**

- **Центр масс тела** — точка приложения силы тяжести.
- **Момент силы F относительно оси** — произведение модуля силы на её плечо:
$$M = F \cdot l \quad (1.57)$$
- **Плечо силы** — расстояние l от оси до линии действия силы.
- **Условия равновесия твёрдого тела:**
$$M_{1\text{всех}} + M_{2\text{всех}} + \dots = M_{1\text{всех}} + M_{2\text{всех}} + \dots \quad (1.58)$$

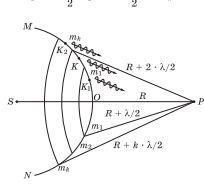
$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots = 0 \quad (1.59)$$
 где $M_{1\text{всех}}$ — моменты сил, вращающих тело по часовой стрелке, $M_{2\text{всех}}$ — моменты сил, вращающих тело против часовой стрелки,
 $\vec{F}_i$ — силы, приложенные к телу, ($i = 1, 2, \dots$).

● **Единицы измерения**

- Единица измерения момента силы — **ньютон-метр**: $[M] = \text{Н} \cdot \text{м}$.
- Плечо силы измеряется в **метрах**: $[l] = \text{м}$.

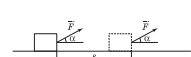
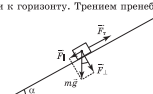
Название раздела

Название подраздела

4. ОПТИКА 4.3. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА 4.3.1. Принцип Гюйгенса. Метод зон Френеля Определения и основные формулы - Дифракция — уклонение света от прямолинейного распространения при прохождении световых волн близки препятствия. - Фронт волны — поверхность, отделяющая область пространства, в которой происходит колебания, от остальной части пространства, где колебания ещё не начались. - Принцип Гюйгенса. Каждая точка фронта волны является источником вторичных сферических волн, огибающая которых (общая касательная) показывает его положение в более поздний момент времени. Подробное объяснение Явление дифракции (от латинского слова <i>diffraction</i> — преломление), как и явление интерференции, присуще всем волнам — в упругой среде или электромагнитным волнам. Теория дифракции света, родоначальником которой был голландский учёный Христиан Гюйгенс, создана в начале XIX века Огюстом Френелем. Она утвердила представление о волновой природе света, которое оставалось господствующим в науке вплоть до начала XX века. Распространение колебаний в пространстве сопровождается перемещением фронта волны. Этот процесс изображают в виде последовательности волновых поверхностей, показывающих его положение через малые промежутки времени. Каждую из этих поверхностей можно построить, используя принцип Гюйгенса (рис. 4.27). Френель в развитие принципа Гюйгенса предложил метод расчёта амплитуды результирующих колебаний, возникающих в точке наблюдения под действием этих вторичных источников, — <i>метод зон Френеля</i>. Пусть S — точечный источник света. Проведём сферическую поверхность Рис. 4.27. 250 Давиденко_Вол_теория_Химия_VT_Physics_PV2_v2 Апрель 25, 2017 21:10	4.3. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА MN с центром в точке S (рис. 4.28). Она является фронтом волны в некоторый момент времени. Расстояние OP от этой поверхности до точки наблюдения P обозначим через R. Проведём теперь вокруг точки P ряд сферических поверхностей радиусами $r_1 = Pm_1$, $r_2 = Pm_2$, $r_3 = Pm_3$, ..., которые вместе с OP составляют арифметическую прогрессию с разностью $\frac{\lambda}{2}$: $r_0 = R, r_1 = R + \frac{\lambda}{2}, r_2 = R + 2 \cdot \frac{\lambda}{2}, \dots, r_k = R + k \cdot \frac{\lambda}{2}. \quad (4.25)$  Рис. 4.28. Эти поверхности вырезают на волновой поверхности MN кольцевые зоны. Центральный сегмент m_1m_1 является <i>первой зоной Френеля</i>. Можно показать, что площади зон $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots$ тоже составляют арифметическую прогрессию, т. е. каждая из них равна среднему арифметическому площадей двух соседних с ней зон: $\sigma_k = \frac{\sigma_{k-1} + \sigma_{k+1}}{2}, \quad (k = 2, 3, 4, \dots).$ Некоторой точке K в какой-либо из зон можно сопоставить две точки — K_1 и K_2 в двух соседних зонах. Расстояния K_1P и K_2P от которых до точки наблюдения P отличаются от расстояния KP на полдлины волны: $K_2P - KP = KP - K_1P = \frac{\lambda}{2}.$ 251 Давиденко_Вол_теория_Химия_VT_Physics_PV2_v2 Апрель 25, 2017 21:10
--	---

Освежаем в памяти теорию

Пример решения задачи ОГЭ

1. МЕХАНИКА $\vec{F}$, проходит путь s (рис. 1.19). Работа этой силы выражается формулой (1.35).  Рис. 1.19. Сила, действующая в направлении движения, увеличивает скорость тела, а совершаемая ею работа положительна. Сила в 1 Н на пути в 1 м совершает работу в 1 Дж. Понятие мощности применяется к устройствам, совершающим работу, т. е. к двигателям различной природы — тепловым, электрическим. Мощность двигателя составляет 1 Вт, если за 1 секунду он совершает работу в 1 Дж. Примеры решения задач 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. Решение. Работа постоянной силы F (поскольку $a = \text{const}$) выражается формулой (1.35): $A = F \cdot s. \quad (1)$ Силу F, действующую в направлении движения подъёмника, найдём из уравнения движения (1.24): $ma = F - mg,$ откуда $F = m(a + g). \quad (2)$ Чтобы найти путь, пройденный за время t, воспользуемся формулой (1.7): $s = \frac{at^2}{2}. \quad (3)$ Подставив (2) и (3) в (1), получим $A = m(a + g) \frac{at^2}{2}.$ ► Ответ. $A = 3 \cdot 10^4$ Дж. 46	1.3. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ ОГЭ Трактор массой $m = 10$ т, развивающий мощность $P = 150$ кВт, движется в гору с постоянной скоростью $v = 5$ м/с. Найти угол наклона дороги к горизонту. Трением пренебречь.  Решение. Поскольку скорость движения трактора постоянна ($a = 0$), сдвигающая сила $\vec{F}_t$ равна силе тяги его двигателя (см. рисунок): $mg \cdot \sin \alpha = F_t. \quad (1)$ Работа, совершаемая на пути s, согласно (1.35), $A = F_t \cdot s.$ Согласно (1.36), мощность двигателя $P = \frac{A}{t} = F_t \cdot v, \quad (2)$ поскольку $v = \frac{s}{t}$. Подставив в (2) F_t из уравнения (1), найдём: $\sin \alpha = \frac{P}{mg \cdot v}.$ ► Ответ. $\sin \alpha = 0,306$; $\alpha = 17^\circ$. Автомобиль массой $m = 1$ т трогается с места и движется равноускоренно, проходит за время $t = 2$ с путь $s = 20$ м. Какую среднюю мощность развивает мотор этого автомобиля? Решение. Мощность, согласно (1.36), равна работе, совершаемой двигателем за единицу времени: $P = \frac{A}{t} = \frac{F_t \cdot s}{t}, \quad (1)$ где сила тяги $F_t = ma. \quad (2)$ Путь, пройденный за время t, согласно (1.7), $s = \frac{at^2}{2}.$ 47
--	--

Пример решения задачи из учебника

Пример решения задачи ЕГЭ

1. МЕХАНИКА

Движение — природное свойство материи. Простейшая его форма — перемещение тел относительно друг 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*.

О основные понятия

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.

Если форма и размеры твёрдого тела несущественны для решения данной задачи, его называют **материальной точкой**.

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

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

Гравитационное поле (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

определения и основные формулы

- ▶ **Механическое движение** — перемещение тел друг относительно друга.
- ▶ **Материальная точка** — тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.
- ▶ **Прямолинейное движение** — движение тела вдоль прямой линии, которую принимают за координатную ось X .
- ▶ **Координата тела** — расстояние от начала координат до тела в данный момент времени. Координата — функция времени:

$$x = x(t).$$
- ▶ **Число степеней свободы тела** — число независимых координат, определяющих его положение в пространстве.
- ▶ **Траектория движения тела** — линия, которую оно описывает в пространстве при своём движении.
- ▶ **Путь s** — длина отрезка траектории, пройденного телом за время t .
- ▶ **Скорость тела** — быстрота изменения его координаты со временем:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}. \quad (1.1)$$

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

$$v_{\text{ср}} = \frac{s}{t}. \quad (1.2)$$

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

$$s = x - x_0 = vt, \quad (v = \text{const}), \quad (1.3)$$

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

Единицы измерения

- ▶ Координата тела и путь в системе СИ измеряются в **метрах**:
 $[x] = [s] = \text{м}.$
- ▶ Скорость измеряется в **метрах в секунду**:
 $[v] = \text{м/с}.$

Подробное объяснение

Простейшим объектом, движение которого изучает механика, является *материальная точка*. Планеты, обращающиеся вокруг Солнца, можно считать материальными точками, поскольку размеры планет, сколь бы велики они ни были, всё же очень малы по сравнению с их расстояниями от Солнца. Снаряд, выпущенный из орудия, или поезд, идущий из одного города в другой, также могут быть приняты за материальную точку. Движущуюся материальную точку часто называют просто *телом*.

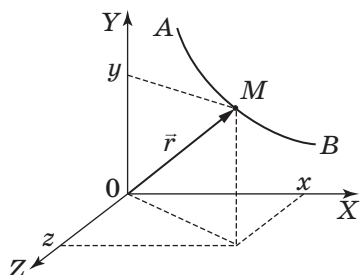


рис. 1.1

Перемещение тела в пустом пространстве лишено смысла. Можно говорить лишь об относительном перемещении, т.е. изменении взаимного расположения тел. Для этого используется *тело отсчёта* — например, Земля, с которой связывают прямоугольную декартову систему координат (рис. 1.1). Отрезки x , y , z , отсекаемые на осях координат перпендикулярными к ним плоскостями, проходящими

через точку M , называются *координатами точки M* .

Материальная точка в общем случае имеет *три* степени свободы. Чтобы описать её движение, необходимо найти три функции:

$$\begin{aligned} x &= x(t), \\ y &= y(t), \\ z &= z(t). \end{aligned} \tag{1.4}$$

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

Система уравнений (1.4) задаёт *траекторию* точки в параметрическом виде, где в качестве параметра выступает время t . В общем случае траектория представляет собой кривую линию. Движение по траектории можно уподобить ходьбе по извилистой тропинке в лесу. Расстояние, пройденное по ней, называется *пройденным путём*. Путь s — *скалярная величина*, характеризующаяся только численным значением, показывающим, сколько единиц длины — метров — укладывается на длине траектории.

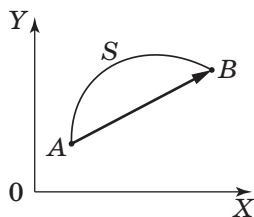


рис. 1.2

Перемещение является величиной *векторной*, поскольку показывает направление, в котором оно было совершено. На рис. 1.2 изображены траектория S движения тела из точки A в точку B и вектор перемещения $\overline{AB}$.

Задача механики заключается в отыскании функций (1.4). Для формулировки законов, с помощью которых могут быть найдены эти функции, нужно ввести понятия *скорости*, *ускорения*, *массы*, *импульса* и *силы*. В кинематике вводятся первые два из них. Определим их для материальной точки, движущейся прямолинейно, когда её положение в пространстве характеризуется одной координатой (рис. 1.3).

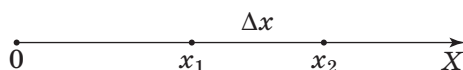


рис. 1.3

Пусть в момент времени t материальная точка имела координату $x_1 = x(t)$, а спустя время Δt — координату $x_2 = x(t + \Delta t)$. Их разность

$$\Delta x = x_2 - x_1 = x(t + \Delta t) - x(t)$$

есть путь, который она прошла за это время.

Отношение пройденного пути ко времени за малый промежуток времени Δt называется *мгновенной* или просто *скоростью* тела, определяемой соотношением (1.1).

Средней скоростью тела называется отношение пути s , пройденного телом за всё время движения t , к этому времени (1.2).

Если на всём пути скорость тела постоянна, движение называется *равномерным*. Путь s , пройденный за промежуток времени t , находится тогда из уравнения (1.3).

График зависимости пути от времени при равномерном движении представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат (рис. 1.4).

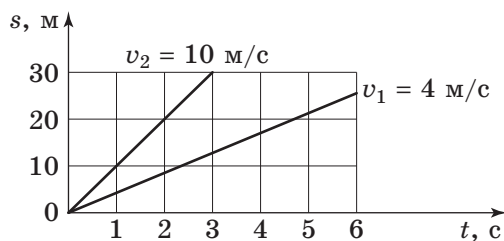


рис. 1.4

Примеры решения задач



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

► Решение. Согласно (1.2), среднее значение скорости автомобиля

$$v_{\text{ср}} = \frac{s}{t_1 + t_2}, \quad (1)$$

где $t_1 = \frac{s}{2v_1}$ — время прохождения 1-й половины пути,

$t_2 = \frac{s}{2v_2}$ — время прохождения 2-й половины пути (s — длина пути).

Подставляя в (1), найдём

$$v_{\text{ср}} = \frac{2v_1v_2}{v_1 + v_2}.$$

► Ответ. $v_{\text{ср}} = 24,8$ км/ч.



Расстояние между городами M и K $s = 250$ 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.

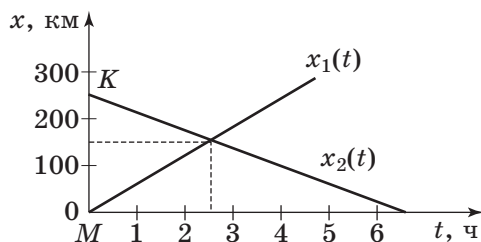
► Решение.

Движение происходит вдоль оси X между точкой M , которую выбираем за начало координат, и точкой K на расстоянии s от неё.

Согласно (1.3),

$$x_1(t) = v_1 t,$$

$$x_2(t) = s - v_2 t.$$



Графики этих функций изображены на рисунке. В момент встречи координаты машин совпадают:

$$x_1(t_0) = x_2(t_0) = x_0.$$

Проекция точки пересечения на ось t показывает время t_0 , когда это произошло.

► Ответ. $x_0 = 150$ км, $t_0 = 2,5$ ч.



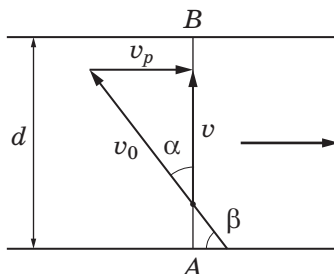
Скорость течения реки $v_p = 1$ м/с, скорость лодки относительно воды $v_0 = 2$ м/с. Под каким углом к берегу следует держать курс, чтобы лодка двигалась перпендикулярно берегу? За какое время t она переправится через реку, ширина которой $d = 200$ м?

► Решение.

В неподвижной воде, чтобы попасть из точки A в точку B , лодка должна перемещаться перпендикулярно берегу.

Поскольку вода движется, курс следует держать под углом α к этому направлению (см. рисунок).

За $t = 1$ с лодка пройдёт по воде путь, равный v_0 , в то время как вода в реке снесёт её вдоль берега на расстояние v_p . Скорость лодки относительно берега составит v . Из треугольника, образованного этими векторами, найдём



$$v = \sqrt{v_0^2 - v_p^2}, \quad \sin \alpha = \frac{v_p}{v_0}, \quad \beta = 90^\circ - \alpha.$$

Время движения лодки из точки A в точку B

$$t = \frac{d}{\sqrt{v_0^2 - v_p^2}}.$$

► Ответ. $t = 115$ с, $\beta = 60^\circ$.

1.1.2. Равноускоренное прямолинейное движение

определения и основные формулы

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

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

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

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

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

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

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

Единицы измерения

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

$$[a] = \text{м/с}^2.$$

Подробное объяснение

Движение тела является *ускоренным*, если его скорость с течением времени изменяется. Зависимость скорости от времени выражается функцией $v = v(t)$. Пусть в момент времени t тело имело скорость $v_1 = v(t)$, а спустя промежуток времени Δt — скорость $v_2 = v(t + \Delta t)$, т. е. приращение скорости

$$\Delta v = v_2 - v_1 = v(t + \Delta t) - v(t).$$

Отношение приращения скорости ко времени, которое произошло за малый промежуток времени Δt , называется *ускорением* тела и выражается уравнением (1.5).



рис. 1.5

Если $a = \text{const}$, движение называется *равнопеременным* (равноускоренным или равнозамедленным). Поскольку $\Delta v = v - v_0$, из уравнения (1.5) можно получить зависимость скорости от времени (1.6). График этой зависимости приведён на рис. 1.5.

При равноускоренном движении среднее значение скорости равно полусумме начального и конечного её значений:

$$v_{\text{ср}} = \frac{v + v_0}{2}.$$

Подставив сюда (1.6) и учитывая, что путь $s = v_{\text{ср}} \cdot t$, найдём зависимость пути от времени (1.7). График этой функции — парабола. При $v_0 = 0$, когда тело начинает движение из состояния покоя, вершина параболы совпадает с началом координат (рис. 1.6).

Если тело движется замедленно, его ускорение отрицательно ($a < 0$).

Выражая время t из уравнения (1.6) и подставляя его в (1.7), получим уравнение (1.8), связывающее конечную и начальную скорости движения, ускорение и пройденный путь.

Уравнения (1.6) – (1.8) составляют систему уравнений, необходимых для решения 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).

Примеры решения задач



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 и начальную скорость тела.

► Решение. При равноускоренном движении путь выражается формулой (1.7), а скорость — формулой (1.6). Подставив в них численные значения, получим систему уравнений

$$\begin{cases} 2v_0 + 2a = 18, \\ v_0 + 2a = 5v_0. \end{cases} \quad (1)$$

Решая систему уравнений (1), найдём a и v_0 .

► Ответ. $a = 6$ м/с², $v_0 = 3$ м/с.



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.

► Решение. Ускорение поезда найдём, воспользовавшись уравнением (1.8):

$$a = \frac{v^2 - v_0^2}{2s}.$$

Время ускоренного движения найдём из (1.6), подставив туда a :

$$t = \frac{v - v_0}{a} = \frac{2s}{v + v_0}.$$

► Ответ. $a = 0,05$ м/с², $t = 53$ с.

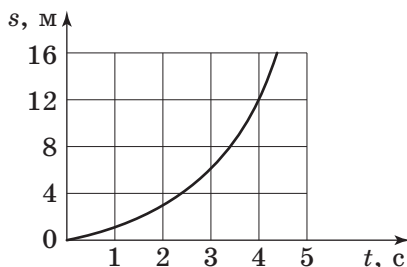


рис. 1.6

ЕГЭ

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?

► Решение.

Согласно (1.7), зависимость координаты от времени

$$y(t) = y_0 + v_0 t + \frac{a_y t^2}{2}. \quad (1)$$

Для камня, сброшенного с воздушного шара, $y_0 = h$, $a_y = -g$, координата в момент касания земли ($t = t_n$) равна $y(t_n) = 0$. Подставляя в (1), получим

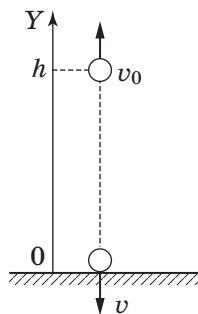
$$h = t_n \left(-v_0 + \frac{1}{2} g t_n \right).$$

Скорость камня в момент $t = t_n$, согласно (1.6),

$$v = v_0 - g t_n.$$

Отрицательный знак a_y и v означает, что ускорение и скорость направлены в сторону, противоположную направлению оси Y , т. е. вниз.

► Ответ. $h = 1238$ м, $v = -156$ м/с.



1.1.3. Движение в однородном поле тяжести

определения и основные формулы

► **Однородное поле тяжести** — ускорение свободного падения одинаково в любой его точке:

$$a = g = 9,8 \text{ м/с}^2.$$

Подробное объяснение

Пусть тело брошено горизонтально на высоте h со скоростью v_0 . Движение его происходит в плоскости XOY , как показано на рис. 1.7. Найдём уравнение траектории его движения. Поскольку сила тяжести направлена вертикально вниз, проекция на ось X вектора ускорения равна нулю:

$$a_x = 0.$$

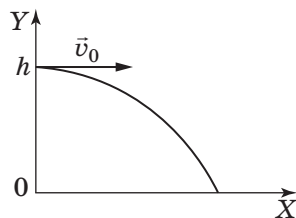


рис. 1.7

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

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

Поскольку $s = x - x_0$, уравнение (1.7) можно записать в виде

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{a_x t^2}{2}, \quad (1.9)$$

где x_0 — координата тела по оси X в начальный момент времени. В нашем случае $x_0 = 0$. Тогда

$$x(t) = v_0 t. \quad (1.10)$$

Ускорение тела вдоль оси Y равно ускорению свободного падения g , взятому со знаком «минус», так как проекция вектора $\vec{g}$ на эту ось отрицательна: $a_y = -g$. Заменив в уравнении (1.9) x на y и учитывая, что по оси Y его начальная координата $y_0 = h$, а проекция начальной скорости $v_{0y} = 0$, найдём

$$y(t) = h - \frac{gt^2}{2}. \quad (1.11)$$

Уравнения (1.10) и (1.11) 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

$$y(x) = h - \frac{g}{2v_0^2} x^2. \quad (1.12)$$

Это уравнение параболы с вершиной в точке $(0, h)$ и ветвями, направленными вниз (рис. 1.7).

В однородном поле тяжести тело движется *по параболе*.

Из уравнения (1.11) можно найти *время полёта* тела t_{Π} . В момент касания земли ($t = t_{\Pi}$) его координата по оси Y становится равной нулю:

$$y(t_{\Pi}) = h - \frac{gt_{\Pi}^2}{2} = 0.$$

Отсюда

$$t_{\Pi} = \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

Подставляя его в уравнение (1.10), найдём *дальность полёта* тела:

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

Примеры решения задач



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?

► Решение.

Пусть $t_{\text{п}}$ — время подъёма камня. В верхней точке скорость его $v = 0$. Согласно (1.6),

$$v(t_{\text{п}}) = v_0 - gt_{\text{п}} = 0, \quad (1)$$

поскольку проекция вектора ускорения камня на ось Y $a_y = -g$.

Время падения равно времени подъёма, поэтому

$$t_1 = 2t_{\text{п}}.$$

Выражая $t_{\text{п}}$ из (1), получим

$$t_1 = \frac{2v_{01}}{g}. \quad (2)$$

Согласно (1.8),

$$v_{01}^2 = 2gh_1. \quad (3)$$

Подставляя v_{01} в (2), найдём

$$t_1 = 2\sqrt{\frac{2h_1}{g}}. \quad (4)$$

Из (3) следует

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{v_{02}^2}{v_{01}^2}.$$

По условию задачи, $v_{02} = 2v_{01}$. Тогда $h_2 = 4h_1$.

► Ответ. $t_1 = 2,8$ с; $h_2 = 40$ м.

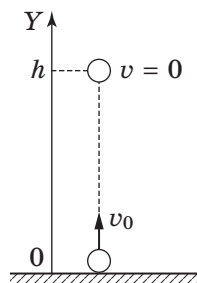


Два тела брошены вертикально вверх одно вслед за другим с интервалом в $\tau = 1$ с с одинаковыми начальными скоростями $v_0 = 10$ м/с. Через сколько времени тела встретятся в полёте?

► Решение. Запишем уравнение (1.7), в котором $a_y = -g$, для 1-го и 2-го тел:

$$y_1(t) = v_0 t - \frac{gt^2}{2}, \quad (1)$$

$$y_2(t) = v_0(t - \tau) - \frac{g(t - \tau)^2}{2}. \quad (2)$$



В момент времени $t = t_0$ тела встретятся в полёте, т. е.

$$y_1(t_0) = y_2(t_0).$$

Приравнивая правые части (1) и (2), получим уравнение

$$v_0 = \frac{1}{2}g \cdot (2t_0 - \tau),$$

откуда

$$t_0 = \frac{v_0}{g} + \frac{\tau}{2}.$$

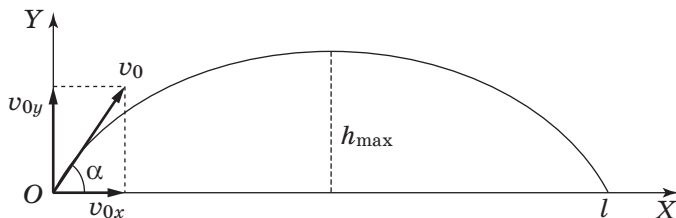
► Ответ. $t_0 = 1,5$ с.

ЕГЭ

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

► Решение.

В однородном поле тяжести тело движется по параболе в плоскости XOY (см. рисунок).



Решение данной задачи аналогично рассмотренной в 1.1.3. Изменяются только начальные условия.

По оси X :

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

По оси Y :

$$y_0 = 0, v_{0y} = v_0 \sin \alpha.$$

Уравнения (1.10) и (1.11) приобретают вид:

$$x(t) = v_0 t \cdot \cos \alpha, \quad (1)$$

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

Подставляя в (2) время полёта $t_{\text{п}}$ и учитывая, что $y(t_{\text{п}}) = 0$, получим

$$v_0 t_{\text{п}} \sin \alpha = \frac{gt_{\text{п}}^2}{2},$$

откуда

$$\sin \alpha = \frac{gt_{\pi}}{2v_0}. \quad (3)$$

Максимальную высоту подъёма найдём из (2), подставив туда (3) и $t = \frac{t_{\pi}}{2}$:

$$h_{\max} = \frac{gt_{\pi}^2}{8}. \quad (4)$$

Дальность полёта находим из (1) с учётом (3):

$$l = v_0 t_{\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{gt_{\pi}}{2v_0}\right)^2}.$$

► Ответ. $h_{\max} = 6$ м, $\alpha = 30^\circ$, $l = 42$ м.

1.1.4. Вращательное движение

определения и основные формулы

► **Угловая скорость** твёрдого тела, вращающегося вокруг оси:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}, \quad (1.13)$$

где $\Delta\varphi$ — угол поворота за малый промежуток времени Δt .

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

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n. \quad (1.14)$$

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

$$T = \frac{t}{N}, \quad (1.15)$$

где N — полное число оборотов.

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

$$n = \frac{N}{t}. \quad (1.16)$$

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

$$a_{\text{ц}} = \frac{v^2}{R}. \quad (1.17)$$

► **Связь линейных и угловых величин:**

$$v = \omega \cdot R, \quad (1.18)$$

$$a_{\text{ц}} = \omega^2 R. \quad (1.19)$$

Единицы измерения

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

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

(**Радиян** — безразмерная единица. Угол в 1 рад образуют два радиуса окружности, стягивающая дуга которых равна радиусу. Этот угол составляет $\approx 57,2^\circ$. Угол в $180^\circ = \pi$ рад).

- Период измеряется в **секундах**:

$$[T] = \text{с}.$$

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

$$[n] = \frac{\text{об}}{\text{с}} = \frac{1}{\text{с}}.$$

Подробное объяснение

Рассмотрим тело, вращающееся с угловой скоростью ω вокруг оси, проходящей через точку O перпендикулярно плоскости чертежа (рис. 1.8). За время Δt оно поворачивается на угол

$$\Delta\varphi = \omega \Delta t.$$

При равномерном вращении тело, совершая один оборот за время T , поворачивается на угол 2π рад, поэтому

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Угловую скорость можно связать со скоростью v точки M , принадлежащей этому телу, описывающей окружность радиуса R . Умножим обе части (1.13) на R и учтём, что длина дуги, по которой проходит точка M , $\Delta s = R \cdot \Delta\varphi$, а $\frac{\Delta s}{\Delta t} = v$. Тогда получим

$$v = \omega \cdot R.$$

Скорость точки v называется в этом случае *линейной скоростью*.

Вектор скорости точки направлен по касательной к окружности и изменяется только по направлению, оставаясь постоянным по модулю ($v_1 = v_2 = v_3 = v$, рис. 1.9).

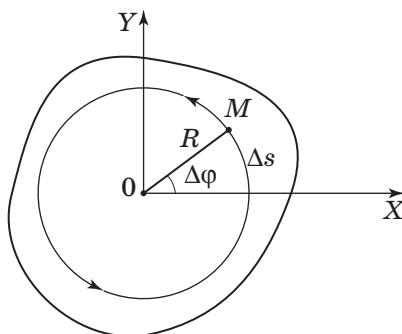


рис. 1.8

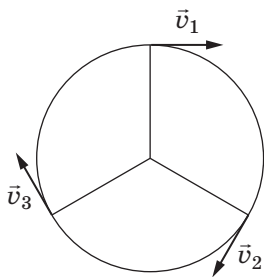


рис. 1.9

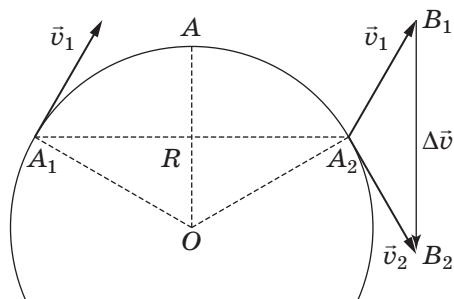


рис. 1.10

За малый промежуток времени Δt точка M перемещается из положения A_1 в положение A_2 (рис. 1.10). Перенесём вектор $\vec{v}_1$, показывающий её скорость в точке A_1 , параллельно самому себе в точку A_2 . Отрезок прямой B_1B_2 равен изменению скорости точки $\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$, а отношение $\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{a}$ — её ускорению. Как видно из рисунка, вектор ускорения параллелен отрезку OA , т. е. направлен вдоль радиуса к центру окружности, поэтому ускорение называется *центростремительным*. Поскольку треугольники OA_1A_2 и $A_2B_1B_2$ подобны, можно записать

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{A_1A_2}{R}. \quad (1.20)$$

Поскольку Δt мал, точки A_1 и A_2 расположены близко друг к другу и длину дуги A_1AA_2 окружности можно считать равной длине отрезка A_1A_2 . Сама же длина этой дуги есть путь, который точка M прошла за время Δt со скоростью v :

$$A_1A_2 = s = v\Delta t.$$

Подставляя в (1.20) и учитывая (1.5), получим формулу для центростремительного ускорения точки (1.17). С учётом (1.18) она приобретает вид (1.19).

Уравнения (1.18) и (1.19) справедливы и в том случае, когда угловая скорость вращения тела не остаётся постоянной, а изменяется со временем.

При равномерном вращении период обращения точки M можно найти, разделив длину окружности на её скорость:

$$T = \frac{2\pi R}{v}.$$

Примеры решения задач



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

► Решение.

При вращении тела вокруг оси скорость v точки, отстоящей от оси на расстояние r , связана с угловой скоростью вращения ω соотношением (1.18).

Точка M_1 , лежащая на экваторе Земли, движется со скоростью v_1 . Для неё

$$v_1 = \omega \cdot R, \quad a_{ц1} = \omega^2 R,$$

где $\omega = \frac{2\pi}{T}$ (T — период вращения Земли, 1 сутки).

Для точки M_2 радиус окружности $r = R \cos \theta$ и

$$v_2 = \omega R \cdot \cos \theta, \quad a_{ц2} = \omega^2 R \cdot \cos \theta.$$

► Ответ. $v_1 = 465$ м/с, $a_{ц1} = 3,4 \cdot 10^{-2}$ м/с²; $v_2 = 233$ м/с, $a_{ц2} = 1,4 \cdot 10^{-2}$ м/с².



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

► Решение. Воспользуемся формулой (1.17):

$$a_{ц1} = \frac{v_1^2}{R_1}.$$

Изменяя v и R как указано в условии задачи ($v_2 = 2v_1$,

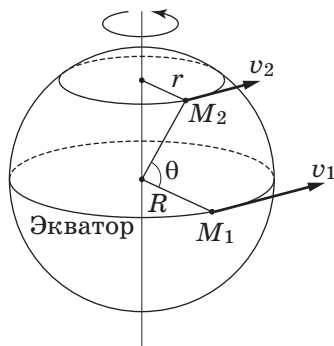
$$R_2 = \frac{1}{2} R_1), \text{ получим}$$

$$a_{ц2} = \frac{4v_1^2}{\frac{R_1}{2}} = 8 \frac{v_1^2}{R_1} = 8a_{ц1}.$$

► Ответ. Увеличится в 8 раз.



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.



► Решение.

Согласно (1.18),

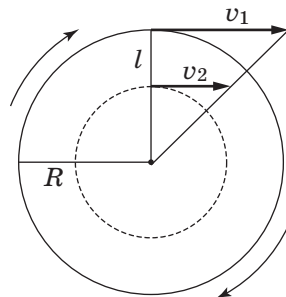
$$v_1 = \omega \cdot R, \quad v_2 = \omega \cdot (R - l).$$

Выразив R из 1-го уравнения и подставив его во 2-е, получим

$$\omega = \frac{v_1 - v_2}{l}.$$

Частота вращения, согласно (1.14),

$$n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{v_1 - v_2}{2\pi l}.$$

► Ответ. $n = 1,59$ об/с.

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

определения и основные формулы► **Масса** — мера количества вещества в теле.► **Плотность вещества** — отношение массы тела к его объёму:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (1.21)$$

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

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}. \quad (1.22)$$

► **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:

$$\vec{F}_{\text{рез}} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots$$

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 **ньютон**ах:

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

Подробное объяснение

Взвешивая тело на весах, мы определяем его *гравитационную* массу, поскольку критерием её величины в данном случае является сила притяжения к Земле, т.е. сила гравитации. Эталоном массы в 1 кг служит масса дистиллированной воды объёмом 1 дм³ при температуре 4 °С, при которой её плотность максимальна.

Массу тела можно найти, не помещая его на весы. Для этого требуется измерить объём тела и умножить его на *плотность*:

$$m = \rho \cdot V.$$

Плотность вещества численно равна массе, содержащейся в единице объёма ($V = 1 \text{ м}^3$).

Сила в 1 Н, приложенная к телу массой 1 кг, сообщает ему ускорение в 1 м/с². Из соотношения (1.22) следует, что ускорение тела обратно пропорционально его массе: $a = \frac{F}{m}$ — чем она больше, тем труднее изменить скорость тела. Масса в данном случае выступает в роли *инертной массы*.

Сила, как и ускорение, имеет направление в пространстве и является величиной векторной, поскольку, как показывает опыт, силы подчиняются закону сложения векторов (рис. 1.11).

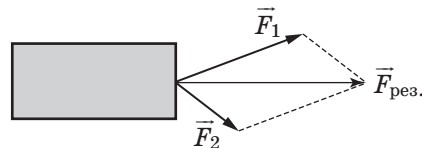


рис. 1.11

Тела могут взаимодействовать друг с другом при их контакте благодаря силе трения, упругой силе, а также посредством создаваемых ими полей — гравитационного, электрического (между заряженными телами), магнитного.

Примеры решения задач



Ведро заполнено водой до края. Сколько воды вытечет, если в него погрузить железную гиру массой $m = 1$ кг? Плотность железа $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³.

- Решение. Объем вытекшей воды равен объёму гири. Согласно (1.21)

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

- Ответ. $V = 0,13$ л.



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.

- Решение. По определению (1.22), сила $F = ma$.

Поскольку $a = \frac{v_0 - v}{t}$, $v = 0$, получим

$$F = \frac{mv_0}{t}.$$

- Ответ. $F = 0,4$ Н.



Ускорение тела, к которому в одной точке приложены силы F_1 и F_2 , перпендикулярные друг другу, составляет $a = 3,6$ м/с². Найти массу тела m , если $F_1 = 2$ Н, $F_2 = 3$ Н.

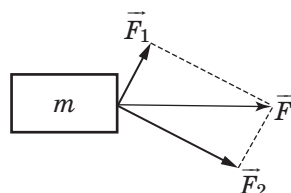
- Решение.

Направление движения тела совпадает с направлением результирующей силы $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$, модуль которой, по условию задачи, $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$.

Тогда, согласно (1.22),

$$m = \frac{1}{a} \sqrt{F_1^2 + F_2^2}.$$

- Ответ. $m = 1$ кг.



1.2.2. Инерциальные системы отсчёта. Законы ньютона

определения и основные формулы

- ▮ **Инерциальная система отсчёта** — система отсчёта, относительно которой тело покоится или движется с постоянной скоростью, если сумма приложенных к нему сил равна нулю.
- ▮ **Первый закон Ньютона.** Если на тело не действует сила, то оно покоится или движется с постоянной скоростью:

$$\vec{a} = 0, \text{ если } \vec{F} = 0. \quad (1.23)$$

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

$$m\vec{a} = \vec{F}_{\text{рез}}. \quad (1.24)$$

- ▮ **Третий закон Ньютона.** 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:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}. \quad (1.25)$$

Подробное объяснение

Опыт показывает, что если какое-либо тело привести в движение и отпустить, оно через некоторое время придёт в состояние покоя. Это происходит под действием силы трения. Уменьшая трение, можно добиться большей длины пробега тела до остановки.

Итальянский учёный Галилео Галилей в XVI веке, проанализировав результаты поставленных им опытов, сумел понять, что движение тела происходит не благодаря приложенной силе, а в силу природного свойства тел сохранять состояние своего движения, которое он назвал *инерцией*. Он сформулировал закон, называемый законом инерции, который Ньютон поставил первым в ряду трёх своих законов, составляющих основу механики. Первый закон позволяет дать приведённое выше определение *инерциальной системы отсчёта*.

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 со 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 вперёд. Законы Ньютона выполняются в инерциальных системах отсчёта.

Второй закон позволяет найти ускорение тела, если известны действующие на него силы.

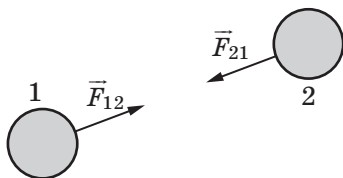


рис. 1.12

Рисунок 1.12, где изображены два тела, взаимодействующие друг с другом, иллюстрирует *третий закон* Ньютона.

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. Квантовая механика 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.

Примеры решения задач



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

- Решение. Парашютист испытывает действие двух противоположно направленных сил — силы тяжести и силы сопротивления воздуха. Поскольку скорость его постоянна, ускорение его $a = 0$. Согласно (1.24), $F_{\text{рез}} = F_{\text{сопр}} - mg = 0$, т. е.

$$F_{\text{сопр}} = mg.$$

- Ответ. $F_{\text{сопр}} = 800$ Н.



Вагон массой $m = 20$ т движется равнозамедленно с ускорением $a = 0,3$ м/с² и начальной скоростью $v_0 = 54$ км/ч. Найти силу торможения, действующую на вагон, время его движения до полной остановки и путь, пройденный за это время.

- Решение. Согласно (1.24), сила торможения

$$F_{\text{тр}} = ma.$$

Поскольку сила постоянна, движение равнозамедленное и можно пользоваться формулами из 1.1.2. Время движения до полной остановки, согласно (1.6),

$$t = \frac{v_0}{a}.$$

Путь, пройденный за это время, согласно (1.8),

$$s = \frac{v_0^2}{2a}.$$

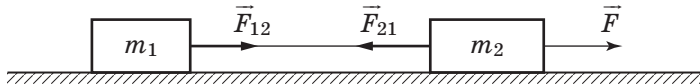
- Ответ. $F_{\text{тр}} = 6 \text{ кН}$; $t = 50 \text{ с}$; $s = 375 \text{ м}$.

ЕГЭ

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

- Решение.

Изобразим на рисунке рассматриваемые тела и векторы действующих на них сил.



Поскольку нить нерастяжима, тела движутся синхронно, имея одинаковое ускорение.

Запишем уравнение движения (1.24) для каждого из тел:

$$m_1 a = F_{12}, \quad (1)$$

$$m_2 a = F - F_{21}. \quad (2)$$

Согласно (1.25), модули сил F_{12} и F_{21} равны друг другу. Обозначив их через T и складывая уравнения (1) и (2) почленно, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} m_1 a = T, \\ (m_1 + m_2) a = F, \end{cases}$$

откуда

$$a = \frac{F}{m_1 + m_2}, \quad T = \frac{m_1 F}{m_1 + m_2}.$$

- Ответ. $a = 3,3 \text{ м/с}^2$; $T = 3,3 \text{ Н}$.

1.2.3. Принцип относительности Галилея

определения и основные формулы

- **Принцип относительности Галилея.** Уравнения, выражающие законы Ньютона, имеют один и тот же вид в любой инерциальной системе отсчёта.
- **Закон сложения скоростей** в классической механике:

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{V}, \quad (1.26)$$

где $\vec{v}'$ — скорость тела относительно системы отсчёта, которая движется со скоростью $\vec{V}$ относительно Земли.

Подробное объяснение

Рассмотрим две инерциальные системы отсчёта K и K' , одна из которых — система K' — движется относительно системы K с постоянной скоростью V , направленной вдоль оси X (рис. 1.13). Положение точки M в системе отсчёта K определяется радиусом-вектором $\vec{r}$, а в системе отсчёта K' — радиусом-вектором $\vec{r}'$. Связь между ними выражается уравнением

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{OO'}, \quad (1.27)$$

которое в компонентах имеет вид:

$$x = x' + Vt', \quad (1.28, a)$$

$$y = y', \quad (1.28, б)$$

$$z = z', \quad (1.28, в)$$

поскольку расстояние $OO' = Vt$, а время в классической механике абсолютно, т. е.

$$t = t'. \quad (1.28, г)$$

Уравнения (1.28, а) — (1.28, г), связывающие координаты точки M и время относительно инерциальных систем отсчёта K и K' , называются *преобразованием Галилея*.

Используя определение скорости (1.1) и учитывая, что $\Delta t = \Delta t'$, получим из (1.28):

$$v_x = v'_x + V,$$

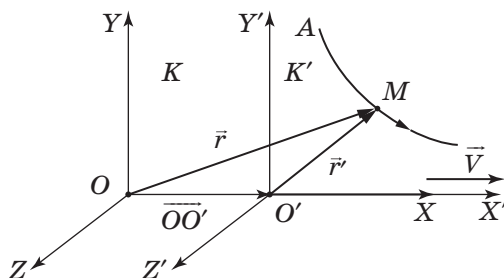


рис. 1.13

$$v_y = v'_y,$$

$$v_z = v'_z,$$

или в векторном виде — уравнение (1.26).

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 в уравнении (1.26) не может превысить скорость света $c = 300\,000$ км/с. Это значит, что никакое материальное тело не может двигаться со скоростью, большей скорости света.

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 (1.24) 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.

Примеры решения задач



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

► Решение.

Расстояние s можно найти, умножив скорость пассажира v на время подъёма t_0 по неподвижному эскалатору:

$$s = v \cdot t_0. \quad (1)$$

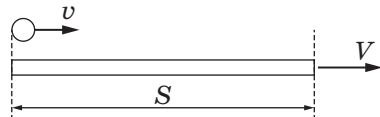
Если эскалатор движется со скоростью V , то скорость пассажира относительно помещения станции увеличивается на эту величину. Тогда

$$s = (v + V) \cdot t. \quad (2)$$

Приравнивая правые части (1) и (2), найдём

$$V = \left(\frac{t_0}{t} - 1 \right) v.$$

► Ответ. $V = 0,5$ м/с; $s = 120$ м.





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. На встречу ему дует ветер, скорость которого $v_b = 10$ м/с. Сколько времени он будет лететь в обратном направлении — из города B в город A ?

- **Решение.** По закону сложения скоростей (1.26) скорость самолёта относительно Земли составляет $v_1 = v_c - v_b$ при полёте из A в B и $v_2 = v_c + v_b$ — при полёте в обратном направлении. Пусть s — расстояние между городами. Тогда

$$s = v_1 \cdot t_1 = v_2 \cdot t_2,$$

где t_1 и t_2 — время полёта соответственно из A в B и обратно. Отсюда

$$t_2 = \frac{v_1}{v_2} t_1 = \frac{v_c - v_b}{v_c + v_b} t_1.$$

- Ответ. $t_2 = 1,6$ ч.

1.2.4. Сила трения

определения и основные формулы

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

$$F_{\text{тр}} = \mu N, \quad (1.29)$$

где N — сила нормального давления,
 μ — коэффициент трения.

Подробное объяснение

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, согласно (1.29), 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 и

$$F_{\text{тр}} = \mu mg.$$

Сила трения действует в сторону, противоположную направлению движения тела. Её можно найти, измерив с помощью динамометра силу F , которую нужно приложить к телу, чтобы оно скользило по поверхности, двигаясь с постоянной скоростью (рис. 1.14). Поскольку в этом случае ускорение тела равно нулю, то, согласно (1.24), обращается в нуль и результирующая действующих на него сил, т. е. движущая сила F равна силе трения:

$$F = F_{\text{тр}}.$$

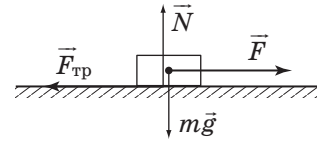


рис. 1.14

Опыт показывает, что при движении сила трения скольжения меньше той силы, которую нужно приложить, чтобы сдвинуть тело с места — привести его в движение. Эта сила называется *силой трения покоя*.

Силы трения проявляют себя в движущихся частях машин и механизмов. С ними ведут борьбу путём шлифовки поверхностей, используют машинные масла для смазки трущихся деталей. Однако чаще всего силы трения играют положительную роль. Они необходимы для сцепления колёс транспортных средств с полотном дороги, надёжной работы их тормозных систем. Не будь трения, люди не могли бы ходить, отталкиваясь от земли, предметы выскальзывали бы из рук, нельзя было бы вязать ткани, завязывать узлы, пользоваться ленточными транспортёрами и во многих других случаях.

Примеры решения задач



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.

► Решение.

На рисунке показаны направление движения и силы, действующие на камень. Поскольку, согласно (1.24),

$$ma = F_{\text{тр}},$$

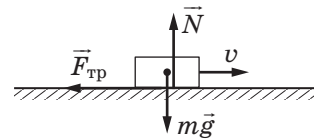
а $F_{\text{тр}} = \mu mg$, получим

$$a = \mu g. \quad (1)$$

Начальную скорость найдём из уравнения (1.8), подставив туда a :

$$v_0 = \sqrt{2\mu gs}.$$

► Ответ. $v_0 = 7,5$ м/с.



ОГЭ

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 $\mu = 0,2$.

- Решение. Доска, двигаясь ускоренно, приводит в движение лежащий на ней груз, действуя на него с силой, равной силе трения между ними:

$$F_{\text{тр}} = \mu \cdot mg. \quad (1)$$

Уравнение движения груза

$$ma = \mu \cdot mg \quad (2)$$

определяет предельное значение ускорения a_{max} , с которым он может двигаться. Поскольку a задаётся движением доски, груз соскальзывает с неё, когда $a > a_{\text{max}} = \mu g$.

- Ответ. $a > 2 \text{ м/с}^2$.

ЕГЭ

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

- Решение.

Силы, действующие на тело на наклонной плоскости, показаны на рисунке. Тело удерживается на плоскости, если скатывающая сила $F_{\parallel} = mg \cdot \sin \alpha$ не превышает силы трения $F_{\text{тр}} = \mu F_{\perp}$, где $F_{\perp} = mg \cos \alpha$.

Приравнявая их, получим

$$mg \sin \alpha = \mu mg \cos \alpha,$$

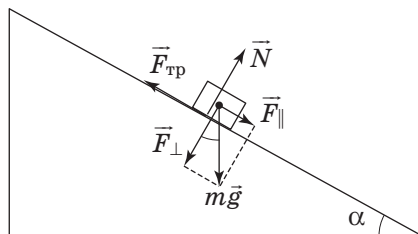
откуда

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha.$$

Максимальный угол α_{max} тем больше, чем больше трение. Он находится из уравнения

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{max}} = \mu = 0,2.$$

- Ответ. $\alpha_{\text{max}} = 11,3^\circ$.



1.2.5. Сила упругости. Закон Гука

определения и основные формулы

- **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:

$$F_{\text{упр}} = -kx, \quad (1.30)$$

где k — жёсткость пружины,
 x — её удлинение.

Единицы измерения

- Сила упругости измеряется в **ньютонах**:
 $[F_{\text{упр}}] = \text{Н}.$
- Деформация измеряется в **метрах**:
 $[x] = \text{м}.$
- Жёсткость пружины измеряется в **ньютонах на метр**:
 $[k] = \text{Н/м}.$

Подробное объяснение

Деформацию стальной пружины или резинового жгута можно наблюдать, приложив к ним силу. При упругой деформации выполняется *закон Гука* (1.30).

Коэффициент пропорциональности k в формуле (1.30) зависит от формы пружины и её размеров. Знак «минус» указывает, что сила упругости $F_{\text{упр}}$ направлена в сторону, противоположную смещению тела, закреплённого на этой пружине (рис. 1.15).

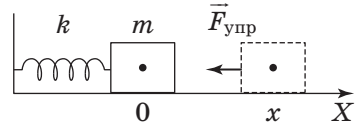


рис. 1.15

Природа силы упругости заключается в том, что атомы твёрдых тел находятся друг от друга на некотором равновесном расстоянии. Попытка увеличить или уменьшить его путём растяжения или сжатия тела приводит к появлению межмолекулярных сил, стремящихся сохранить это расстояние неизменным. Тем же свойством обладают и жидкости, которые не имеют собственной формы, но имеют собственный объём.

Твёрдые тела и жидкости с большим трудом поддаются деформации, обнаружить которую можно только используя точные измерительные приборы. Так, стальной провод длиной 1 м и диаметром 1 мм под действием силы 100 Н (вес ведра воды) удлиняется всего на 0,6 мм.

Если нагрузка превышает некоторое предельное значение, деформация тела становится *неупругой*, т. е. остаётся после снятия нагрузки. Дальнейшее её увеличение приводит к разрушению тела.

Малая сжимаемость жидкостей используется в гидравлических приводах машин и механизмов для передачи движения на расстояние — тормозных системах автомобилей, в экскаваторах, на самолётах, вертолётах, морских и речных судах.

Примеры решения задач



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

► Решение. По закону Гука (1.30) при упругой деформации пружины модуль приложенной к ней силы

$$F = kx.$$

Отсюда найдём жёсткость пружины:

$$k = \frac{F}{x}.$$

► Ответ. $k = 100$ Н/м.



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

► Решение. Удлинение пружины x найдём из уравнения (1.30):

$$mg = kx.$$

Тогда

$$l = l_0 + x = l_0 + \frac{mg}{k}.$$

► Ответ. $l = 0,125$ м.

1.2.6. Сила тяжести. Закон всемирного тяготения

определения и основные формулы

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

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (1.31)$$

где m_1 и m_2 — массы тел,

r — расстояние между ними,

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

- **Ускорение свободного падения** на высоте h над поверхностью Земли:

$$g(h) = G \frac{M}{(R + h)^2}, \quad (1.32)$$

где M — масса Земли,

R — её радиус.

Единицы измерения

- Масса измеряется в **килограммах**:

$$[m] = \text{кг}.$$

- Расстояние измеряется в **метрах**:

$$[h] = [R] = [r] = \text{м}.$$

- Сила измеряется в **ньютонах**:

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

Подробное объяснение

Тело, поднятое над Землёй, падает вниз. Это происходит под действием *силы тяжести*, или *гравитационной силы*. Она равна весу тела P , который мы измеряем с помощью пружинных весов. Чем больше масса тела, тем больше эта сила. Опыт показывает, что все тела падают с одинаковым ускорением. Это значит, что *инертная и гравитационная массы тел равны друг другу*.

У поверхности Земли ускорение свободного падения

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2.$$

Притяжение тел к Земле вызвано природным свойством всех материальных тел притягиваться друг к другу — *гравитацией*. Закон всемирного тяготения, которому подчиняется сила гравитации, был открыт И. Ньютоном в XVII веке.

Численное значение гравитационной постоянной определяется экспериментально. Для этого нужно измерить силу взаимного притяжения двух тел с известными массами m_1 и m_2 , находящихся на известном расстоянии r друг от друга. Тогда из уравнения (1.31) можно найти G .

Чтобы обосновать свой закон, Ньютон воспользовался тем, что центростремительное ускорение $a_{\text{ц}}$ тела, находящегося на расстоянии $r = 384\,000$ км от центра Земли (r — радиус орбиты Луны), т. е. его ускорение свободного падения на этой высоте, в 3600 раз меньше ускорения свободного падения g у поверхности Земли — на расстоянии $R = 6400$ км от её центра.

Ускорение $a_{\text{ц}}$ можно найти из уравнения (1.17) $a_{\text{ц}} = \frac{v^2}{r}$, вычислив скорость движения Луны по своей орбите — отношение длины орбиты к периоду её обращения $v = \frac{2\pi r}{T}$.

Если закон тяготения (1.31) справедлив, то вес тела на орбите Луны

$$P_{\text{л}} = ma_{\text{ц}} = G \frac{mM}{r^2},$$

а на поверхности Земли

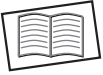
$$P = mg = G \frac{mM}{R^2},$$

где M — масса Земли.

Разделив первое уравнение на второе, видим, что отношение $\frac{a_{\text{ц}}}{g}$ обратно пропорционально отношению квадратов расстояний $\frac{r^2}{R^2}$, которое также составляет 3600 единиц.

Сокращая во втором уравнении массу тела m , можно найти массу Земли:

$$M = g \frac{R^2}{G}. \quad (1.33)$$

Примеры решения задач

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.

- Решение. Воспользуемся формулой (1.32), в которой примем $h = 0$. Тогда

$$M = \frac{gR^2}{G}.$$

Плотность находим по формуле (1.21). Поскольку объём шара $V = \frac{4\pi}{3}R^3$, получим

$$\rho = \frac{3M}{4\pi R^3}.$$

- Ответ. $M = 6 \cdot 10^{24}$ кг; $\rho = 5,5 \cdot 10^3$ кг/м³.



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?

- Решение. Период обращения Земли вокруг Солнца

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

Скорость её движения найдём, воспользовавшись тем, что сила притяжения Земли к Солнцу является центростремительной. Согласно (1.32) и (1.17),

$$G \frac{M}{R^2} = \frac{v^2}{R},$$

откуда

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R}}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{GM}}.$$

- Ответ. $T = 3,2 \cdot 10^7$ с (1 год); $v = 29,4$ км/с.

1.2.7. Явление невесомости. Искусственные спутники земли

определения и основные формулы

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

$$v_1 = \sqrt{gR} \approx 8 \text{ км/с.} \quad (1.34)$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения,

$R = 6400 \text{ км}$ — радиус Земли.

Подробное объяснение

Космонавты во время полёта на космическом корабле находятся в состоянии невесомости. Оно проявляется в том, что все предметы, как и сами космонавты, перестают испытывать действие силы тяжести, источником которой в обычных условиях является планета Земля. Сама она вместе со своим спутником — Луной и другими планетами Солнечной системы находится в поле тяготения Солнца. В свою

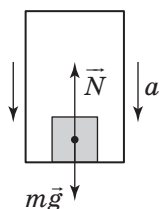


рис. 1.16

очередь, Солнце — одна из миллиардов звёзд, образующих нашу галактику Млечный Путь, — движется вокруг её центра под действием сил гравитации. Поэтому явление невесомости не может быть связано с отсутствием силы тяжести где-либо во Вселенной. Вместе с тем это явление легко объяснить, рассматривая тело, находящееся в кабине лифта, движущегося вниз с ускорением a (рис. 1.16).

Тело массой m испытывает действие силы притяжения Земли mg (вес тела) и силы нормального давления N со стороны кабины лифта. По второму закону Ньютона

$$ma = mg - N,$$

откуда

$$N = m(g - a).$$

Сила давления на кабину лифта меньше веса тела. Давление полностью исчезает, когда ускорение лифта достигнет величины ускорения свободного падения: $a = g$. Это наблюдается при свободном падении лифта, движущегося под действием силы притяжения к Земле. Поскольку тело, находящееся в лифте, подвержено действию этой же силы и падает вниз с тем же ускорением, оно оказывается в состоянии невесомости.

Состояние невесомости в течение длительного времени поддерживается на космических кораблях — искусственных спутниках

Земли. Для того чтобы корабль стал её спутником, он должен иметь скорость, обеспечивающую ему пребывание на круговой орбите.

Совершая полёт по этой орбите, спутник за некоторый промежуток времени перемещается из точки 1 в точку 2 (рис. 1.17). Это перемещение можно разложить на два — перемещение на расстояние Δy вдоль вертикального направления и перемещение на расстояние Δx по горизонтали. В результате спутник оказывается в точке 2 на том же расстоянии r от центра Земли, какое было в начале пути — в точке 1. Он всё время падает на Землю, но и одновременно смещается в перпендикулярном направлении, благодаря чему высота его над Землёй не изменяется.

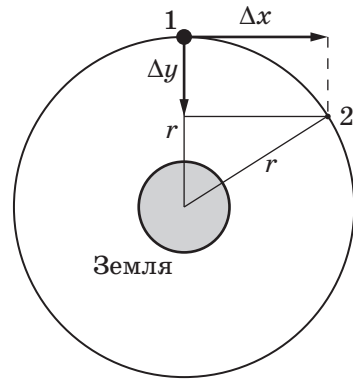


рис. 1.17

Смещение спутника за время t по вертикали $\Delta y = \frac{gt^2}{2}$ определяется ускорением свободного падения g , а по горизонтали $\Delta x = v_1 t$ — его скоростью v_1 на орбите. Эта скорость носит название *первой космической скорости*. Её величину можно найти, приравняв центростремительное ускорение спутника к ускорению свободного падения. Согласно (1.17), $a_{\text{ц}} = \frac{v_1^2}{r}$, откуда $v_1 = \sqrt{a_{\text{ц}} r}$.

Радиус Земли $R = 6400$ км. Полагая, что $r \approx R$, $a_{\text{ц}} = g$, найдём

$$v_1 = \sqrt{gR} \approx 8 \text{ км/с.}$$

Двигаясь с такой скоростью, тело становится её искусственным спутником. При увеличении скорости орбита вытягивается, превращаясь в эллипс, один из полюсов которого совпадает с центром Земли (рис. 1.18).



рис. 1.18

Если скорость тела превысит величину

$$v_2 = \sqrt{2gR} \approx 11,2 \text{ км/с},$$

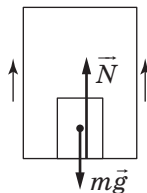
оно покинет Землю и уйдёт в космос, оставаясь спутником Солнца. Скорость v_2 называется *второй космической скоростью*.

Понятие о первой и второй космических скоростях применимо к любой из планет Солнечной системы. Численные же их значения, согласно (1.34), определяются размером и массой планеты.

Примеры решения задач

ОГЭ

При разгоне лифт проходит путь $s = 3$ м за время $t = 2$ с. Какую силу давления испытывает человек, поднимающийся вверх, если его масса $m = 70$ кг?



► Решение.

Человек в лифте испытывает действие силы тяжести mg и силы давления со стороны лифта N . Уравнение его движения (1.24) имеет вид

$$ma = N - mg. \quad (1)$$

Ускорение лифта найдём, выразив его из (1.7):

$$a = \frac{2s}{t^2}.$$

Подставляя в (1), получим

$$N = m \left(\frac{2s}{t^2} + g \right).$$

► Ответ. $N = 805$ Н.

ЕГЭ

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?

► Решение. Скорость космического корабля найдём, выразив её из формулы (1.34):

$$v = \sqrt{g_{(h)}(R + h)} = \sqrt{\frac{GM}{R + h}},$$

где $R = 6400$ км — радиус Земли, M — её масса,

$g_{(h)} = G \frac{M}{(R + h)^2}$ — ускорение свободного падения на высоте h .

Период его обращения по орбите найдём, разделив длину окружности на скорость:

$$T = \frac{2\pi(R + h)}{v} = 2\pi\sqrt{\frac{(R + h)^3}{GM}}.$$

- Ответ. $T_1 = 1,55$ ч, $v_1 = 7,67$ км/с; $T_2 = 1,62$ ч, $v_2 = 7,56$ км/с;
 $\frac{T_2}{T_1} = 1,05$. Увеличится на 5 %.

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

определения и основные формулы

- **Работа постоянной силы F** при перемещении тела на пути s :

$$A = F \cdot s \cos \alpha, (\vec{F} = \text{const}), \quad (1.35)$$

где α — угол между направлением движения и направлением силы.

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

$$P = \frac{A}{t}. \quad (1.36)$$

Единицы измерения

- Единица измерения работы — **джоуль**:

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

- Единица измерения мощности — **ватт**:

$$[P] = \text{Вт} = \text{Дж/с}.$$

Подробное объяснение

Если сила, приложенная к телу, заставляет его двигаться, то она совершает работу. Пусть тело, на которое действует постоянная сила

$\vec{F}$, проходит путь s (рис. 1.19). Работа этой силы выражается формулой (1.35).

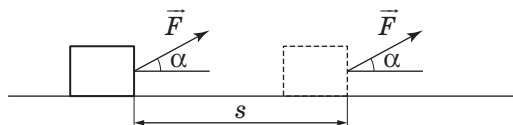


рис. 1.19

Сила, действующая в направлении движения, увеличивает скорость тела, а совершаемая ею работа положительна. Сила в 1 Н на пути в 1 м совершает работу в 1 Дж.

Понятие мощности применяется к устройствам, совершающим работу, т. е. к двигателям различной природы — тепловым, электрическим.

Мощность двигателя составляет 1 Вт, если за 1 секунду он совершает работу в 1 Дж.

Примеры решения задач



Подъёмник элеватора массой $m = 10^3$ кг начинает подниматься вертикально с ускорением $a = 2$ м/с². Определить работу за первые $t = 5$ с движения.

► Решение. Работа постоянной силы F (поскольку $a = \text{const}$) выражается формулой (1.35):

$$A = F \cdot s. \quad (1)$$

Силу F , действующую в направлении движения подъёмника, найдём из уравнения движения (1.24):

$$ma = F - mg,$$

откуда

$$F = m(a + g). \quad (2)$$

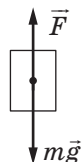
Чтобы найти путь, пройденный за время t , воспользуемся формулой (1.7):

$$s = \frac{at^2}{2}. \quad (3)$$

Подставив (2) и (3) в (1), получим

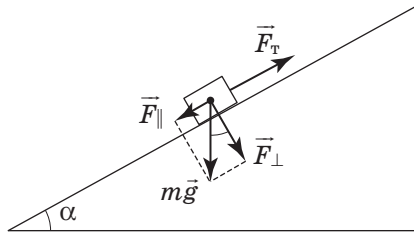
$$A = m(a + g) \frac{at^2}{2}.$$

► Ответ. $A = 3 \cdot 10^5$ Дж.



ОГЭ

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



- Решение. Поскольку скорость движения трактора постоянна ($a = 0$), скатывающая сила $F_{\parallel}$ равна силе тяги его двигателя (см. рисунок):

$$mg \cdot \sin \alpha = F_T. \quad (1)$$

Работа, совершаемая на пути s , согласно (1.35),

$$A = F_T \cdot s.$$

Согласно (1.36), мощность двигателя

$$P = \frac{A}{t} = F_T \cdot v, \quad (2)$$

поскольку $v = \frac{s}{t}$.

Подставив в (2) F_T из уравнения (1), найдём

$$\sin \alpha = \frac{P}{mg \cdot v}.$$

- Ответ. $\sin \alpha = 0,306$; $\alpha = 17^\circ$.

ЕГЭ

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?

- Решение. Мощность, согласно (1.36), равна работе, совершаемой двигателем за единицу времени:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{F_T \cdot s}{t}, \quad (1)$$

где сила тяги

$$F_T = ma. \quad (2)$$

Путь, пройденный за время t , согласно (1.7),

$$s = \frac{at^2}{2}.$$

Отсюда найдём ускорение автомобиля:

$$a = \frac{2s}{t^2}. \quad (3)$$

Подставив (2) и (3) в (1), получим

$$P = \frac{2ms^2}{t^3}.$$

► Ответ. $P = 100$ кВт.

1.3.2. Кинетическая энергия

определения и основные формулы

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

$$K = \frac{mv^2}{2}. \quad (1.37)$$

- **Связь работы с кинетической энергией:**

$$A_{12} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \Delta K, \quad (1.38)$$

где A_{12} — работа результирующей силы на отрезке траектории 1–2,

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

Единицы измерения

- Единица измерения кинетической энергии — джоуль:

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

Подробное объяснение

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

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

Из определения следует, что работа результирующей силы равна *приращению* кинетической энергии тела:

$$A_{12} = K_2 - K_1 = \Delta K,$$

где K_1 и K_2 — её значения в начальной и конечной точках пути.

Примеры решения задач



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

► Решение.

Обозначим через v_1 скорость камня на высоте $\frac{h}{2}$. Путь, пройденный камнем до этой

точки, $s = \frac{h}{2}$. Воспользовавшись формулой (1.8), найдём

$$v_1^2 = 2g \cdot \frac{h}{2}. \quad (1)$$

Высоту h найдём, используя формулу (1.7):

$$h = \frac{gt^2}{2}. \quad (2)$$

Кинетическая энергия камня в средней точке пути, с учётом (1) и (2):

$$K = \frac{mv_1^2}{2} = \frac{mg^2t^2}{4}.$$

► Ответ. $K = 480$ Дж.



Автомобиль массой $m = 10^3$ кг, стоящий неподвижно, разгоняется до скорости $v_1 = 60$ км/ч. Двигатель его совершает при этом работу $A_1 = 1400$ кДж. Какую работу совершит двигатель, продолжив разгон автомобиля до скорости $v_2 = 120$ км/ч?

► Решение. Согласно (1.38), работа равна приращению кинетической энергии:

$$A_2 = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \frac{3mv_1^2}{2}, \quad (1)$$

поскольку, по условию задачи, $v_2 = 2v_1$.

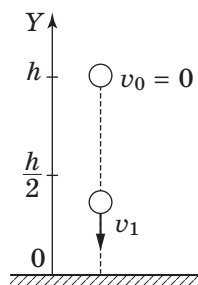
При разгоне до скорости v_1 совершается работа

$$A_1 = \frac{mv_1^2}{2}. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), получим

$$A_2 = 3A_1.$$

► Ответ. $A_2 = 4200$ кДж.



ЕГЭ

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.

► Решение. Работа силы сопротивления, согласно (1.35):

$$A = F_c \cdot d. \quad (1)$$

Согласно (1.38), эта работа идёт на изменение кинетической энергии пули:

$$A = \frac{mv_0^2}{2} - \frac{mv^2}{2}. \quad (2)$$

Приравнявая правые части (1) и (2), найдём

$$F_c = \frac{m}{2d}(v_0^2 - v^2).$$

► Ответ. $F = 25$ кН.

1.3.3. Потенциальная энергия. Закон сохранения энергии в механике

определения и основные формулы

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

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

$$U = A_{10}. \quad (1.39)$$

► **Связь работы с потенциальной энергией:**

$$A_{12} = U_1 - U_2 = -\Delta U, \quad (1.40)$$

где A_{12} — работа консервативной силы на отрезке траектории 1–2,

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

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

$$U_{\text{гп}} = mgh, \quad (1.41)$$

где m — масса тела,

h — высота его над поверхностью Земли,

$g = 9,8$ м/с² — ускорение свободного падения.

► **Потенциальная энергия упругодеформированной пружины:**

$$U_{\text{упр}} = \frac{kx^2}{2}, \quad (1.42)$$

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:

$$K + U = \text{const}. \quad (1.43)$$

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

$$W_1 - W_2 = |A_{\text{тр}}|, \quad (1.44)$$

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

Единицы измерения

► Единица измерения энергии — **джоуль**:

$$[K] = [U] = [W] = \text{Дж}.$$

Подробное объяснение

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.

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

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, а также сила Лоренца, действующая

на заряд, движущийся в магнитном поле, и сила Кориолиса, возникающая во вращающихся системах отсчёта. Обе эти силы направлены перпендикулярно скорости тела и не совершают работы.

Потенциальной энергией обладают тела, поднятые над Землёй, например копер для забивания свай, гири 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.

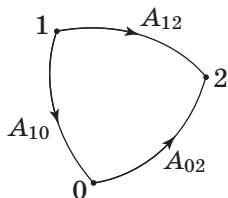


рис. 1.20

Пусть потенциальная энергия определена относительно точки O (рис. 1.20). В силу независимости работы от формы пути работа A_{12} при перемещении тела из точки 1 в точку 2 по короткому пути равна работе при перемещении его по пути, проходящему через точку O :

$$A_{12} = A_{10} + A_{02}.$$

При этом $A_{10} = U_1$, $A_{02} = -A_{20} = -U_2$, откуда следует, что работа консервативной силы равна *убыли* его потенциальной энергии:

$$A_{12} = U_1 - U_2 = -\Delta U.$$

С другой стороны, эта работа, согласно (1.38), равна *приращению* его кинетической энергии:

$$A_{12} = K_2 - K_1.$$

Таким образом, $A_{12} = U_1 - U_2 = K_2 - K_1$ или

$$K_1 + U_1 = K_2 + U_2 = \text{const}.$$

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 его энергии не изменяется.

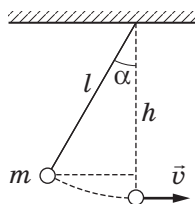
Уравнение (1.43) выражает *закон сохранения энергии в механике*.

Если движение сопровождается трением, то, как следует из (1.40), при переходе тела из положения 1 в положение 2 часть его потенциальной энергии идёт на совершение работы по преодолению трения, выражаемой уравнением (1.44).

Примеры решения задач



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



► Решение.

Отклонив нить на угол α , мы сообщаем шарiku потенциальную энергию (см. рисунок):

$$U = mg \cdot (l - h).$$

Проходя нижнюю точку, шарик движется со скоростью v . При этом его кинетическая энергия становится равной потенциальной энергии в начале пути:

$$\frac{mv^2}{2} = mg \cdot (l - h).$$

Отсюда

$$v = \sqrt{2g(l - h)}.$$

Поскольку $h = l \cdot \cos \alpha$, это уравнение можно привести к виду:

$$v = 2\sqrt{gl} \cdot \sin \frac{\alpha}{2},$$

используя тригонометрическое тождество

$$1 - \cos \alpha = 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}.$$

► Ответ. $v = 4$ м/с.



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?

► Решение. Самолёт движется с постоянной скоростью, поэтому работа мотора идёт на увеличение его потенциальной энергии (1.41):

$$A = mgh.$$

Мощность двигателя, согласно (1.36):

$$P = \frac{mgh}{t}.$$

► Ответ. $P = 490$ кВт.

ЕГЭ

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?

- Решение. Согласно (1.44), потеря механической энергии пули происходит за счёт силы трения, работа которой

$$A_{\text{тр}} = W_1 - W_2. \quad (1)$$

В нашем случае потенциальная энергия пули в начале и конце пути одинакова, поэтому

$$W_1 - W_2 = K_1 - K_2. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим:

$$A_{\text{тр}} = \frac{m}{2}(v_0^2 - v^2).$$

- Ответ. $A_{\text{тр}} = 3,8$ кДж.

1.3.4. Импульс тела. Закон сохранения импульса

определения и основные формулы

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

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (1.45)$$

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

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}_{\text{рез}}. \quad (1.46)$$

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

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots = \text{const}. \quad (1.47)$$

- **Неупругое соударение двух тел** — после соударения они соединяются и движутся как одно тело.

Единицы измерения

- Единица измерения импульса:

$$[p] = \text{кг} \cdot \text{м/с}.$$

Подробное объяснение

Для тела постоянной массы изменение импульса обусловлено изменением его скорости:

$$\Delta \vec{p} = m \Delta \vec{v}.$$

Пусть оно происходит под действием приложенных сил за короткий промежуток времени Δt . Разделив это равенство на Δt и учитывая (1.24), получим

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{F}_{\text{рез}}, \quad (1.48)$$

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

Из законов Ньютона следует закон сохранения импульса (1.47).

Рассмотрим замкнутую систему, состоящую из двух тел — *A* и *B* (рис. 1.21).

По третьему закону Ньютона, силы их взаимодействия

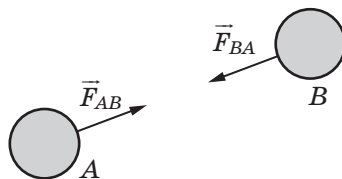


рис. 1.21

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}.$$

Согласно (1.48), $\vec{F}_{AB} = \frac{\Delta \vec{p}_A}{\Delta t}$, $\vec{F}_{BA} = \frac{\Delta \vec{p}_B}{\Delta t}$, поэтому $\frac{\Delta \vec{p}_A}{\Delta t} = -\frac{\Delta \vec{p}_B}{\Delta t}$,

т. е. $\frac{\Delta(\vec{p}_A + \vec{p}_B)}{\Delta t} = 0$, откуда следует, что $\vec{p}_A + \vec{p}_B = \text{const}$.

Векторное уравнение (1.47) распадается на три независимых уравнения для компонент импульса по осям координат:

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

Если вдоль какого-либо направления на тела системы не действуют внешние силы, то проекция её суммарного импульса на это направление остаётся 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 физики. То обстоятельство, что для произведения $m\vec{v}$ — массы тела на его скорость — имеет место «закон сохранения», делает целесообразным дать ему специальное название — импульса $\vec{p}$.

Примеры решения задач



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.

- Решение. Тела, о которых идёт речь, составляют замкнутую систему и для них выполняется закон сохранения импульса (1.47):

$$m_1 v_1 = (m_1 + m_2) v,$$

где v — скорость тел после соударения.

Кинетическая энергия тел, согласно (1.37),

$$K = \frac{(m_1 + m_2) v^2}{2} = \frac{m_1^2 v_1^2}{2(m_1 + m_2)}.$$

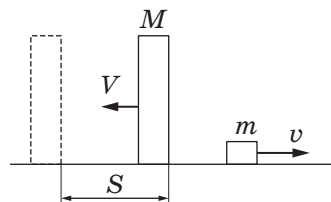
- Ответ. $K = 0,18$ Дж.



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 $\mu = 0,02$?

- Решение.

После броска шайбы конькобежец движется в противоположную сторону со скоростью V (см. рисунок). При наличии трения его кинетическая энергия расходуется на работу по преодолению силы трения:



$$\frac{MV^2}{2} = F_{\text{тр}} \cdot s, \quad (1)$$

где, согласно (1.27),

$$F_{\text{тр}} = \mu \cdot Mg. \quad (2)$$

Начальную скорость конькобежца v найдём, воспользовавшись законом сохранения импульса (1.47):

$$MV = mv,$$

откуда $V = \frac{m}{M} v$. Подставляя V и силу трения (2) в уравнение (1), найдём расстояние s , пройденное конькобежцем до полной остановки:

$$s = \frac{V^2}{2\mu g} = \frac{v^2}{2\mu g} \left(\frac{m}{M} \right)^2.$$

► Ответ. $s = 0,07$ м.



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?

► Решение. Кинетическая энергия вагона после его остановки превращается в потенциальную энергию сжатой пружины. Согласно (1.37) и (1.42), получим уравнение

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{kx^2}{2},$$

откуда деформация пружины

$$x = \sqrt{\frac{m}{k}} \cdot v.$$

► Ответ. $x = 0,27$ м.

1.3.5. Упругое соударение тел

определения и основные формулы

- **Удар** — соударение двух тел, приводящее к изменению их скоростей.
- **Центральный удар** — соударение двух шаров, при котором скорости шаров до и после соударения направлены вдоль прямой, соединяющей их центры.
- **Абсолютно упругий удар** — соударение тел, в результате которого не происходит потери механической энергии — деформация, возникающая при соударении, является упругой.

Подробное объяснение

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 уравнивается 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. 1.22, а). Требуется найти скорости шаров u_1 и u_2 после их соударения друг с другом (рис. 1.22, б).

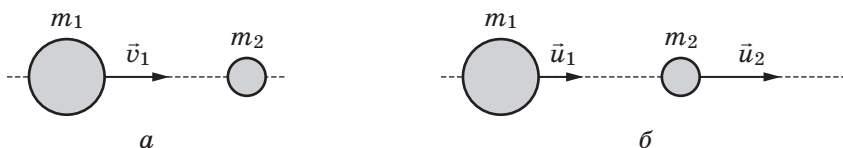


рис. 1.22

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

$$m_1 v_1 = m_1 u_1 + m_2 u_2. \quad (1.49)$$

Перепишем эти уравнения в виде

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

$$m_1 (v_1 - u_1) = m_2 u_2.$$

Разделив первое уравнение на второе, получим

$$v_1 + u_1 = u_2.$$

Решая это уравнение совместно с (1.49), найдём

$$u_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1, \quad u_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1. \quad (1.50)$$

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.

Примеры решения задач



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

- Решение. Задача об упругом соударении двух тел массами m_1 и m_2 рассмотрена в 1.3.5.

Скорости тел после соударения даются формулами (1.50). Полагая, что m_1 — масса нейтрона, $m_2 = 12m_1$ — масса атома углерода, v_1 — скорость нейтрона до соударения, найдём скорость атома углерода после соударения:

$$v_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1 = \frac{2v_1}{13}. \quad (1)$$

Поскольку, согласно (1.37), начальная кинетическая энергия нейтрона

$$K_1 = \frac{m_1 v_1^2}{2}, \quad (2)$$

а кинетическая энергия атома углерода после соударения

$$K_2 = \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_2}{2} \left(\frac{2m_1 v_1}{m_1 + m_2} \right)^2,$$

их отношение

$$\frac{K_2}{K_1} = \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} = \frac{48}{169} = 0,28.$$

- Ответ. Нейтрон передаёт атому замедлителя 28 % своей энергии. Эта доля тем больше, чем меньше разница в массах частиц.

1.4. СТАТИКА

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

1.4.1. Простые механизмы. Золотое правило механики

определения и основные формулы

- **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 .
- **Условие равновесия составного блока:**

$$F_1 \cdot R_1 = F_2 \cdot R_2, \quad (1.51)$$

где F_1 и F_2 — силы, приложенные по касательным к цилиндрам в противоположных друг другу направлениях.

► **Золотое правило механики:**

$$F_1 \cdot h_1 = F_2 \cdot h_2, \quad (1.52)$$

где h_1 и h_2 — перемещения точек приложения сил F_1 и F_2 вдоль направления касательных к цилиндрам составного блока.

► **Условие равновесия рычага:**

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}, \quad (1.53)$$

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

► **Вес тела, поднимаемого воротом:**

$$P = F \cdot \frac{l}{R}, \quad (1.54)$$

где R — радиус барабана ворота,
 l — длина ручки,
 F — сила, приложенная к её концу.

► **Сила, действующая на обух клина:**

$$F = P \cdot \frac{h}{l}, \quad (1.55)$$

где l — длина основания клина,
 h — ширина обуха,
 P — распирающая сила.

► **Сила давления винта, действующая вдоль его оси:**

$$P = F \cdot \frac{2\pi R}{h}. \quad (1.56)$$

где h — шаг винта,
 R — его радиус,
 F — вращающая сила, касательная к его поверхности.

Единицы измерения

► **Линейные величины измеряются в метрах:**

$$[l] = [R] = [h] = \text{м.}$$

► **Силы измеряются в ньютонах:**

$$[F] = [P] = \text{Н.}$$

Подробное объяснение

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 блок (ворот)*. Принцип действия этих механизмов основан на законе сохранения энергии.

Рассмотрим составной блок, изображённый на рис. 1.23. К нитям, намотанным на цилиндры, приложены уравнивающие друг друга силы F_1 и F_2 .

Повернём блок на один оборот против часовой стрелки. Сила F_1 совершит при этом работу $A_1 = F_1 \cdot h_1 = 2\pi R_1 \cdot F_1$, поскольку точка её приложения переместится на расстояние h_1 , равное длине окружности большого цилиндра. Аналогично сила F_2 совершит работу $A_2 = F_2 \cdot h_2 = 2\pi R_2 \cdot F_2$. При отсутствии трения эти работы равны друг другу. Отсюда получаются два условия — (1.51) и (1.52).

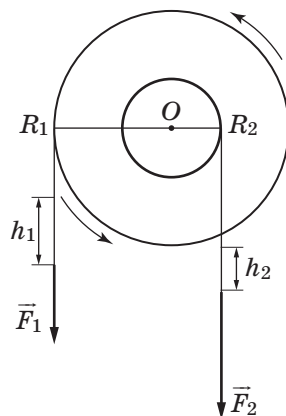


рис. 1.23

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

Второе условие гласит: чем меньше сила, тем больший путь следует пройти, чтобы совершить необходимую работу. Используя такой механизм, мы выигрываем в силе, но проигрываем в пути. Это утверждение известно как *золотое правило механики*.

Если мы хотим поднять тяжёлый груз, мы должны подвесить его к цилиндру меньшего радиуса и вращать блок, прилагая усилие по касательной к большему цилиндру. Одиночный неподвижный блок не даёт выигрыша в силе, а позволяет лишь изменить её направление.

Неподвижный блок, составленный из двух цилиндров разных радиусов, позволяет наиболее просто объяснить принцип работы *рычага*. Это жёсткий стержень CD , закреплённый на оси вращения O , к концам которого приложены силы F_1 и F_2 (рис. 1.24).

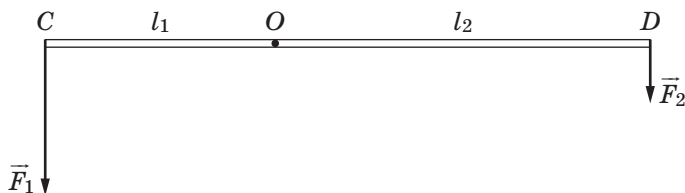


рис. 1.24

Отрезки OC и OD , длиной соответственно l_1 и l_2 , перпендикулярные направлению действия этих сил, называются *плечами рычага*.

Сила, приложенная к длинному плечу, меньше силы, приложенной к короткому, в соответствии с условием (1.56):

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1} > 1.$$

Ось вращения может проходить через любую точку рычага, например через его конец (рис. 1.25). В этом случае

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{OD}{OC} > 1.$$

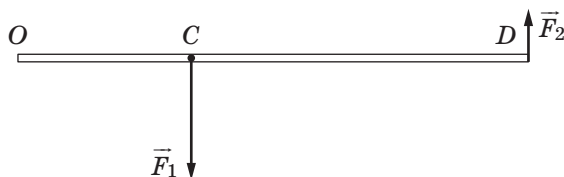


рис. 1.25

Разновидность рычага — *ворот*, который представляет собой барабан радиусом R с прикреплённой к нему длинной ручкой, идущей от его оси (рис. 1.26). Поскольку длина ручки l больше R , сила F , прилагаемая к её концу при вращении барабана, меньше веса груза P , подвешиваемого к нему на верёвке, в соответствии с условием (1.54).

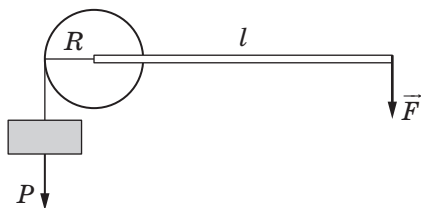


рис. 1.26

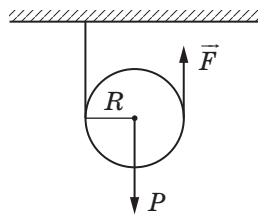


рис. 1.27

Вороты используются при устройстве колодцев, для подъёма вручную тяжёлых грузов, якорей судов, рыболовецких сетей.

Рычагом с соотношением плеч 1:2 является *подвижный блок* (рис. 1.27). Ось его вращения может перемещаться в пространстве. Если тянуть за перекинутую через него верёвку с силой F , то за один оборот блока его ось поднимется на высоту $2\pi R$, а точка приложения силы — на высоту вдвое бóльшую. Согласно (1.52), $4\pi R \cdot F = 2\pi R \cdot P$ и сила натяжения верёвки вдвое меньше веса груза, висящего на оси блока:

$$F = \frac{P}{2}.$$

Подвижный блок даёт двойной выигрыш в силе.

Принцип работы простых машин — *клина* и *винта* — одинаков: используется наклонная плоскость, которую вдвигают под тело, которое хотят поднять (рис. 1.28). Сила F , действующая на обух клина в горизонтальном направлении, благодаря которой он перемещается на расстояние l , меньше силы P — распирающей силы, действующей на тело, поднимая его на высоту h . Чтобы найти её, используем золотое правило механики — равенство работ, совершаемых этими силами. При отсутствии трения, согласно (1.52),

$$F \cdot l = P \cdot h,$$

откуда получим условие (1.55).

Сила F , приложенная к обуху для продвижения клина, во столько раз меньше силы P , во сколько раз основание клина меньше его длины. Пример клина — топор для колки дров.

Клин, навитый на цилиндр радиусом R с длиной окружности $l = 2\pi R$, представляет собой *винт* (рис. 1.29). Шаг винта h — расстояние, на которое он перемещается вдоль своей оси за один оборот. Прикладывая к винту касательную силу F , мы создаём силу давления винта P , большую силы F , в соответствии с условием (1.56).

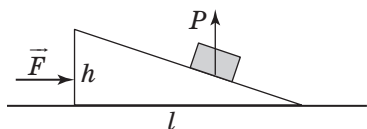


рис. 1.28

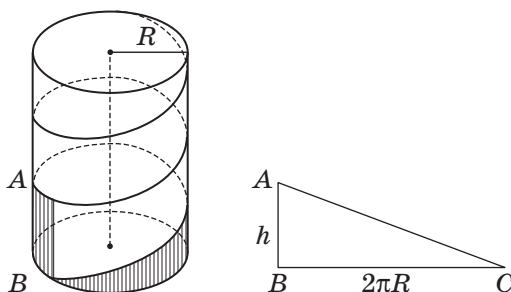


рис. 1.29

Винты с крупной резьбой прямоугольного сечения используются в домкратах, служащих для подъёма тяжёлых грузов, в приводах различных механизмов для преобразования вращательного движения в поступательное.

Работа рассмотренных здесь простых механизмов сопровождается трением, которое зависит от многих факторов — характера трущихся поверхностей, площади их соприкасающихся частей, наличия смазки. Поэтому для оценки величины силы, которая требуется для выполнения работы, вводят понятие *коэффициента полезного действия* (КПД) механизма. Обозначив через $A_{\text{п}}$ полезную работу,

а через A_3 — работу, затраченную фактически, получим КПД механизма, взяв их отношение

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_3}.$$

Чтобы оценить прилагаемую силу, необходимую для подъёма груза, согласно (1.55), вес тела P следует разделить на η :

$$F = \frac{1}{\eta} P \cdot \frac{h}{l}.$$

Сила всегда превышает теоретическое её значение, даваемое приведёнными выше формулами. Численные значения η определяются конкретными условиями работы механизмов.

Примеры решения задач



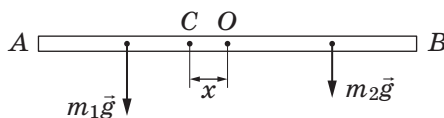
Стержень цилиндрической формы длиной $l = 40$ см состоит на половину своей длины из свинца и наполовину — из железа. Найти его центр тяжести. Плотность свинца $\rho_1 = 11,4$ г/см³, плотность железа $\rho_2 = 7,8$ г/см³.

► **Решение.** *Центр тяжести тела* (центр масс) — точка приложения силы притяжения его к Земле — веса тела P .

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*.

Мысленно закрепим стержень AB на оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его центр тяжести C , отстоящий от его геометрического центра O на расстояние x в сторону более тяжёлой половины стержня.



Воспользуемся условием равновесия рычага (1.53):

$$m_1 g \cdot \left(\frac{l}{4} - x \right) = m_2 g \cdot \left(\frac{l}{4} + x \right), \quad (1)$$

где $m_1 = \rho_1 \cdot V$, $m_2 = \rho_2 \cdot V$ — массы каждой из половин стержня, V — объём половины.

Из уравнения (1) найдём

$$x = \frac{(m_1 - m_2)l}{4(m_1 + m_2)} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \cdot \frac{l}{4}.$$

► Ответ. $x = 1,9$ см.

ЕГЭ

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?

► Решение.

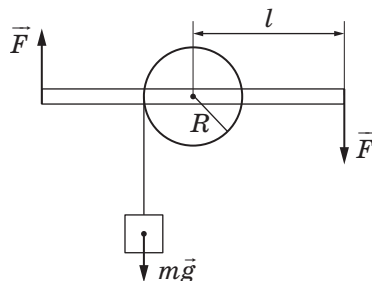
Условие равновесия ворота:

$$mg \cdot R = 2F \cdot l.$$

Отсюда

$$F = mg \frac{R}{2l}.$$

► Ответ. $F = 50$ Н.



1.4.2. Момент силы. Условия равновесия твёрдого тела

определения и основные формулы

- **Центр масс тела** — точка приложения силы тяжести.
- **Момент силы $\vec{F}$ относительно оси** — произведение модуля силы на её плечо:

$$M = F \cdot l. \quad (1.57)$$

- **Плечо силы** — расстояние l от оси до линии действия силы.
- **Условия равновесия твёрдого тела:**

$$M_{1\text{прав}} + M_{2\text{прав}} + \dots = M_{1\text{лев}} + M_{2\text{лев}} + \dots, \quad (1.58)$$

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots = 0, \quad (1.59)$$

где $M_{\text{прав}}$ — моменты сил, вращающих тело по часовой стрелке, $M_{\text{лев}}$ — моменты сил, вращающих тело против часовой стрелки,

$\vec{F}_i$ — силы, приложенные к телу ($i = 1, 2, \dots$).

Единицы измерения

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

$$[M] = \text{Н} \cdot \text{м}.$$

- Плечо силы измеряется в **метрах**:

$$[l] = \text{м}.$$

Подробное объяснение

Рычаг — частный случай тела произвольной формы, изображённого на рис. 1.30. Тело закреплено на оси, перпендикулярной плоскости рисунка и проходящей через его центр масс — точку O . К телу приложено несколько сил, стремящихся повернуть его вокруг этой оси. Равновесие достигается, если выполняется условие (1.58) — сумма моментов сил, вращающих тело в направлении часовой стрелки ($M_{\text{прав}}$), равна сумме моментов сил, вращающих его против часовой стрелки ($M_{\text{лев}}$).

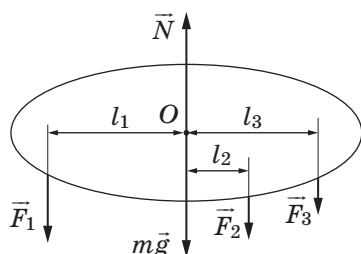


рис. 1.30

В частности, условие равновесия составного блока (1.51) может быть записано в виде

$$M_1 = M_2.$$

Для тела, изображённого на рис. 1.30, оно имеет вид

$$F_2 \cdot l_2 + F_3 \cdot l_3 = F_1 \cdot l_1,$$

поскольку момент силы тяжести mg и момент силы реакции опоры N относительно оси O , проходящей через его центр масс, оба равны нулю.

Тело как целое будет покоиться, если наряду с условием (1.58) выполняется и условие (1.59) — сумма сил, действующих на тело, равна нулю.

В рассматриваемом случае, когда векторы сил лежат в одной плоскости (рис. 1.30), оно приобретает вид

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

Уравнения (1.58) и (1.59) 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. 1.31, а) при смещении шарика сила тяжести возвращает его в исходную точку, во втором случае (рис. 1.31, б) — удаляет от неё. В третьем случае (рис. 1.31, в) при удалении шарика от его первоначального положения не возникает сил, стремящихся вернуть или удалить его от этой точки.

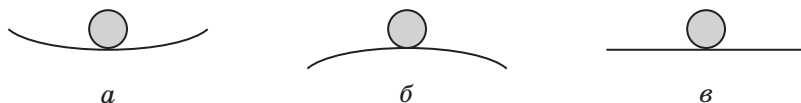
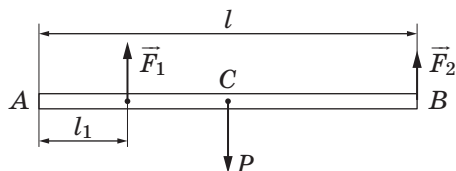


рис. 1.31

Примеры решения задач



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



► Решение.

Для нахождения двух величин — F_1 и F_2 — нужно записать два уравнения, выражающих условия равновесия тела — (1.58) и (1.59).

Пусть ось вращения проходит через точку A. Тогда

$$F_1 \cdot l_1 + F_2 \cdot l = P \cdot \frac{l}{2}, \quad (1)$$

$$F_1 + F_2 = P. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), найдём связь между F_1 и F_2 :

$$F_2 = \frac{l - 2l_1}{l} F_1.$$

Решая это уравнение совместно с (2), получим

$$F_1 = \frac{l}{2(l - l_1)} P, \quad F_2 = \frac{l - 2l_1}{2(l - l_1)} P.$$

► Ответ. $F_1 = 100$ Н, $F_2 = 60$ Н.



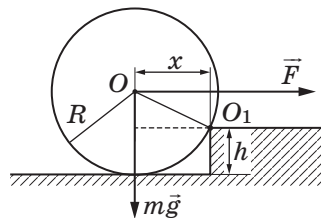
Колесо радиусом $R = 0,25$ м и массой $m = 5$ кг стоит перед ступенькой высотой $h = 0,1$ м. Какую наименьшую горизонтальную силу F надо приложить к оси колеса O , чтобы оно смогло подняться на ступеньку?

► Решение.

При движении на ступеньку колесо вращается вокруг оси O_1 (см. рисунок). На него действуют силы F и mg , стремящиеся повернуть колесо во взаимно противоположных направлениях. Согласно (1.58) моменты этих сил равны друг другу:

$$mg \cdot x = F \cdot (R - h),$$

где $x = \sqrt{R^2 - (R - h)^2}$ — плечо силы mg .



Отсюда найдём

$$F = mg \cdot \frac{\sqrt{(2R - h)h}}{R - h}.$$

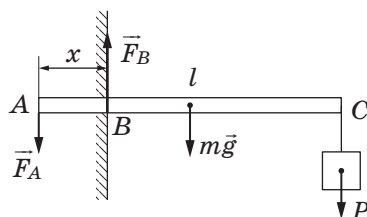
► Ответ. $F = 67$ Н.

ЕГЭ

Балка массой $m = 150$ кг заделана одним концом в стену и опирается в точках A и B (см. рис.). На другом её конце находится груз весом $P = 1,5 \cdot 10^3$ Н. Длина балки $l = 2$ м, длина закреплённого конца $|AB| = 0,5$ м. Считая, что вся нагрузка воспринимается опорами A и B , определить силы давления в опорах.

► Решение.

Ось вращения проведём через точку B . Силы P и mg (вес балки) стремятся повернуть балку по часовой стрелке, а сила F_A — против часовой стрелки. Условие равновесия (1.58) имеет вид



$$mg \left(\frac{l}{2} - x \right) + P(l - x) = F_A \cdot x, \quad (1)$$

где $x = |AB|$.

Второе условие равновесия (1.59) записывается в виде

$$F_A + mg + P = F_B. \quad (2)$$

Из уравнения (1) после преобразований получим

$$F_A = (2P + mg) \frac{l}{2x} - (P + mg).$$

Подставив в (2), имеем

$$F_B = (2P + mg) \frac{l}{2x}.$$

► Ответ. $F_A = 6 \cdot 10^3$ Н, $F_B = 9 \cdot 10^3$ Н.

1.4.3. Гидростатика

определения и основные формулы

► Давление, оказываемое силой F на поверхность площадью S :

$$p = \frac{F_{\perp}}{S}, \quad (1.60)$$

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

- Давление жидкости на глубине h :

$$p = \rho gh, \quad (1.61)$$

где ρ — плотность жидкости,
 g — ускорение свободного падения.

- **Закон Паскаля.** Давление, оказываемое на жидкость или газ, передаётся по всем направлениям одинаково.
- **Соотношение сил, действующих на поршни гидравлического пресса:**

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}, \quad (1.62)$$

S_1 и S_2 — площади поршней.

Единицы измерения

- Давление измеряется в паскалях:

$$[p] = \text{Па} = \text{Н/м}^2.$$

Подробное объяснение

Возьмём цилиндрический сосуд с основанием площадью S и нальем в него жидкость плотностью ρ до высоты h от дна сосуда (рис. 1.32). Сила, действующая на дно, равна весу жидкости:

$$P = mg = \rho Vg. \quad (1.63)$$

Подставляя (1.63) и объём жидкости $V = S \cdot h$ в (1.60), найдём давление на глубине h , выражаемое формулой (1.61).

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. 1.33).

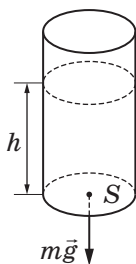


рис. 1.32

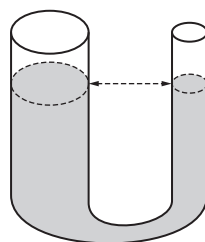


рис. 1.33

Определение давления (1.60) справедливо и для газов. Однако формулу (1.61) использовать для них нельзя, т. к. плотность газа,

например атмосферного воздуха, изменяется с высотой. Можно, однако, это давление измерить.

Впервые опыт по измерению атмосферного давления был проделан Эванджелиста Торричелли в 1643 г. Он использовал своеобразные сообщающиеся сосуды, одним из колен которых была стеклянная трубка длиной около метра, запаянная с одного конца и заполненная ртутью. Вторым коленом служил столб воздуха атмосферы Земли.

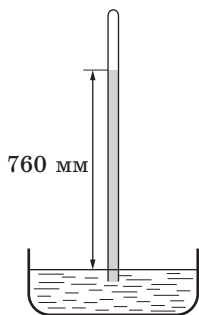


рис. 1.34

Трубка опускалась открытым концом в чашку со ртутью, после чего уровень ртути в трубке сам по себе понижался до высоты около 760 мм над уровнем ртути в чашке (рис. 1.34). Давление атмосферного воздуха было равно давлению столба ртути, поскольку в трубке над ртутью воздух отсутствовал и не создавал дополнительного давления на неё. Трубка со ртутью в этом опыте играла роль *барометра* — прибора для измерения атмосферного давления. Это давление часто указывают в *миллиметрах ртутного столба*:

$$1 \text{ мм рт. ст.} \approx 133 \text{ Па.}$$

Давление столба ртути высотой 760 мм, вычисленное по формуле (1.61), составляет приблизительно 10^5 Па. С увеличением высоты давление атмосферного воздуха уменьшается.

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. 1.35). Сила F_1 , действующая на первый поршень площадью S_1 , создаёт в жидкости дополнительное давление $p = \frac{F_1}{S_1}$. Это

давление, 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:

$$F_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1}. \quad (1.64)$$

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 $V_1 = S_1 \cdot h_1$ 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 (1.64), получим

$$F_2 = F_1 \frac{h_1}{h_2}. \quad (1.65)$$

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.

Гидравлические прессы широко используются в тяжёлой и пищевой промышленности, книгоиздательском деле и других отраслях.

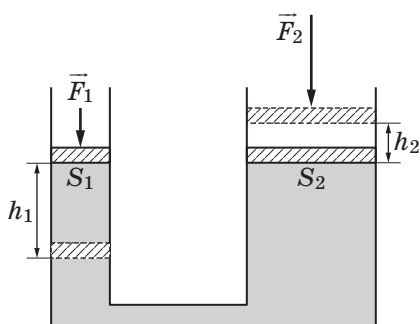
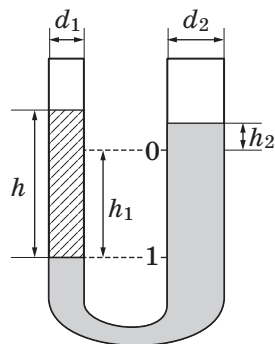


рис. 1.35

Примеры решения задач



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 опустится уровень ртути в узком сосуде и на сколько повысится её уровень в широком? Плотность воды $\rho_{\text{в}} = 1$ г/см³, ртути — $\rho = 13,6$ г/см³.



► Решение.

Пусть O обозначает первоначальный уровень ртути в сосудах, 1 — нижний уровень столба воды в узком сосуде, который согласно (1.61), создаёт на нём давление

$$p = \rho_{\text{в}}gh. \quad (1)$$

В широком сосуде давление на уровне 1 создаётся столбом ртути высотой $h_1 + h_2$:

$$p = \rho g(h_1 + h_2). \quad (2)$$

Приравнявая правые части (1) и (2) и сокращая g , получим уравнение

$$\rho_{\text{в}}h = \rho(h_1 + h_2). \quad (3)$$

Объём ртути, вытесненной водой из узкого сосуда, равен объёму ртути, поднявшейся над первоначальным её уровнем в широком:

$$\frac{\pi d_1^2}{4} \cdot h_1 = \frac{\pi d_2^2}{4} \cdot h_2.$$

Поскольку $d_2 = 2d_1$, найдём отсюда

$$h_1 = h_2 \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 = 4h_2. \quad (4)$$

Решая систему уравнений (3) и (4), получим

$$h_1 = \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho} \cdot \frac{4h}{5}, \quad h_2 = \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho} \cdot \frac{h}{5}.$$

► Ответ. $h_1 = 4$ см, $h_2 = 1$ см.



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 $h_2 = 0,2$ м.

Определить разность уровней ртути. Плотность воды $\rho_1 = 1 \text{ г/см}^3$, керосина — $\rho_2 = 0,8 \text{ г/см}^3$, ртути — $\rho = 13,6 \text{ г/см}^3$.

► Решение.

Давление воды в левом колене сообщающихся сосудов, согласно (1.61),

$$p_1 = \rho_1 g h_1. \quad (1)$$

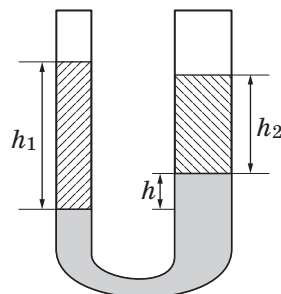
Давление в правом колене на том же уровне складывается из давления столба керосина высотой h_2 и давления столба ртути высотой h :

$$p_2 = \rho_2 g h_2 + \rho g h. \quad (2)$$

Приравнявая друг другу правые части уравнений (1) и (2), найдём

$$h = \frac{\rho_1 h_1 - \rho_2 h_2}{\rho}.$$

► Ответ. $h = 4,7 \text{ см}$.



ЕГЭ

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

► Решение.

Согласно (1.62),

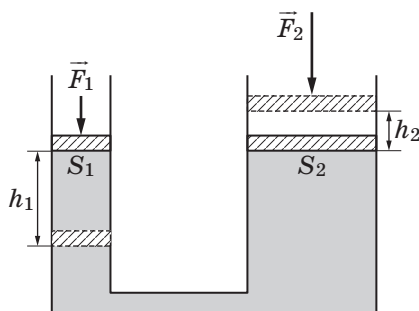
$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1}{S_2}. \quad (1)$$

Силу F_1 найдём, разделив работу этой силы на расстояние, которое прошёл малый поршень:

$$F_1 = \frac{A_1}{h_1}.$$

Подставляя F_1 в уравнение (1), найдём силу, действующую на большой поршень:

$$F_2 = \frac{S_2}{S_1} \cdot \frac{A_1}{h_1}.$$



Высоту его поднятия найдём, учитывая, что объём жидкости, вытесненной из малого цилиндра, равен объёму жидкости, поступившей в большой цилиндр:

$$S_1 \cdot h_1 = S_2 \cdot h_2,$$

откуда

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

► Ответ. $F_2 = 9,8 \cdot 10^4$ Н, $h_2 = 1$ мм.

1.4.4. Плавание тел. Закон Архимеда

определения и основные формулы

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

$$F_A = \rho g V, \quad (1.66)$$

где V — объём тела,

ρ — плотность жидкости или газа,

g — ускорение свободного падения.

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

$$P_{\text{ж}} = P. \quad (1.67)$$

Единицы измерения

- Объём измеряется в **кубических метрах**:

$$[V] = \text{м}^3.$$

Подробное объяснение

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

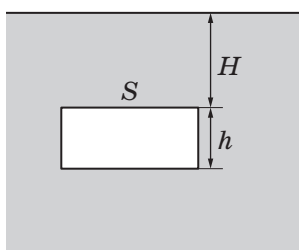


рис. 1.36

Доказать этот закон не представляет труда. Рассмотрим прямоугольный параллелепипед, помещённый в жидкость, нижняя и верхняя грани которого занимают горизонтальное положение (рис. 1.36). Согласно (1.61), давление жидкости на верхнюю грань, находящуюся на глубине H , $p_1 = \rho g H$, а на нижнюю грань — $p_2 = \rho g(H + h)$, где h — высота параллелепипеда. Поскольку давление

на нижнюю грань больше, чем на верхнюю, возникает выталкивающая сила F_A , равная разности сил, приложенных к этим граням:

$$F_A = \rho g[(H + h) - H]S = \rho gh \cdot S = \rho gV,$$

где ρ — плотность жидкости, S — площадь граней, $V = S \cdot h$ — объём параллелепипеда.

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 начнет 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.

Морские и речные суда, имеющие стальные корпуса, плавают благодаря тому, что изготавливаются полыми. Среднее значение плотности судна с перевозимым им грузом меньше плотности воды за бортом, и поэтому суда плавают, возвышаясь над водой и имея запас плавучести даже в штормовую погоду.

Сказанное в отношении жидкостей справедливо и для газов.

Примеры решения задач



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

► Решение.

Тело плавает на поверхности жидкости, если его плотность меньше плотности жидкости. Глубина погружения его в жидкость x находится из условия (1.67):

$$m_{\text{ж}}g = P. \quad (1)$$

Поскольку $m = \rho V$, а $P = \rho a^3 g$, уравнение (1) приводится к виду

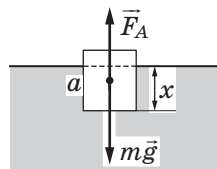
$$\rho_b \cdot V = \rho a^3, \quad (2)$$

где $V = a^2 x$ — объём жидкости, вытесненной телом.

Подставив в (2), найдём

$$x = \frac{\rho}{\rho_b} \cdot a.$$

► Ответ. $x = 5,2 \text{ см}$.





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

► Решение. По второму закону Ньютона (1.24)

$$ma = F_{\text{рез}}.$$

Результирующая сила, действующая на тело в жидкости, равна разности силы тяжести и силы Архимеда:

$$ma = mg - \rho_{\text{в}} g V. \quad (1)$$

Поскольку $m = \rho V$, из уравнения (1), сократив V , найдём плотность стекла:

$$\rho = \rho_{\text{в}} \frac{g}{g - a}.$$

► Ответ. $\rho = 2,4 \text{ г/см}^3$.

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.

Свойства колебательных процессов мы рассмотрим на примере механических колебаний, т. е. колебаний твёрдых тел. Для возникновения колебаний необходимо, чтобы тело находилось в положении устойчивого равновесия, поскольку при отклонении от него появляется сила, возвращающая его 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

определения и основные формулы

- **Гармонический осциллятор** — тело, совершающее гармонические колебания.
- **Гармонические колебания** — колебания, происходящие под действием гармонической силы.
- **Гармоническая сила** — сила, пропорциональная смещению тела от положения равновесия и направленная к положению равновесия.

► **Уравнение гармонических колебаний:**

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (1.68)$$

где x — смещение тела от положения равновесия,
 A — амплитуда колебаний,
 $(\omega t + \varphi_0)$ — фаза колебаний (φ_0 — начальная фаза).

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

► **Фаза колебаний** — характеризует смещение тела и его скорость в момент времени t .

► **Циклическая частота колебаний:**

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}. \quad (1.69)$$

► **Период колебаний T** — время, за которое совершается одно колебание.

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

$$\nu = \frac{N}{t} = \frac{1}{T}, \quad (1.70)$$

где N — полное число колебаний.

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

► **Период колебаний пружинного маятника:**

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (1.71)$$

где m — масса тела,
 k — жёсткость пружины.

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

► **Период колебаний математического маятника:**

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (1.72)$$

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

Единицы измерения

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

$$[x] = \text{м}.$$

- Период измеряется в **секундах**:

$$[T] = \text{с.}$$

- Частота измеряется в **герцах**:

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

Подробное объяснение

Рассмотрим движение пружинного маятника, происходящее без трения вдоль координатной оси X (рис. 1.37). В положении равновесия геометрический центр тела расположен в точке $x = 0$.

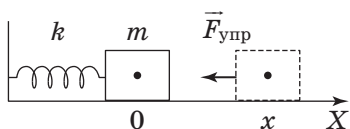


рис. 1.37

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

$$F_{\text{упр}} = -kx,$$

где k — жёсткость пружины.

Такую силу называют *гармонической*. Под её действием тело начинает двигаться. По мере приближения к положению равновесия сила ослабевает и обращается в нуль 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 колебания, которые без воздействия внешних сил называются *свободными*.

Гармонические колебания пружинного маятника можно представить как колебания проекции на вертикальную ось X точки M , равномерно обращающейся по окружности радиуса A с угловой скоростью ω (рис. 1.38, а). Проекция радиуса OM на эту ось

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

Угол φ равномерно возрастает со временем. Если в начале движения положение точки M характеризовалось углом φ_0 , то с учетом (1.13) и (1.14)

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

Смещение тела в момент времени t — зависимость координаты его центра от времени — даётся уравнением (1.68) и изображается *синусоидой* (рис. 1.38, б).

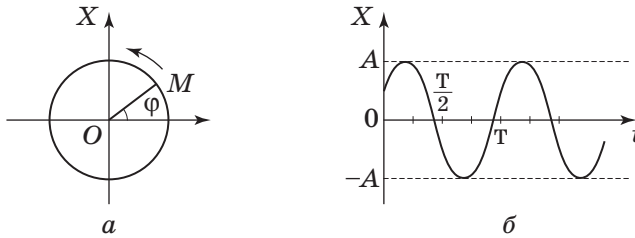


рис. 1.38

Угловая скорость ω , с которой точка M обращается по окружности, называется *циклической частотой* и связана с периодом и частотой колебаний соотношением (1.69).

Угол φ между радиусом OM и горизонтальной осью, соответствующей положению равновесия маятника, называется *фазой колебаний*.

Фаза колебаний 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 рис. 1.38, б. В момент времени $\frac{T}{2}$ маятник смещён от точки $x = 0$ на рис. 1.37 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 φ_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:

$$x(t) = A \cos \omega t. \quad (1.73)$$

Гармонические колебания совершает и *математический маятник* (рис. 1.39). Равнодействующая F силы тяжести mg и силы натяжения нити F_H является гармонической силой. Движение маятника сопровождается переходом потенциальной энергии шарика в его крайних положениях в кинетическую энергию в нижней точке. Присущее ему свойство — *изохронность* (независимость периода колебаний от амплитуды) — используется в механических часах. Этим свойством обладает любой гармонический осциллятор.

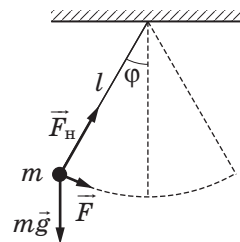


рис. 1.39

Примеры решения задач



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

► Решение. Частота колебаний, согласно (1.70),

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

За один период шарик проходит положение равновесия дважды. Следовательно,

$$T = 2\Delta t, \quad \nu = \frac{1}{2\Delta t}.$$

► Ответ. $\nu = 0,5$ Гц.



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?

► Решение. Период колебаний пружинного маятника, согласно (1.71),

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (1)$$

где $m = \frac{4\pi}{3}R^3\rho$.

Выразим массу второго шарика через массу первого:

$$m_2 = \frac{4\pi}{3}\left(\frac{R}{2}\right)^3 \cdot (2\rho) = \frac{1}{4}m_1.$$

Тогда из (1) следует

$$\frac{T_2}{T_1} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} = \frac{1}{2}.$$

► Ответ. Период уменьшится в 2 раза.



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?

► Решение. Период колебаний математического маятника, согласно (1.72),

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

Поскольку $N_1 < N_2$, длина первого маятника больше длины второго. Отношение их периодов, как следует из (1.70),

$$\frac{T_1}{T_2} = \sqrt{\frac{l + \Delta l}{l}} = \frac{N_2}{N_1}.$$

Отсюда найдём длину второго маятника:

$$l_2 = l = \frac{N_1^2}{N_2^2 - N_1^2} \Delta l.$$

Длина первого маятника $l_1 = l + \Delta l$.

► Ответ. $l_1 = 16$ см, $l_2 = 9$ см.

1.5.2. Энергия гармонического осциллятора

определения и основные формулы

► **Энергия пружинного маятника:**

$$W = \frac{m\omega^2 A^2}{2}, \quad (1.74)$$

где m — масса маятника,
 A — амплитуда колебаний,
 ω — циклическая частота.

Подробное объяснение

Вопрос об энергии гармонического осциллятора рассмотрим на примере пружинного маятника. Она складывается из кинетической энергии тела, движущегося со скоростью v , и потенциальной энергии пружины, деформированной на величину x . Первоначальный запас потенциальной энергии, которую мы ему сообщаем, растягивая пружину на величину A , при движении постепенно превращается в кинетическую энергию тела. Это условие записывается в виде

$$\frac{kA^2}{2} = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}, \quad (1.75)$$

где, согласно (1.73),

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

Подставляя в уравнение (1.75), найдём

$$v^2(t) = \frac{kA^2}{m} \sin^2 \omega t.$$

Тогда

$$K = \frac{kA^2}{2} \sin^2 \omega t, \quad U = \frac{kA^2}{2} \cos^2 \omega t.$$

Выразив квадраты синуса и косинуса через косинус удвоенного аргумента и учитывая, что $k = m\omega^2$, получим

$$K = \frac{m\omega^2 A^2}{4} (1 - \cos 2\omega t), \quad U = \frac{m\omega^2 A^2}{4} (1 + \cos 2\omega t).$$

Кинетическая и потенциальная энергия маятника не остаются постоянными — величина каждой из них колеблется вблизи общего среднего значения $\frac{m\omega^2 A^2}{4}$ с циклической частотой 2ω . Из графиков

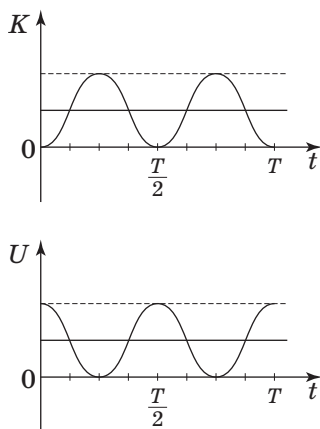


рис. 1.40

этих функций, представленных на рис. 1.40, видно, что в течение одного периода полная энергия дважды целиком переходит в кинетическую энергию и дважды — в потенциальную. Средние их значения совпадают ($\bar{K} = \bar{U}$), поскольку среднее значение косинуса за период колебаний равно нулю. Полная энергия, равная их сумме, выражается формулой (1.74). Она пропорциональна квадрату амплитуды колебаний и квадрату частоты. Эта закономерность справедлива для любого гармонического осциллятора.

Примеры решения задач



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

► Решение. При качании маятника потенциальная энергия маятника в крайних положениях переходит в кинетическую энергию, которая в нижней точке максимальна и равна полной энергии колебаний (1.74):

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = \frac{m\omega^2 A^2}{2}.$$

Отсюда

$$v_{\max} = \omega A = \frac{2\pi}{T} A.$$

► Ответ. $v_{\max} = 4,8 \cdot 10^{-2}$ м/с.

ОГЭ

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

- Решение. Кинетическая энергия маятника имеет наибольшее значение при переходе его через положение равновесия, в котором потенциальная энергия обращается в нуль. В крайних положениях — точках остановки — максимум имеет потенциальная энергия. Приравнявая их, получим

$$K_{\max} = \frac{kA^2}{2}.$$

- Ответ. $K_{\max} = 0,44$ Дж.

ЕГЭ

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 .

- Решение. Воспользуемся формулой (1.72) для периода колебаний математического маятника:

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (1)$$

где $g = \frac{P}{m} = \frac{N}{m}$ — ускорение свободного падения на неподвижной ракете ($P = mg$ — вес тела, N — сила реакции опоры, равная весу).

В ракете, движущейся с ускорением, сила реакции опоры возрастает, что равнозначно увеличению силы тяжести, и теперь можно записать

$$g' = \frac{N'}{m} = \frac{N + ma}{m}, \quad (N = mg). \quad (2)$$

Период колебаний маятника, по условию задачи,

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g'}} = \frac{1}{2}T_0.$$

Подставляя сюда (1) и (2) и сокращая общие множители, получим уравнение

$$\sqrt{\frac{g}{g+a}} = \frac{1}{2},$$

откуда найдём ускорение a , с которым летит ракета.

- Ответ. $a = 3g$.

1.5.3. Затухающие колебания

определения и основные формулы

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

Подробное объяснение

Выше мы рассматривали колебания, происходящие без потери энергии. 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. 1.41). Причины затухания обусловлены силами, тормозящими движение, например силой трения в пружинном маятнике или силой сопротивления среды, действующей на математический маятник. К потере энергии приводит также внутреннее трение, возникающее при деформации пружины или изгибе нити.

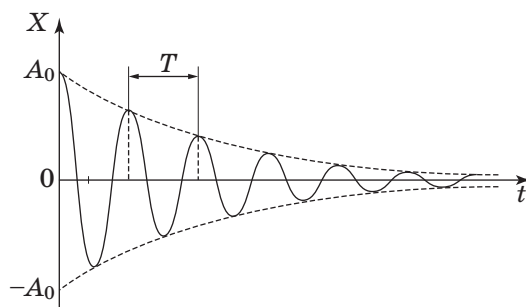


рис. 1.41

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, так что их вполне можно считать свободными. Для этого стремятся уменьшить трение.

В механических часах потери энергии восполняются путём подвода её от источника (например, сжатой пружины), осуществляющего колебания в определённые моменты времени, синхронно с маятником.

В технике нередко встречаются случаи, когда колебания наносят вред и их следует подавить. Например, в стрелочных электроизмерительных приборах подвижная часть соединяется для этого с металлической пластинкой, движущейся в магнитном поле постоянного магнита, на которую действует тормозящая сила благодаря возникающим в ней вихревым токам. Увеличивая тем или иным способом трение, можно достичь столь большого затухания, что система останавливается после первого же колебания или даже до перехода через положение равновесия. Такие сильно затухающие движения колебательной системы называются *апериодическими*.

1.5.4. Вынужденные колебания. Резонанс

определения и основные формулы

- ▶ **Вынужденные колебания** — колебания, происходящие под действием периодической силы с частотой этой силы.
- ▶ **Явление резонанса** — совпадение частоты вынуждающей силы с собственной частотой колебаний системы, при котором амплитуда вынужденных колебаний достигает наибольшего значения.

Подробное объяснение

Свободные гармонические колебания происходят в результате взаимодействия частей колебательной системы друг с другом. В случае пружинного маятника — это пружина и груз. Они характеризуются определённой частотой, зависящей от свойств самой системы. Однако колебательное движение может совершать любое тело, если к нему приложить периодически меняющуюся силу. Именно так движется игла швейной машины или поршни в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания.

Как же будет двигаться колебательная система, если на неё станет воздействовать такая внешняя сила?

Чтобы это установить, обратимся к экспериментальной установке, в которой пружинный маятник — грузик на пружине — расположен вертикально и прикреплен к горизонтальному валу с прогибом (рис. 1.42). При вращении ручки вала точка крепления маятника движется по окружности радиуса, много меньшего его длины. При равномерном вращении колебания,

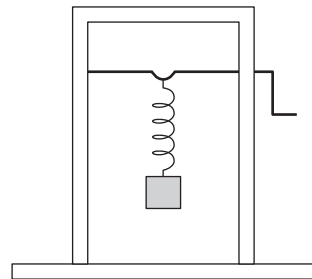


рис. 1.42

совершаемые маятником, можно считать гармоническими. Период вращения ручки равен периоду действующей на него вынуждающей силы, а радиус окружности, по которой движется точка крепления маятника, — её амплитуде.

Когда мы начинаем вращать ручку, грузик приходит в движение. При этом установившиеся колебания грузика будут происходить с частотой вынуждающей силы. Свободные колебания системы из-за наличия трения затухают.

Вынужденные колебания будут периодическими колебаниями с неизменной амплитудой, поскольку энергия колебаний, затрачиваемая на трение, непрерывно восполняется за счёт работы действующей на систему периодической силы.

Амплитуда вынужденных колебаний грузика существенно зависит от частоты вынуждающей силы. Если вращать ручку очень медленно, то грузик вместе с пружиной будет перемещаться вверх и вниз так же, как и точка её крепления — при малых частотах амплитуда вынужденных колебаний совпадает с амплитудой вынуждающей силы.

Размах вынужденных колебаний становится очень большим — в несколько раз больше амплитуды вынуждающей силы, — если частоту вращения ручки сделать близкой к частоте собственных колебаний грузика на пружине. При ещё более быстром вращении ручки амплитуда вынужденных колебаний опять становится меньше и при очень быстром вращении уменьшается до нуля.

Этот опыт показывает, что при действии на колебательную систему периодической силы особенное значение имеет случай, когда частота изменения силы совпадает с собственной частотой колебаний системы. Такое совпадение частот называется *резонансом*. При резонансе амплитуда вынужденных колебаний достигает наибольшего возможного при данных условиях значения. Трение в системе, обуславливающее затухание её свободных колебаний, существенно влияет на эту амплитуду: при слабом трении наблюдается резко выраженный, острый максимум амплитуды. Если трение велико (например, груз движется в воде), амплитуда при резонансе ненамного превышает амплитуду вынуждающей силы, зато при уходе от резонанса в ту или другую сторону уменьшение амплитуды происходит не так резко.

На рис. 1.43 представлена зависимость амплитуды вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы в случае, когда трение мало (кривая 1) и когда трение велико (кривая 2).

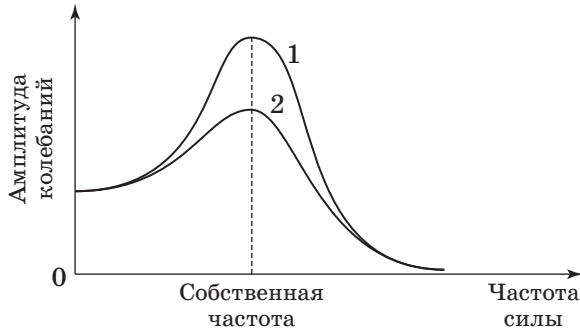


рис. 1.43

Явление резонанса часто проявляет себя при работе машин и механизмов и может привести к их поломке. История развития техники знает немало случаев, когда разрушались огромные мосты под действием ветра или роты марширующих в ногу солдат, ломались валы паровых турбин и крылья самолётов. Поэтому при проектировании такого рода устройств вопросам безопасности уделяют особое внимание.

Явление резонанса находит практическое применение, например, в механических и акустических резонаторах, служащих для анализа звука. Простейшим механическим резонатором является струна с закреплёнными концами или мембрана. Акустический резонатор — сосуд, сообщающийся с внешней средой через небольшое отверстие. В вибропреобразователях резонанс позволяет достигать значительных амплитуд упругих колебаний благодаря периодическому действию сравнительно слабой силы. В радиотехнике явление резонанса лежит в основе многочисленных способов фильтрации сигналов разных частот, обнаружения и приёма слабых сигналов.

Примеры решения задач



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?

- Решение. Толчки колёс о стыки рельс представляют действие периодической вынуждающей силы, период которой равен времени движения поезда между стыками:

$$T = \frac{l}{v}. \quad (1)$$

Амплитуда вынужденных колебаний вагона максимальна, когда частота вынуждающей силы совпадает с собственной

частотой ν_0 его колебаний на рессорах, равной, согласно (1.70) и (1.71),

$$\nu_0 = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (2)$$

где $m = \frac{P}{g}$ — масса вагона, приходящаяся на одну рессору.

Подставляя (1) в (2), получим

$$\nu = \frac{l}{2\pi} \sqrt{\frac{g \cdot k}{P}}.$$

► Ответ. $\nu = 21$ м/с.

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.

В настоящем разделе на примере упругих волн мы рассмотрим характеристики волновых процессов, наблюдаемых в природе, к которым относятся свет, звук, волны на поверхности жидкости.

1.6.1. Механизм образования волн в упругой среде

определения и основные формулы

- Процесс распространения колебаний в пространстве называется **волной**.
- **Источник волн** — тело, совершающее колебания в упругой среде.
- **Продольная волна** — волна, в которой частицы среды колеблются вдоль направления её распространения.
- **Поперечная волна** — волна, в которой колебания частиц среды происходят в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны.
- **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.

- **Скорость волны** — расстояние, на которое перемещается фронт волны за 1 с.
- **Длина волны** — расстояние, проходимое фронтом волны за время, равное периоду колебаний источника.
- **Основное уравнение** волнового процесса:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot \nu, \quad (1.76)$$

где v — скорость волны,

λ — длина волны,

ν — частота колебаний источника,

T — период его колебаний.

Единицы измерения

- Длина волны измеряется в **метрах**:

$$[\lambda] = \text{м}.$$

- Единица измерения частоты — **герц**:

$$[\nu] = 1/\text{с} = \text{Гц}.$$

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

$$[v] = \text{м/с}.$$

Подробное объяснение

Примером волн, которые можно наблюдать, служат волны на поверхности воды — когда в воду падает камень, волны от него идут в виде кругов. Поплавок, приводимый в движение прикреплённой к нему нитью, создаёт такие волны непрерывно.

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.

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 силы, стремящиеся вернуть его в первоначальное положение. В газах и жидкостях могут распространяться только *продольные* волны.

В твёрдых телах, кроме продольных, могут распространяться и волны *поперечные*. Наглядным примером поперечных волн как раз и служат волны на поверхности жидкости, хотя механизм образования таких волн связан с действием на частицы жидкости силы

тяжести, а не сдвиговой упругости. Волны на поверхности жидкости 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.

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.

Распространение колебаний в среде сопровождается перемещением фронта волны со скоростью v , зависящей от свойств среды. Чтобы пояснить механизм распространения волны, выберем в качестве модели упругой среды цепочку из одинаковых шариков, скреплённых друг с другом пружинками (не показанными на рис. 1.44). Смещение одного из шариков приводит в движение другие шарики — возмущение передаётся по цепочке в виде волны.



рис. 1.44

Рассмотрим *поперечную волну*. За первую четверть периода первый шарик (источник волн), расположенный в точке $x = 0$, смещается от положения равновесия вдоль оси Y на расстояние, равное амплитуде колебаний A (рис. 1.45, *а*). Под действием пружинок в том же направлении смещаются и соседние шарики, и возмущение распространяется по цепочке на расстояние $\frac{\lambda}{4}$.

Спустя ещё четверть периода первый шарик возвращается в исходное положение, продолжая двигаться вниз. Волна распространяется ещё на один отрезок $\frac{\lambda}{4}$ и приобретает вид, показанный на рис. 1.45, *б*.

Далее мы наблюдаем смещение первого шарика вниз на максимальное расстояние A и, наконец, возвращение его в исходное положение по истечении времени, равного периоду колебаний T . Соответствующие картины волнового процесса изображены на рис. 1.45, *в* и *г*.

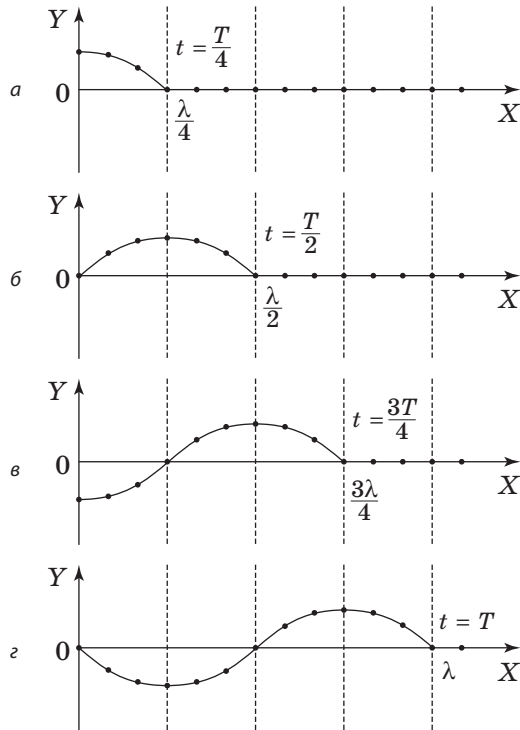


рис. 1.45

В то время как волна распространяется в горизонтальном направлении — вдоль оси X , — шарики (точки среды) совершают колебания в вертикальной плоскости. Благодаря взаимодействию шарики передают друг другу движение, происходящее в поперечном по отношению к оси X направлении. Сила, действующая на каждый из шариков со стороны его соседей, всегда направлена вверх или вниз — колебательная система обладает *сдвиговой упругостью*. При этом волна (волна возмущения) непрерывно смещается вправо.

В *продольной волне* колебания шариков (точек среды) происходят вдоль оси X , т. е. в направлении распространения волны. Картины волнового процесса в разные моменты времени, отличающиеся на четверть периода $\left(\frac{T}{4}\right)$, изображены на рис. 1.46. Синусоиды, идущие сверху вниз, показывают изменение с течением времени положения шариков, отстоящих друг от друга на расстояние в четверть длины волны $\left(\frac{\lambda}{4}\right)$. Продольная волна на фотографии выглядит как чередование сгущений и разрежений точек среды.

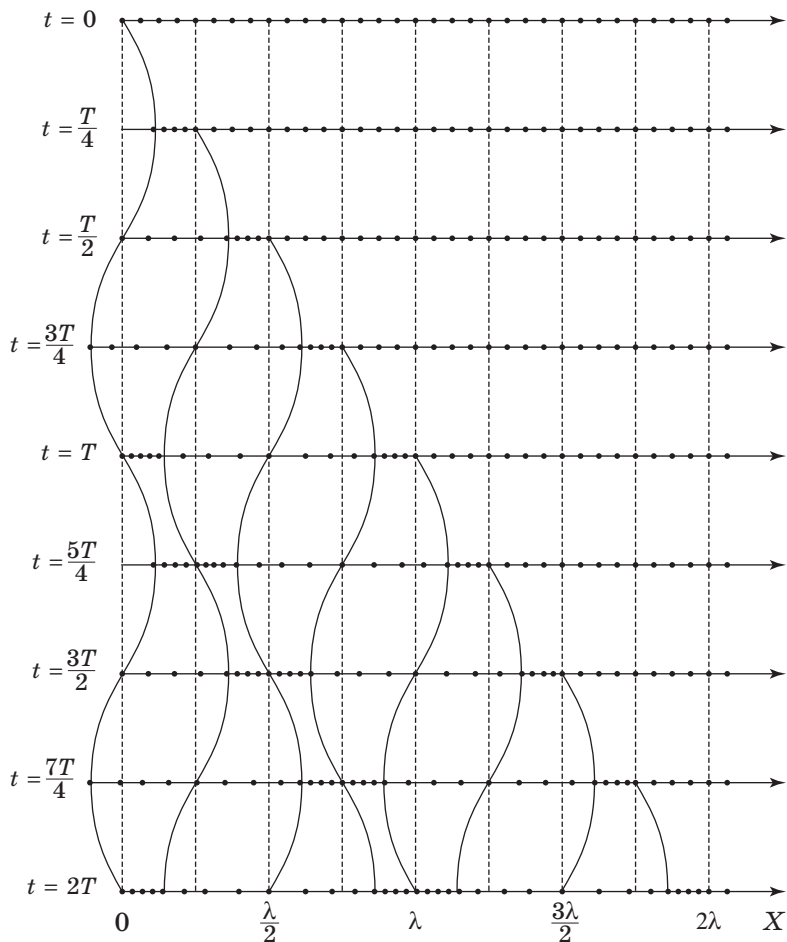


рис. 1.46

Примеры решения задач



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

► Решение. Расстояние, проходимое фронтом волны за время, равное периоду колебаний,

$$s = v \cdot T.$$

Согласно (1.76),

$$s = \lambda = \frac{v}{\nu}.$$

► Ответ. $s = 0,28$ м.

ОГЭ

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.

► Решение.

Пусть скорость волны относительно берега v , а скорость катера — V .

При встречном движении их относительная скорость $v_1 = V + v$. Согласно (1.76),

$$V + v = \lambda \cdot \frac{N_1}{t}. \quad (1)$$

При попутном движении $v_2 = V - v$:

$$V - v = \lambda \cdot \frac{N_2}{t}. \quad (2)$$

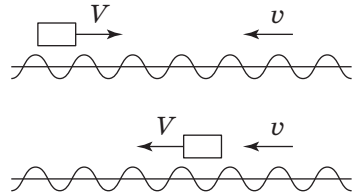
Подставляя в (1) и (2) численные значения, получим систему двух уравнений:

$$\begin{cases} V + v = 4\lambda, \\ V - v = 2\lambda, \end{cases}$$

откуда найдём

$$V = 3\lambda, \quad v = \lambda.$$

► Ответ. $V = 15$ м/с, $v = 5$ м/с.



1.6.2. Звуковые волны

определения и основные формулы

- **Звуковые волны** — волны с частотами в диапазоне от 16 до 20 000 Гц.
- **Музыкальный тон** — звук, испускаемый источником, совершающим гармонические колебания.
- **Высота тона** — частота звуковых волн.
- **Частота звука**, излучаемого струной длины l :

$$\nu = \frac{v}{2l}, \quad (1.77)$$

где v — скорость звука в струне.

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

$$\nu_n = n \frac{v}{2l}, \quad (n = 2, 3, \dots). \quad (1.78)$$

► **Громкость тона** — энергия колебаний источника звука, пропорциональная квадрату амплитуды.

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

Подробное объяснение

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*.

Физическая акустика как область науки изучает физические явления, обуславливающие те или иные качества звука, воспринимаемые нашими органами слуха.

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.

Звук, который мы слышим тогда, когда источник совершает гармонические колебания, называется *музыкальным тоном*. Каждый тон имеет два качества — *высоту* и *громкость*.

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

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

Звук рояля после нажатия на клавишу постепенно затухает. Это происходит вместе с затуханием колебаний струны, т. е. с уменьшением их амплитуды. Ударив по клавише сильнее, т. е. сообщив колебаниям большую амплитуду, мы услышим более громкий звук, чем при слабом ударе. То же можно наблюдать с любым источником звука.

Если колебание не является гармоническим, то на слух оно имеет ещё одно качество — *окраску звука*, или *тембр*. По тембру мы легко распознаём звук голоса, звучание струны рояля, скрипичной струны, звук флейты, органа и т. д., даже если бы все эти звуки имели одну и ту же высоту и громкость.

Дело в том, что любое негармоническое колебание частотой ν можно представить в виде наложения (суперпозиции) гармонических колебаний с частотами ν , 2ν , 3ν и т. д. Первое из них — частотой ν — называется *основным тоном*, а остальные — *обертонами*, или *гармониками*.

Возьмём в качестве источника звука струну длиной l . 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 частоты, выражаемые формулой (1.78).

Число n нумерует гармоники. Значение $n = 1$ соответствует основному тону. Амплитуда колебаний струны этой частоты A_1 имеет наибольшую величину в её середине (рис. 1.47, а). Амплитуда колебаний первой гармоники A_2 максимальна в двух точках струны (рис. 1.47, б), амплитуда колебаний второй гармоники A_3 — в трёх точках (рис. 1.47, в) и т. д. Амплитуды высших гармоник убывают

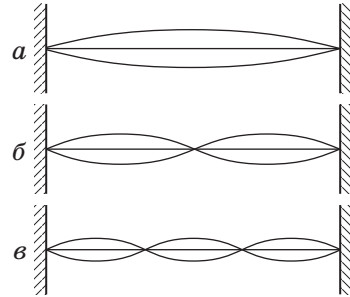


рис. 1.47

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».

Колебания с разными частотами накладываются друг на друга и дают результирующее колебание, форма которого (в развёртке по времени) зависит от его состава. На рис. 1.48 изображены звуковые колебания, создаваемые струной рояля и кларнетом.

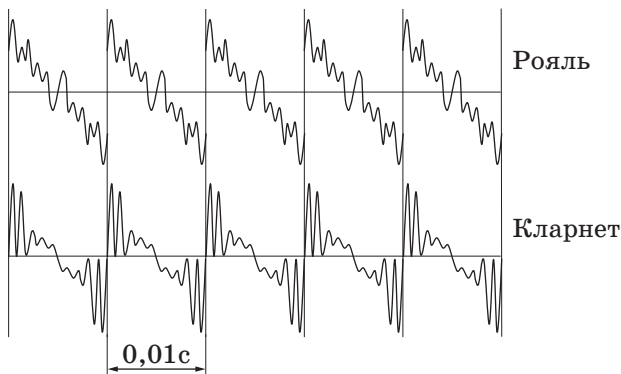


рис. 1.48

Примеры решения задач



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 $v = 330$ м/с.

► Решение. Длина волны связана с частотой уравнением (1.76):

$$v = \lambda \cdot \nu.$$

Отсюда

$$\lambda_{\min} = \frac{v}{\nu_{\max}}, \quad \lambda_{\max} = \frac{v}{\nu_{\min}}.$$

► Ответ. $\lambda_{\min} = 1,65 \cdot 10^{-2}$ м, $\lambda_{\max} = 21$ м.



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.

► Решение. Скорость распространения колебаний (волны), согласно (1.76):

$$v = \lambda \cdot \nu.$$

Колеблющиеся частицы среды имеют наибольшую скорость при переходе через положение равновесия, когда кинетическая энергия частицы равна полной её энергии (1.74):

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = \frac{m\omega^2 A^2}{2},$$

откуда

$$v_{\max} = \omega \cdot A = 2\pi\nu \cdot A.$$

► Ответ. $v_{\max} = 0,785$ м/с, $v = 350$ м/с.

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.

Основные понятия

Молекула — мельчайшая частица вещества, сохраняющая его химические свойства.

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

Внутренняя 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

определения и основные формулы

- ▮ **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 повышением температуры.
 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.
- ▮ **Жидкость** — совокупность подвижных молекул, среднее расстояние между которыми в процессе их движения остаётся неизменным.
- ▮ **Газ** — совокупность свободно движущихся молекул, расстояния между которыми намного превышают их размеры.
- ▮ **Диффузия** — проникновение молекул какого-либо вещества в среду, состоящую из молекул другого вещества.

Подробное объяснение

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 других. 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, 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.

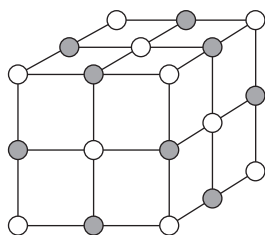


рис. 2.1

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. Несмотря на большое разнообразие существующих в природе кристаллических тел, всем им присуща указанная здесь закономерность — существование дальнего порядка.

В *жидкостях* дальний порядок отсутствует, а их молекулы могут хаотически перемещаться в пространстве, однако при этом среднее расстояние между молекулами сохраняется неизменным. Жидкости не имеют собственной формы, но имеют собственный объём. Схематически жидкость изображена на рис. 2.2.

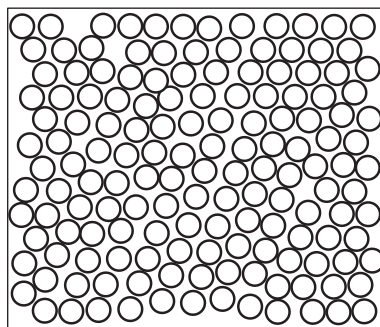


рис. 2.2

Движение молекул жидкости было обнаружено при наблюдении *броуновского движения* — движения взвешенных в ней очень мелких частиц твёрдого вещества. Каждая частица непрерывно совершает скачкообразные перемещения в произвольном направлении, описывая траекторию в виде ломаной линии. Такое поведение частиц можно объяснить, считая, что они испытывают удары молекул жидкости, совершаемые с разных сторон. Различие в числе этих ударов с противоположных направлений приводит к движению частицы, поскольку её масса соизмерима с массами самих молекул. Движение таких частиц впервые обнаружил в 1827 г. английский ботаник Броун, наблюдая под микроскопом частицы цветочной пыльцы в воде, почему оно и было названо броуновским движением.

Расстояния между молекулами *газов* намного превышают их размер, поэтому большую часть времени они 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).

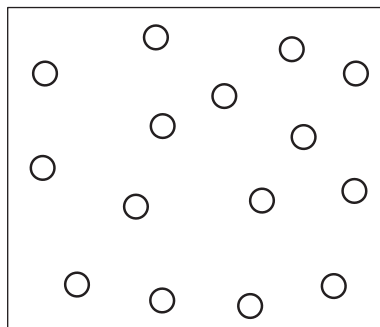


рис. 2.3

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*.

Движение молекул в газах, жидкостях и твёрдых телах проявляет себя и в явлении *диффузии*, которое можно наблюдать в любом из них. Открыв флакон с таким летучим веществом, как эфир, мы почувствуем его резкий запах. Очень быстро — спустя несколько минут — этот запах распространится по всей комнате, даже если воздух в ней остаётся неподвижным.

Бросим теперь в чистую воду синий кристаллик медного купороса. Растворившись, он окрасит в синий цвет нижний слой воды, прилегающий ко дну сосуда. Спустя сутки мы заметим, что синий цвет приобрела и вся находящаяся в сосуде вода. Это случилось благодаря диффузии, приводящей к выравниванию концентрации примеси во всём объёме сосуда.

Описанные явления объясняются хаотическим движением молекул газов и жидкостей. Любая молекула, независимо от её природы, вовлечённая в процесс столкновения с другими молекулами, оказывается в конечном счёте далеко от того места, где она находилась в начале процесса. Диффузия в газах — самый быстрый процесс, в жидкостях он протекает гораздо медленнее, но может наблюдаться даже в твёрдых телах. Опыт показывает, что соединив гладко отполированными поверхностями два бруска из разных металлов, например из меди и алюминия, и оставив их в таком положении на длительное время — на 4–5 лет, мы обнаружим срачивание их за счёт проникновения атомов меди в алюминиевый образец и, наоборот, проникновения атомов алюминия — в медный.

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

Определения и основные формулы

- ▮ **Идеальный газ** — совокупность молекул, суммарный объем которых пренебрежимо мал по сравнению с объемом содержащего этот газ сосуда, а расстояние, на котором молекулы взаимодействуют друг с другом, много меньше среднего расстояния между ними.
- ▮ **Температура** — один из параметров, характеризующих состояние вещества, зависящий от энергии движения его молекул.
- ▮ **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.

- ▮ **Связь** температуры t по шкале Цельсия с температурой T по шкале Кельвина:

$$T = t + 273. \quad (2.2)$$

Единицы измерения

- Температура измеряется в **кельвинах**:

$$[T] = \text{К}.$$

- Внутренняя энергия измеряется в **джоулях**:

$$[U] = \text{Дж}.$$

Подробное объяснение

С точки зрения молекулярно-кинетической теории внутренняя энергия тела — это энергия движения и взаимодействия друг с другом атомов или молекул, из которых оно состоит. Наиболее просто найти внутреннюю энергию идеального газа. Все существующие в природе газы, как показывает опыт, при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении можно считать идеальными.

В модели газа, используемой в теории, молекулы представляют собой твёрдыми шариками, движущимися хаотически и испытывающими упругие соударения друг с другом и со стенками сосуда. В силу их малости, большую часть времени они движутся свободно. Поэтому внутренняя энергия газа равна сумме кинетических энергий его

молекул, зависящих только от температуры. Внутреннюю энергию называют ещё *тепловой*.

Температурой газа θ (энергетической температурой) принято считать $\frac{2}{3}$ средней кинетической энергии поступательного движения его молекул:

$$\theta = \frac{2}{3} \cdot \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{2}{3} \bar{K}, \quad (2.3)$$

где m_0 — масса молекулы, $\overline{v^2}$ — среднее значение квадрата скорости.

Такое определение температуры основано на расчётах и опыте. Если смешать два разных газа, средние значения энергии их молекул сравниваются: $\bar{K}_1 = \bar{K}_2$. Молекулы газа, имеющие меньшую массу, будут двигаться с большей скоростью и наоборот. Кинетические же энергии молекул будут одинаковыми. Таким же свойством обладает и температура — опыт показывает, что тела, приведённые в контакт друг с другом, приобретают одинаковую температуру.

Температура, определённая равенством (2.3), измеряется в *джоулях*. Однако в физике её измеряют в *градусах*. По шкале Цельсия за нуль 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 соответствующими отметками на шкале термометра.



рис. 2.4

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 нуль градусов (рис. 2.4). «Размер» градуса остался прежним и в системе СИ получил название *кельвин* (K). Связь температур даётся уравнением (2.2).

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

Температуру T можно найти, вводя в уравнении (2.3) обозначение

$$\theta = kT.$$

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

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

Внутренняя энергия газа из N одноатомных молекул выражается формулой (2.1).

Повышение температуры газа означает увеличение средней скорости хаотического движения его молекул. Аналогично с повышением температуры возрастает скорость перемещения молекул жидкости и возрастает амплитуда колебаний атомов твёрдых тел. При достижении *температуры плавления* амплитуда возрастает настолько, что атомы уже не могут удерживаться в узлах кристаллической решётки и твёрдое тело превращается в жидкость. Эта температура зависит от природы тела.

При *температуре кипения* молекулы жидкости приобретают такую скорость, что покидают жидкость, преодолевая силы межмолекулярного притяжения и становясь молекулами пара. Каждой жидкости присуща своя температура кипения, однако она существенно зависит от давления окружающего воздуха. Так, в горах на высоте несколько километров, где его давление гораздо ниже, вода начинает кипеть при $70\text{--}80^\circ\text{C}$, что не позволяет альпинистам приготовить полноценный обед. Для этих целей они используют герметически закрывающуюся посуду, в которой создаётся давление, превышающее атмосферное на этой высоте.

Примеры решения задач



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

- Решение. Температура газа T пропорциональна среднему значению кинетической энергии его молекул. Согласно (2.3),

$$kT = \frac{2}{3} \cdot \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}, \quad (1)$$

где m_0 — масса молекулы газа, $\overline{v^2}$ — среднее значение квадрата её скорости.

Запишем уравнение (1) при двух значениях температуры и возьмём их отношение. Тогда, учитывая, что $\overline{v^2} \approx \bar{v}^2$, получим

$$\frac{\bar{v}_2}{\bar{v}_1} = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}.$$

► Ответ. $\bar{v}_2 = \sqrt{2} \cdot \bar{v}_1$.

2.1.3. Уравнение состояния идеального газа

определения и основные формулы

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

► **Давление газа** — сила, действующая на единичную площадку со стороны хаотически движущихся молекул газа.

► **Уравнение состояния** идеального газа:

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

где N — число молекул газа,

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

► **Молярная масса вещества M** — масса 1 моля этого вещества в граммах.

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

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

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

$$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}. \quad (2.5)$$

► **Уравнение Клапейрона — Менделеева** — другая форма записи уравнения (2.4):

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad (2.6)$$

где m — масса газа,

$R = 8,31$ Дж/(моль · К) — универсальная газовая постоянная.

► **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 ($i = 1, 2, \dots$).

Единицы измерения

- Давление измеряется в **паскалях**:

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

- Объём измеряется в **кубических метрах**:

$$[V] = \text{м}^3.$$

- Молярная масса в системе СИ выражается в **килограммах на моль**:

$$[M] = \text{кг}/\text{моль}.$$

Подробное объяснение

Параметры, характеризующие состояние данной массы газа — давление p , объём V и температура T , — как показывает опыт, не могут изменяться независимо друг от друга. Они связаны уравнением (2.4), называемым *уравнением состояния идеального газа*.

Из этого уравнения, в частности, следует, что повышение температуры при неизменном объёме приводит к увеличению давления. Если температура постоянна, давление можно повысить путём сжатия газа, уменьшив его объём.

Давление газа на стенку сосуда производится за счёт теплового — хаотического — движения его молекул. Сталкиваясь со стенкой, молекулы передают ей некоторый импульс, изменение же импульса тела (за единицу времени) определяет действующую на него силу.

Уравнению (2.4) можно придать вид, более удобный для практического применения. Выразим число молекул N через массу газа m и его молярную массу M .

В таблице Менделеева указаны относительные атомные массы элементов, показывающие, во сколько раз масса атома данного элемента больше $1/12$ массы m_C изотопа углерода ^{12}C . Складывая их в соответствии с химической формулой молекулы вещества, получают его молярную массу M . Например, для воды (H_2O) $M = 1 \cdot 2 + 16 = 18$ г/моль; для железа (Fe) $M = 56$ г/моль, а для кислорода (O_2) $M = 2 \cdot 16 = 32$ г/моль.

Масса одной молекулы $m_0 = \frac{M}{N_A}$, а масса газа, содержащего

N молекул, $m = Nm_0$. Тогда $N = \frac{m}{m_0} = \frac{m}{M} N_A$ и уравнение (2.4) мож-

но записать в виде

$$pV = \frac{m}{M} N_A kT.$$

Произведение N_A на k обозначается буквой R и называется *универсальной газовой постоянной*:

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

Уравнение состояния идеального газа приобретает вид (2.6).

Используется ещё одна форма записи этого уравнения. Разделив обе части (2.4) на V и обозначив число молекул в единице объёма, т. е. их *концентрацию*, через $n = \frac{N}{V}$, получим

$$p = nkT. \quad (2.8)$$

Если сосуд объёмом V заполнен смесью газов, каждый из них оказывает на его стенки такое давление p_i , как будто он находится в сосуде один. Давление смеси равно их сумме и выражается формулой (2.7).

Измерение температуры производится с помощью термометров. Наиболее совершенным из них является *газовый термометр*. Принцип его работы основан на уравнении (2.6). Если некоторое количество газа заключить в объём V , то температура газа, согласно этому уравнению, будет пропорциональна давлению газа p при условии постоянства объёма ($V = \text{const}$):

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

Зная массу газа m , молярную массу M и объём V , можно найти температуру T , измеряя с помощью манометра давление газа p . Так работает *газовый термометр с постоянным объёмом*.

Газовые термометры являются *первичными*, поскольку измеряют температуру непосредственно по температурной шкале. Они неудобны для практического применения, однако служат для градуировки *вторичных* термометров, использующих в качестве рабочих агентов жидкости (ртуть, спирт) или твёрдые тела (термометр с металлической спиралью, расширяющейся при нагревании; термометр сопротивления, в котором используется зависимость электрического сопротивления полупроводника или металла от температуры).

Примеры решения задач



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

► Решение. Уравнение (2.4) запишем для двух состояний газа:

$$pV = NkT, \quad (1)$$

$$p_0 V_0 = NkT_0. \quad (2)$$

Разделив (1) на (2) почленно, получим

$$\frac{pV}{p_0 V_0} = \frac{T}{T_0},$$

откуда

$$V = V_0 \frac{p_0 \cdot (t + 273)}{p \cdot (t_0 + 273)}.$$

► Ответ. $V = 2,3$ л.

ОГЭ

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

► Решение. Первоначальное состояние газа описывается уравнением (2.4):

$$p_1 V_1 = NkT. \quad (1)$$

После расширения газа во второй сосуд оно приобретает вид

$$p_2 (V_1 + V_2) = NkT. \quad (2)$$

Приравнивая левые части (1) и (2), найдём

$$p_2 = p_1 \frac{V_1}{V_1 + V_2}.$$

► Ответ. $p_2 = 3,2 \cdot 10^5$ Па.

ЕГЭ

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

► Решение. Запишем уравнение (2.4) для двух состояний газа в баллоне:

$$p_1 V = NkT_1, \quad (1)$$

$$p_2 V = NkT_2. \quad (2)$$

Вычтем почленно из (2) уравнение (1):

$$(p_2 - p_1)V = Nk(T_2 - T_1).$$

Отсюда найдём

$$V = \frac{Nk(T_2 - T_1)}{p_2 - p_1}. \quad (3)$$

Подставив (3) в уравнение (1) и учитывая, что $T = t + 273$, получим

$$p_1 = \Delta p \frac{T_1}{T_2 - T_1}.$$

► Ответ. $p_1 = 40$ атм.

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

определения и основные формулы

- **Термодинамическая система** — совокупность большого числа атомов или молекул, образующих твёрдое, жидкое или газообразное тело.
- **Состояние термодинамического равновесия** — давление и температура тела во всём его объёме имеют постоянные значения.
- **Связь параметров**, характеризующих состояние данной массы газа, — давления p , объёма V , температуры T (**уравнение Клапейрона — Менделеева**):

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad (2.9)$$

где m — масса газа,

M — его молярная масса,

$R = 8,31$ Дж / (моль · К) — универсальная газовая постоянная.

- **Диаграмма состояния** — график зависимости одного из параметров от другого при фиксированном значении третьего.

► Виды процессов в газах:

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

$$pV = \text{const}. \quad (2.10)$$

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

$$V = \left(\frac{mR}{Mp} \right) T. \quad (2.11)$$

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

$$p = \left(\frac{mR}{MV} \right) T. \quad (2.12)$$

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

Единицы измерения

► Давление измеряется в **паскалях**:

$$[p] = \text{Па}.$$

► Объем измеряется в **кубических метрах**:

$$[V] = \text{м}^3.$$

► Единица массы — **килограмм**:

$$[m] = \text{кг}.$$

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

$$[M] = \text{кг/кмоль}.$$

Подробное объяснение

В термодинамике безразлично, какое вещество рассматривается — твердое, жидкое или газообразное. Однако в дальнейшем, как и в предыдущем разделе, мы ограничимся рассмотрением идеальных газов.

Процессы, протекающие в газе, изображаются графически *диаграммами состояния*.

Уравнение *изотермического процесса* (2.10) получается из (2.9), если там принять $T = \text{const}$. На pV -диаграмме он изображается *гиперболой* (рис. 2.5):

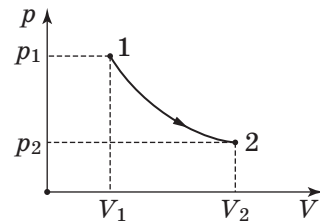


рис. 2.5

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

Исходное состояние газа характеризуется давлением p_1 и объёмом V_1 (точка 1), конечное — давлением p_2 и объёмом V_2 (точка 2). Все промежуточные состояния изображаются точками гиперболы, которая в этом случае называется *изотермой*.

Изобарный процесс ($p = \text{const}$), уравнение которого имеет вид (2.11), на VT -диаграмме изображается прямой линией, называемой *изобарой* (рис. 2.6). Эта прямая должна идти через начало координат, но она обрывается на пути к нему, поскольку с понижением температуры газ превращается в жидкость, к которой уравнение (2.9) неприменимо.

Для *изохорного* процесса ($V = \text{const}$) из (2.9) получается уравнение (2.12). На pT -диаграмме это тоже прямая линия, называемая *изохорой* (рис. 2.7). По указанной выше причине она не может пройти через начало координат.

Ещё один вид тепловых процессов — это *циклические процессы* или *циклы*. На pT -диаграмме циклический процесс изображается замкнутой кривой (рис. 2.8).

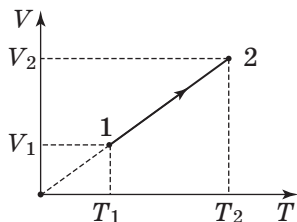


рис. 2.6

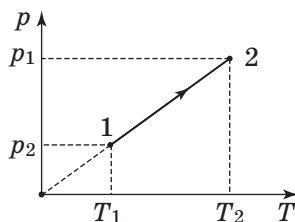


рис. 2.7

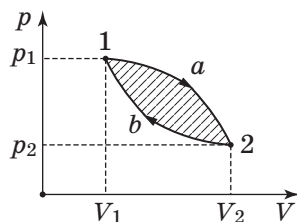


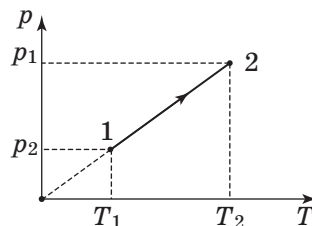
рис. 2.8

Приведённые диаграммы позволяют наглядно представить характер изменений, происходящих в газе.

Примеры решения задач



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



► Решение.

График изохорного процесса представлен на рисунке.

Запишем уравнение (2.4) для состояний газа 1 и 2:

$$p_1 V = NkT_1, \quad (1)$$

$$p_2 V = NkT_2. \quad (2)$$

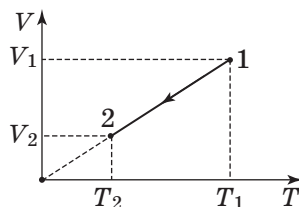
Разделив (2) на (1) почленно, найдём

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = p_1 \frac{t_2 + 273}{t_1 + 273}.$$

► Ответ. $p_2 = 1,54 \cdot 10^5$ Па.

ОГЭ

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



► Решение.

График изобарного процесса представлен на рисунке.

Запишем уравнение (2.4) для первого и второго состояний газа:

$$pV_1 = NkT_1, \quad (1)$$

$$pV_2 = NkT_2. \quad (2)$$

Вычитая (1) из (2), получим

$$p(V_2 - V_1) = Nk(T_2 - T_1). \quad (3)$$

Температуру T_1 найдём из уравнения (1), подставляя в него p , найденное из (3):

$$T_1 = \Delta T \frac{V_1}{V_2 - V_1}, \quad (\Delta T = \Delta t).$$

► Ответ. $T_1 = 308$ К, $t_1 = 35$ °С.

ЕГЭ

До какой температуры нужно нагреть открытую колбу, содержащую воздух при температуре $t_1 = 20$ °С, чтобы его плотность уменьшилась в 1,5 раза?

► Решение. Плотность газа, находящегося в колбе:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (1)$$

При нагревании при постоянном давлении объём увеличивается, поэтому в колбе останется лишь часть молекул, ранее в ней находившихся, т. е. масса газа в ней изменится.

Исходя из (2.9), учитывая (1) и сократив постоянные величины, получим уравнение

$$\rho_1 T_1 = \rho_2 T_2.$$

Поскольку по условию задачи $\rho_2 = \frac{2}{3} \rho_1$, найдём

$$T_2 = 1,5 T_1.$$

► Ответ. $t_2 = 166^\circ \text{C}$.

2.2.2. Количество теплоты. Удельная теплоёмкость тел

определения и основные формулы

- **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.
- **Удельная теплоёмкость c** — количество теплоты ΔQ , необходимое для нагревания единицы массы вещества на один градус:

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

где m — масса тела.

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

$$Q = cm(t_2 - t_1), \quad (2.14)$$

где t_1 и t_2 — начальная и конечная температуры по шкале Цельсия.

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

$$q = \frac{Q}{m}. \quad (2.15)$$

- **Уравнение теплового баланса:**

$$Q_1 = Q_2, \quad (2.16)$$

где Q_1 — количество теплоты, полученное холодным телом, Q_2 — количество теплоты, отданное ему горячим.

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**:

$$[q] = \text{Дж}/\text{кг}.$$

Подробное объяснение

Как показывает опыт, изменить температуру, а следовательно, и внутреннюю энергию тела, можно двумя способами — 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*.

При нагревании, согласно (2.14), поскольку $T_2 > T_1$, количество теплоты Q , полученное телом, — величина *положительная*. При охлаждении ($T_2 < T_1$) тело отдаёт тепло окружающим его телам, и Q становится величиной *отрицательной*.

Передать телу тепло можно разными способами. Можно привести его в контакт с более горячим телом. Благодаря теплопроводности горячее тело «остынет», а холодное — «нагреется» и оба они будут иметь одинаковую температуру, находясь в тепловом равновесии друг с другом.

Теплопроводность — способность тел проводить тепло. Наилучшую теплопроводность имеют металлы (серебро, медь, алюминий), а теплопроводность газов самая низкая.

Переход в состояние теплового равновесия в газах и жидкостях значительно ускоряется за счёт *конвекции* — перемешивания, которое происходит благодаря изменению их плотности с изменением температуры.

Мысленно выделим в жидкости некоторый объём, содержащий единицу её массы, например один грамм. При нагревании этот объём увеличивается — жидкость расширяется, а её плотность уменьшается. По закону Архимеда, на тело меньшей плотности действует выталкивающая сила, направленная вверх. В результате этого возникает движение нагретых слоёв жидкости в том же направлении — когда чайник с водой стоит на плите, нагревание её во всём объёме происходит благодаря конвекции. Подобным образом ведут себя и газы.

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.

Пример нагревания тел с помощью излучения — поглощение солнечных лучей, которые приходят на Землю, преодолев десятки миллионов километров в пустом пространстве, лишённом вещества — вакууме.

Чтобы найти температуру двух тел после достижения ими теплового равновесия, нужно записать для них *уравнение теплового баланса* (2.16). Величины Q_1 и Q_2 должны быть при этом обе положительными. 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, выделяемой при сжигании, зависит от его массы m и удельной теплоты сгорания q :

$$Q = mq. \quad (2.17)$$

Если температура тела T в результате нагрева не превышает его температуру плавления (для твёрдого тела) или температуру его кипения (для жидкости), уравнение теплового баланса (2.16), согласно (2.17) и (2.14), принимает вид

$$mq = c m_1 (T - T_1),$$

где m_1 — масса нагреваемого тела, T_1 — его начальная температура.

Примеры решения задач

ОГЭ

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 $\theta = 27$ °С. Найти удельную теплоёмкость металла, из которого изготовлен цилиндр. Удельная теплоёмкость воды $c_{\text{в}} = 4200$ Дж/(кг·К).

- Решение. Воспользуемся формулой (2.13), которая приобретает вид

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{Q}{t - \theta}, \quad (1)$$

где Q — количество теплоты, отданное цилиндром воде. Согласно (2.14),

$$Q = c_{\text{в}} m_{\text{в}} (\theta - t_{\text{в}}). \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), получим

$$c = \frac{m_{\text{в}} (\theta - t_{\text{в}})}{m (t - \theta)} c_{\text{в}}.$$

- Ответ. $c = 863 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$

ЕГЭ

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

- Решение. КПД установки равен отношению количества теплоты, необходимого для нагревания воды, к количеству теплоты, выделенному при сжигании спирта:

$$\eta = \frac{Q_{\text{в}}}{Q_{\text{с}}} \cdot 100 \, \%.$$

Подставив сюда соответствующие величины из (2.14) и (2.17), получим

$$\eta = \frac{cm(t_2 - t_1)}{q \cdot m_{\text{с}}} \cdot 100 \, \%.$$

- Ответ. $\eta = 34,2 \, \%.$

2.2.3. Первое начало термодинамики. Закон сохранения энергии в тепловых процессах

определения и основные формулы

- **Первое начало термодинамики.** Количество теплоты ΔQ , сообщённое телу путём теплообмена, идёт на увеличение его внутренней энергии ΔU и на совершение этим телом работы ΔA против внешних сил:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A. \quad (2.18)$$

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

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

где V_1 и V_2 — объём газа в начале и конце процесса.

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

- **Первое начало термодинамики для адиабатного процесса:**

$$\Delta A = -\Delta U. \quad (2.20)$$

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

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

Подробное объяснение

Первое начало термодинамики выражает закон сохранения энергии в тепловых процессах.

Внутренняя энергия идеального газа

$$U = \frac{3}{2} NkT$$

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*.

Рассмотрим газ, заключённый в цилиндре с подвижным поршнем (рис. 2.9). Пусть давление газа p , объём V , площадь поршня S .

Тогда действующая на поршень со стороны газа сила $F = pS$, а совершаемая им работа при перемещении поршня на расстояние Δx

$$\Delta A = F\Delta x = pS \cdot \Delta x = p\Delta V. \quad (2.21)$$

При расширении газа от объёма V_1 до объёма V_2 при *постоянном давлении* ($p = \text{const}$) работа численно равна площади прямоугольника V_112V_2 на рис. 2.10:

$$A = p(V_2 - V_1).$$

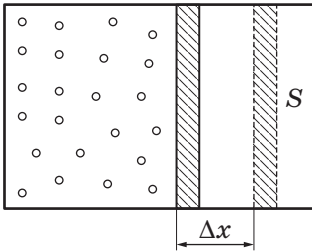


рис. 2.9

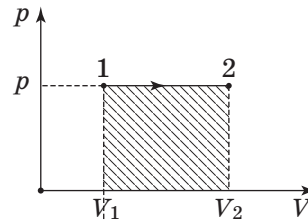


рис. 2.10

При *изотермическом расширении* работа имеет другое численное значение, определяемое площадью криволинейной трапеции V_112V_2 , заключённой между кривой, изображающей процесс, и осью абсцисс на графике (см. рис. 2.5).

Если газ участвует в циклическом процессе, кривая которого представлена на рис. 2.8, работа, совершаемая при переходе его из состояния 1 в состояние 2 по «верхнему» пути, положительна и численно равна площади фигуры $1a2V_2V_1$. Работа, совершаемая при обратном переходе — из состояния 2 в состояние 1 по «нижнему» пути, численно равная площади фигуры $2b1V_1V_2$, — отрицательна. Совершённая за один цикл работа численно равна площади фигуры $1a2b$, изображающей цикл.

С учетом (2.21), уравнение (2.18), выражающее первое начало термодинамики, можно записать в виде

$$\Delta Q = \Delta U + p\Delta V. \quad (2.22)$$

Если цилиндр, в котором находится газ, поместить в оболочку, не проводящую тепло, расширение или сжатие газа будет происходить без теплообмена с окружающей средой. Такой процесс называется *адиабатным*. В уравнении (2.18) следует при этом принять $\Delta Q = 0$. Тогда

$$\Delta A = -\Delta U.$$

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 ($\Delta U > 0$).

Адиабатный процесс можно осуществить и при отсутствии теплоизоляции. Нагревание газа мы наблюдаем, когда с помощью насоса накачиваем, например, камеру автомобильного колеса или велосипеда — от воздуха постепенно нагревается и насос. Теплопроводность — медленный процесс, поэтому при быстром сжатии воздуха в камере теплообмен с окружающей средой не успевает произойти. Процесс его сжатия в этом случае — адиабатный.

Процессы, связанные с изменением внутренней энергии тел, называются *тепловыми*. Это нагревание и охлаждение тел, плавление и отвердевание, испарение и конденсация, выделение тепла при трении тел друг о друга. Указанные процессы наблюдаются в природе и протекают естественным путём. Характерной их чертой является превращение механической энергии в тепловую и переход в состояние теплового равновесия.

Человек поставил перед собой задачу создать устройства, позволяющие облегчить его физический труд. Они должны были производить механическую работу, затрачивая на это тепловую энергию, выделяющуюся при сжигании органического топлива — угля, древесины, продуктов перегонки нефти. В своё время — примерно двести лет назад — исследования на эту тему позволили понять, при каких условиях можно решить эту задачу.

Опытным путём было установлено, что в основе всех природных процессов лежит *закон сохранения энергии*.

К кинетической и потенциальной энергиям тел следует добавить внутреннюю энергию, энергию химических и ядерных реакций, энергию излучения и другие известные науке её виды. Простейший пример взаимопревращения видов энергии — падение 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. Часть её может пойти на работу по разделению тела на отдельные осколки, если падение с высоты сопровождается его разрушением.

При бомбардировке флуоресцирующего экрана электронами возникает световое излучение, энергия которого берется из запаса

кинетической энергии электронов. Сжигание топлива порождает свет и тепло, черпающие свою энергию в химических превращениях молекул.

Превращение внутренней энергии тела в механическую работу — это один из возможных путей осуществления таких превращений. Этот путь, однако, требует создания соответствующих условий, которых нет в природе. Человек сумел создать их и получил в свои руки *тепловые машины*, заменившие его физический труд.

Примеры решения задач



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?

► Решение.

На рисунке изображена диаграмма состояния газа. Участок 1–2 — изохора, 2–3 — изобара. Пунктиром обозначена изотерма ($T = \text{const}$).

Работа, совершаемая газом на участке 1–2,

$$A_{12} = 0, \quad (1)$$

а на участке 2–3, с учётом (2.19),

$$A_{23} = p_2(V_3 - V_1). \quad (2)$$

Согласно (2.9),

$$p_1 V_1 = \frac{m}{M} RT, \quad (3)$$

$$p_2 V_3 = \frac{m}{M} RT. \quad (4)$$

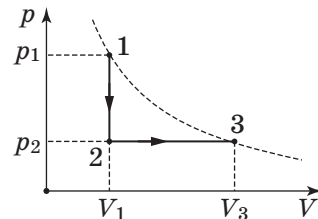
Подставляя (3) и (4) в (2) и учитывая, что по условию задачи

$$p_2 = \frac{1}{n} p_1, \text{ найдём}$$

$$A = A_{12} + A_{23} = \frac{m}{M} RT \left(1 - \frac{1}{n} \right).$$

В состояниях 1 и 3 температура газа одинакова, поэтому его внутренняя энергия, согласно (2.1), не изменилась.

► Ответ. $A = 166$ кДж, $\Delta U = 0$.



ЕГЭ

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?

► Решение.

Запишем уравнение (2.4) для состояний 1 и 3:

$$p_1 V_1 = NkT_1, \quad (1)$$

$$p_1 V_2 = NkT_2. \quad (2)$$

Возьмём их разность и учтём (2.19).

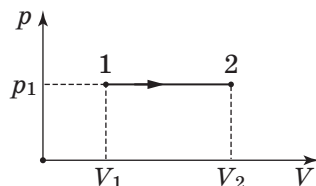
Тогда

$$T_2 - T_1 = \frac{p_1(V_2 - V_1)}{Nk} = \frac{A}{Nk}. \quad (3)$$

Умножим числитель и знаменатель дроби (3) на T_1 и подставим туда (1). Получим

$$\Delta T = \frac{A}{p_1 V_1} \cdot T_1.$$

► Ответ. $\Delta T = 58$ К.



2.2.4. Принцип работы тепловой машины. Второе начало термодинамики

определения и основные формулы

- **Тепловая машина** — устройство, преобразующее теплоту в механическую работу.
- **Коэффициент полезного действия** тепловой машины периодического действия — отношение работы A , совершаемой ею за один цикл, к количеству теплоты Q_1 , получаемой рабочим телом за один цикл от нагревателя:

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

где Q_2 — количество теплоты, отдаваемое за цикл охладителю.

- **Идеальная тепловая машина** — тепловая машина, в которой 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.

- **Второе начало термодинамики.** Никакая тепловая машина периодического действия не может иметь коэффициент полезного действия выше, чем $\eta_{\text{ид}}$:

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

Подробное объяснение

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.

Выясним теперь условия, при которых возможно *преобразование в работу теплоты*. В системе тел, находящихся в тепловом равновесии, без внешнего вмешательства никаких процессов происходить не может. Нельзя выполнить и работу, поскольку она связана с направленным движением макроскопических тел, а тепловое движение молекул хаотично и не имеет никакого преимущественного направления. Для получения механической работы, очевидно, надо иметь два тела с разными температурами и прибегнуть к помощи третьего тела, которое и будет эту работу совершать. Например, можно взять газ, заключённый в цилиндре с подвижным поршнем, стенки которого обладают хорошей теплопроводностью (рис. 2.9).

Пусть первоначально газ в цилиндре имеет температуру окружающего воздуха, а давление газа равно атмосферному. Если цилиндр привести в контакт с телом, нагретым до более высокой температуры, газ внутри цилиндра расширится, поглотив у этого тела некоторое количество теплоты и совершив работу. Чтобы вернуть поршень в исходное положение и подготовить систему к повторному выполнению работы, нужно охладить газ, приведя цилиндр в контакт с более холодным телом, например с тем же окружающим воздухом. При обратном ходе поршня, сопровождающем охлаждение газа,

совершается работа обратного знака. Поскольку работа расширения превосходит работу сжатия, т. к. температура нагретого тела выше температуры холодного, такое устройство позволяет часть теплоты, полученной при сжигании топлива, преобразовать в механическую работу.

Из сказанного следует, что тепловая машина должна иметь три составные части (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.

Это машина периодического действия. За один период (цикл) газ в цилиндре сначала расширяется, совершая работу A и получая при этом от нагревателя количество теплоты Q_1 , затем вновь сжимается, отдавая часть тепла Q_2 охладителю. Если обе величины Q_1 и Q_2 считать положительными, то по закону сохранения энергии

$$A = Q_1 - Q_2.$$

Коэффициент полезного действия (КПД) тепловой машины определяется уравнением (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, в которой использовал циклический процесс, происходящий с рабочим телом, состоящий из двух изотерм и двух адиабат (*цикл Карно*). Он по-

казал, что существует верхний предел значения этой величины, который может быть достигнут лишь *идеальной тепловой машиной*. У такой машины отсутствуют указанные трение и тепловые потери, а её КПД выражается формулой (2.24).

Из неё 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 — часть тепла должна быть отдана охладителю.

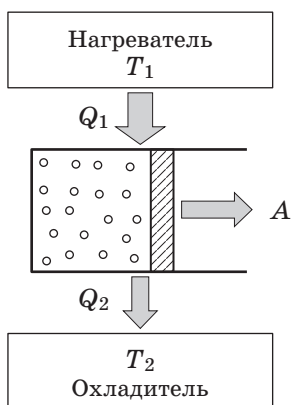


рис. 2.11

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 .

Формула (2.24), полученная Карно, показывает, что для увеличения КПД тепловой машины нужно понижать температуру охладителя и повышать температуру нагревателя. Поскольку охладителем в реальных условиях обычно является окружающий воздух, первый путь невозможен. Второй путь связан с получением термостойких сплавов для изготовления тех частей двигателей, которые работают при высоких температурах. Создание более экономичных турбореактивных двигателей в авиации обусловлено, наряду с совершенствованием их конструкций, успехами именно в этой области.

К тепловым относятся двигатели внутреннего сгорания, используемые на автотранспорте, тепловозах, дизель-электроходах (кораблях), реактивные и турбовинтовые авиационные двигатели, а также реактивные двигатели космических аппаратов, с помощью которых осуществляется их запуск.

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.

Одна из формулировок второго начала термодинамики гласит:

Невозможно создать вечный двигатель второго рода.

Количественным её выражением служит неравенство (2.25).

Примеры решения задач



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 η и работу A , совершаемую за один цикл.

► Решение. КПД тепловой машины, согласно (2.23),

$$\eta = \frac{A}{Q_1} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где

$$A = Q_1 - Q_2 \quad (2)$$

— работа, совершаемая за один цикл.

По условию задачи, $Q_2 = 0,8Q_1$. Подставив в (1) и (2), получим

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100 \%, \quad A = 0,2Q_1.$$

► Ответ. $\eta = 20 \%$, $A = 1,26$ Дж.

ЕГЭ

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 η .

► Решение. Согласно (2.23),

$$\eta = \frac{A}{Q_1} \cdot 100 \%,$$

где $Q_1 = Q_2 + A$. Тогда

$$\eta = \frac{A}{Q_2 + A} \cdot 100 \%.$$

► Ответ. $\eta = 18 \%$.

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 его 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. Кипение жидкости

Определения и основные формулы

- ▶ **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.
- ▶ **Количество теплоты**, необходимое для испарения жидкости массой m :

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

где r — удельная теплота парообразования.

Единицы измерения

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

$$[r] = \text{Дж/кг}.$$

Подробное объяснение

Любая жидкость, налитая в сосуд с открытой поверхностью, *испаряется*. Процесс испарения связан с переходом её молекул из жидкой среды в газообразную. Окружающий воздух уносит их вдаль, и процесс испарения продолжается, пока вся жидкость не испарится. Если этот процесс ускорить, создав поток воздуха у поверхности жидкости, то её температура начнет падать. Легколетучую жидкость (например, эфир) можно таким способом даже заморозить — перевести в твёрдое состояние. Это говорит о том, что с поверхности жидкости уходят самые быстрые молекулы. Следовательно, чтобы ускорить испарение, нужно жидкость нагреть и подводить к ней тепло по мере её испарения.

С ростом температуры наступает момент, когда жидкость начинает кипеть (при температуре кипения, характерной для каждой жидкости и зависящей от давления окружающего воздуха). При

кипении наблюдается образование во всём объёме жидкости пузырьков газа, которые по мере всплытия увеличиваются в размерах и создают бурное её перемешивание. Испарение жидкости при кипении происходит внутрь этих пузырьков, поэтому с повышением атмосферного давления температура кипения возрастает. Процесс кипения ускоряется по мере увеличения мощности источника тепла, подводимого к сосуду с жидкостью.

Простой опыт позволяет установить, что для перевода жидкости в пар требуется затратить определённую энергию, называемую *теплотой парообразования*.

Поставим на газовую горелку колбу с водой и будем измерять её температуру через определённые промежутки времени. График зависимости температуры от времени, полученный в этом опыте, изображён на рис. 2.12.

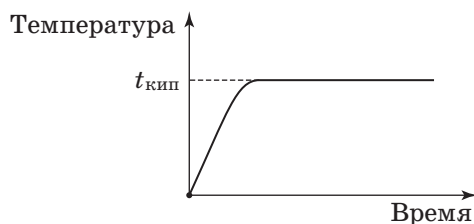


рис. 2.12

Из него видно, что по мере поглощения тепла 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. Количество необходимой для этого теплоты выражается формулой (2.26) — оно тем больше, чем больше масса жидкости m . Количество теплоты, необходимое для превращения в пар 1 кг жидкости при температуре кипения, называется её *удельной теплотой парообразования*:

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

У воды численное значение этой величины — $2,3 \cdot 10^6$ Дж/кг — самое большое среди жидкостей, существующих в природе (например, у спирта она равна $0,9 \cdot 10^6$ Дж/кг, эфира — $0,3 \cdot 10^6$ Дж/кг, ртути — $0,2 \cdot 10^6$ Дж/кг). Это обстоятельство существенно для

поддержания на Земле температуры в тех пределах, в которых могут существовать известные нам растения и животные.

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 препятствует росту её температуры. Выпадение росы, наоборот, сопровождается выделением тепла, при котором температура воздуха не может сильно понизиться. В пустынях, где нет влаги, колебания температуры между её дневным и ночным значениями очень велики и достигают десятков градусов.

Примеры решения задач



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.

- Решение. Количество теплоты, сообщённое воде, идёт на её нагревание до 100 °С и на испарение. Согласно (2.14) и (2.26),

$$Q = cm(100 - t) + rm_{\text{п}}, \quad (1)$$

где $m_{\text{п}}$ — масса образовавшегося пара.

Из уравнения (1) найдём

$$m_{\text{п}} = \frac{1}{r} [Q - cm(100 - t)].$$

- Ответ. $m_{\text{п}} = 0,07$ кг.

2.3.2. Влажность воздуха

определения и основные формулы

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

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

- **Относительная влажность воздуха** — отношение плотности водяного пара ρ , 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 содержащийся в воздухе водяной пар становится насыщенным.

Единицы измерения

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

$$[\rho] = \text{г/м}^3.$$

Подробное объяснение

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.

При любой температуре с открытой поверхности воды происходит её испарение, при котором самые быстрые молекулы покидают её и переходят в газовую среду. Если закрытый сосуд частично заполнить водой, можно заметить, что испарение воды вскоре прекратится, о чём будет свидетельствовать неизменность уровня воды, оставшейся в сосуде. Вода и её пар будут находиться в *состоянии динамического равновесия*, когда число молекул, переходящих из воды в воздух, в среднем равно числу молекул, которые переходят из воздуха в воду. Водяной пар в сосуде в этом случае становится *насыщенным*, имеющим при данной температуре максимальную плотность $\rho_{\text{нас}}$.

Давление в сосуде, по закону Дальтона (2.7), создаётся воздухом и водяным паром. Давление пара не зависит от объёма сосуда — уменьшение объёма приводит к увеличению давления воздуха, а насыщенный водяной пар частично конденсируется и его парциальное давление не изменяется.

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, выражаемой формулой (2.29).

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

В зимнее время года воздух в помещениях часто оказывается очень сухим и мы вынуждены его увлажнять, используя сосуды с открытой водной поверхностью. Пересушенность воздуха объясняется

тем, что в помещение попадает воздух «с улицы», относительная влажность которого бывает в пределах 70–80 % при температуре, характерной для зимнего периода, т. е. морозной. В помещении количество содержащейся в нём влаги составит при комнатной температуре гораздо более низкую относительную влажность, т. к. плотность насыщенного пара $\rho_{\text{нас}}$ при этой температуре в несколько раз выше (при повышении температуры воздуха от 0 °С до 20 °С она возрастает вчетверо, а при повышении её от 0 °С до 40 °С — в 12 раз).

Летом в утренние часы, когда земля и воздух успеют за ночь остыть до 12–14 °С, на траве выпадает роса. Конденсация влаги из воздуха происходит потому, что содержащийся в нём водяной пар при такой температуре становится насыщенным. Эта температура называется *точкой росы*.

Как уже было сказано, выпадение росы сопровождается выделением тепла, которое препятствует дальнейшему понижению температуры.

Примеры решения задач

ОГЭ

При температуре $t_1 = 10$ °С относительная влажность воздуха $D_1 = 80$ %. Найти относительную влажность воздуха при повышении температуры до $t_2 = 20$ °С. Плотность насыщенного пара при этих температурах: $\rho_{\text{н1}} = 9,4$ г/м³, $\rho_{\text{н2}} = 17,3$ г/м³.

► Решение. Согласно (2.29), относительная влажность воздуха

$$D = \frac{\rho}{\rho_{\text{н}}} \cdot 100 \% . \quad (1)$$

При повышении температуры фактическое содержание водяного пара в воздухе не изменяется, т. е. $\rho = \frac{m}{V} = \text{const}$.

Выражая ρ из (1), получим для двух состояний воздуха

$$D_1 \cdot \rho_{\text{н1}} = D_2 \cdot \rho_{\text{н2}},$$

откуда

$$D_2 = D_1 \frac{\rho_{\text{н1}}}{\rho_{\text{н2}}} .$$

► Ответ. $D_2 = 43$ %.

ЕГЭ

Температура воздуха в комнате объёмом $V = 150$ м³ равна $t_1 = 6$ °С, а его относительная влажность $D_1 = 80$ %. Сколько воды нужно испарить, чтобы при температуре $t_2 = 18$ °С относительная влажность воздуха стала равной $D_2 = 60$ %. Плотность

насыщенного пара при этих температурах: $\rho_{\text{н1}} = 7,3 \text{ г/м}^3$, $\rho_{\text{н2}} = 15,4 \text{ г/м}^3$.

- Решение. Плотность водяного пара $\rho = \frac{m}{V}$, где m — масса воды, испарившейся в объёме V . Тогда уравнение (2.29) можно представить в виде

$$D = \frac{m}{V\rho_{\text{н}}} \cdot 100 \%. \quad (1)$$

Отсюда найдём массу воды в воздухе комнаты в первом и втором состояниях:

$$m_1 = \frac{D_1 V \rho_{\text{н1}}}{100 \%}, \quad m_2 = \frac{D_2 V \rho_{\text{н2}}}{100 \%}. \quad (2)$$

Масса воды, которую нужно испарить,

$$m = m_2 - m_1. \quad (3)$$

Подставив (2) в (3), получим

$$m = \frac{V}{100 \%} (D_2 \rho_{\text{н2}} - D_1 \rho_{\text{н1}}).$$

- Ответ. $m = 510 \text{ г}$.

2.3.3. Плавление и кристаллизация

определения и основные формулы

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

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

где λ — удельная теплота плавления.

Единицы измерения

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

$$[\lambda] = \text{Дж/кг}.$$

Подробное объяснение

Плавление твёрдых тел и отвердевание жидкостей — один из видов фазовых переходов и, наряду с испарением и конденсацией, играет большую роль в природных явлениях. Таяние снега

и установление ледяного покрова на водоёмах — один из природных факторов, способствующих поддержанию жизни на Земле.

Вода замерзает, превращаясь в лёд при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Он образуется на поверхности озёр и рек под влиянием холодного атмосферного воздуха. Остывание воды в них происходит главным образом за счёт конвекции, но, в отличие от рассмотренного выше процесса прогрева воды, здесь происходит перемещение более тяжёлых холодных слоёв воды вниз. Результатом должно было стать замерзание воды в водоёме и гибель всего живого в нём. Однако природа позаботилась о живых обитателях водоёмов, обеспечив им надёжную защиту.

Вода — уникальная жидкость. Плотность воды увеличивается до тех пор, пока её температура не понизится до $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. При дальнейшем понижении температуры — до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ — плотность воды уменьшается и конвекция прекращается — вода в водоёме не замерзает, оставаясь при температуре $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Увеличение толщины слоя льда при сильных морозах происходит теперь лишь благодаря теплопроводности. Этот процесс медленный, достаточно глубокие водоёмы не успевают промёрзнуть до самого дна, и жизнь в них сохраняется.

Плавление и отвердевание — 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.

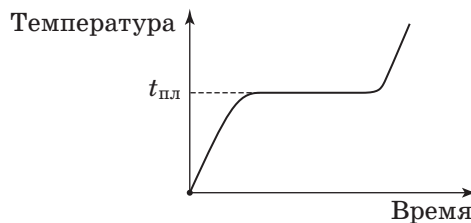


рис. 2.13

Количество теплоты, необходимое для превращения в жидкость 1 кг вещества при температуре плавления, называется его *удельной теплотой плавления*:

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

Чтобы расплавить тело массой m , требуется количество теплоты, выражаемое формулой (2.30).

При плавлении внутренняя энергия тела увеличивается — жидкость той же массы имеет бóльшую 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.

Примеры решения задач



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

► Решение. Запишем уравнение теплового баланса:

$$Q_{\text{пл}} + Q_{\text{в}} = \eta \cdot P \cdot \tau, \quad (1)$$

где, $Q_{\text{пл}}$ — теплота плавления льда,

$Q_{\text{в}}$ — количество теплоты, идущей на нагревание воды, имевшейся в сосуде, и той воды, которая образовалась при плавлении льда.

Правая часть уравнения (1) — тепловая энергия, которую электроплита передаёт сосуду с водой.

Согласно (2.30) и (2.14),

$$Q_{\text{пл}} = \lambda \cdot m_{\text{л}}, \quad (2)$$

$$Q_{\text{в}} = c(m_{\text{в}} + m_{\text{л}})(\theta - t). \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в (1), найдём

$$\tau = \frac{1}{\eta P} \cdot [\lambda \cdot m_{\text{л}} + c(m_{\text{л}} + m_{\text{в}}) \cdot (\theta - t)].$$

► Ответ. $\tau = 2,1 \cdot 10^3$ с = 35 мин.

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.*

Основные понятия

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

Заряд проявляет себя в том, что заряженные тела действуют друг на друга на расстоянии посредством **электрического поля**, которое они создают в окружающем пространстве.

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 началось 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

определения и основные формулы

- ▮ **Электрический заряд** — природное свойство электронов и протонов, входящих в состав атомов.
- ▮ **Заряд электрона или протона** — наименьшая неделимая порция заряда, существующая в природе:
$$q = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$
- ▮ **Заряженное тело** — тело, имеющее избыточное количество электронов или протонов.
- ▮ **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** — заряженное тело малых размеров.
- ▮ **Разноимённые заряды** притягиваются друг к другу, **одноимённые** — отталкиваются.

Единицы измерения

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

$$[q] = \text{Кл.}$$

Подробное объяснение

Любому телу можно сообщить электрический заряд, т. е. *наэлектризовать* его. Для этого его нужно привести в контакт с источником зарядов. С древних времён человеку было известно, что кусок янтаря (затвердевшей смолы хвойных деревьев), натёртый шерстью, притягивает к себе мелкие кусочки сухих листьев дерева, соринки. Позже было обнаружено, что аналогичной способностью обладает и стекло, натёртое кожей. Эти явления были названы *электрическими* (от латинского «электрон» — янтарь). Такие тела могут служить *источниками* зарядов.

В наше время, в век господства синтетических материалов, мы повседневно сталкиваемся с проявлением статического электричества — трение одежды из синтетики о кожу человека сопровождается треском искр, видимых в темноте.

Чтобы обнаружить заряд какого-либо тела, нужно воспользоваться *пробным зарядом* — другим заряженным телом малых размеров. На пробный заряд со стороны нашего тела будет действовать сила. Если источник пробного заряда и тела один и тот же — янтарь или стекло, — это будет отталкивающая сила, если же их источники разные — у одного янтарь, а у другого стекло, — пробный заряд будет притягиваться к нему.

Этот опыт указывает на существование в природе зарядов двух родов — *положительного* и *отрицательного*. Носителями положительного заряда являются *протоны*, входящие в состав ядер атомов (сам протон — это ядро простейшего из них — атома водорода). Отрицательный заряд имеют *электроны*, обращающиеся вокруг ядер атомов. Электроны могут переходить с одного тела на другое при трении их друг о друга, нарушая баланс зарядов, в результате чего одно из них приобретает отрицательный заряд, а другое — положительный. Так, янтарь при трении о шерсть забирает у неё часть электронов.

Единица заряда — *кулон* — производная от единицы силы тока — *ампера* (А): если в проводнике течёт ток силой в 1 А, то через поперечное сечение проводника за 1 секунду переносится заряд в 1 Кл.

Наличие зарядов у электрона и протона — присущее им природное свойство. Электрон — лёгкая 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.

Несмотря на малость численного значения заряда, сила электрического отталкивания двух протонов в 10^{34} раз превышает силу их гравитационного притяжения. 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.

Примеры решения задач

ЕГЭ

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?

► Решение. Число электронов, которые составляют заряд пылинки,

$$N = \frac{q}{e},$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона.

Масса этих электронов

$$m = Nm_e,$$

где $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг — масса электрона.

Доля, которую они составляют в общей массе пылинки,

$$\gamma = \frac{m}{M}.$$

► Ответ. $m = 5,7 \cdot 10^{-19}$ г, $\gamma = 5,7 \cdot 10^{-15}$.

3.1.2. Закон сохранения заряда

определения и основные формулы

► **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.

объяснение и примеры решения задач

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

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.

3.1.3. Закон кулона

определения и основные формулы

- **Точечный заряд** — заряженное тело, размеры которого малы по сравнению с расстоянием от него до других заряженных тел.
- **Закон Кулона.** Сила взаимодействия двух точечных зарядов пропорциональна величине каждого из зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними:

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

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

- **Электрическая постоянная** ϵ_0 — новая константа, вводимая вместо коэффициента k_0 , связанная с ним соотношением

$$k_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}. \quad (3.2)$$

Единицы измерения

- Сила измеряется в **ньютонах**:
 $[F_{\text{кул}}] = \text{Н}.$
- Электрическая постоянная измеряется в **фарадах на метр**:
 $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}.$

Подробное объяснение

Закон Кулона — основной закон электростатики. Коэффициент пропорциональности k_0 в формуле (3.1) зависит от выбора единиц измерения физических величин. Его численное значение в системе СИ, приведённое выше, установлено опытным путём. Этот коэффициент часто записывают в виде (3.2), где для удобства записи некоторых формул введена новая константа ϵ_0 , называемая *электрической постоянной*.

Точечный заряд как объект рассмотрения в механике называется *материальной точкой*.

Силу Кулона (3.1) можно представить в векторном виде. Направление силы зададим радиус-вектором $\vec{r}$, проведённым от первого заряда ко второму (рис. 3.1). Тогда сила, действующая на второй заряд со стороны первого,

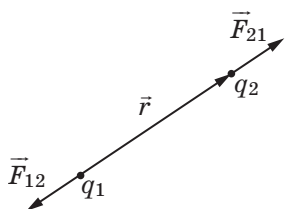


рис. 3.1

$$\vec{F}_{21} = k_0 \frac{q_1 q_2}{r^3} \vec{r}. \quad (3.3, а)$$

Сила, действующая на первый заряд со стороны второго, имеет противоположное направление:

$$\vec{F}_{12} = -k_0 \frac{q_1 q_2}{r^3} \vec{r}. \quad (3.3, б)$$

Если тела заряжены одноименно, они, согласно опыту, отталкиваются друг от друга, если разноименно — притягиваются.

Примеры решения задач

ОГЭ

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 .

► Решение. По закону Кулона (3.1), сила взаимодействия зарядов

$$F = k_0 \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (1)$$

Во втором положении, по условию задачи, $r' = r - \Delta r$, $F' = 2F$. Тогда

$$2F = k_0 \frac{q_1 q_2}{(r - \Delta r)^2}. \quad (2)$$

Разделив почленно (2) на (1), получим

$$\frac{r^2}{(r - \Delta r)^2} = 2,$$

откуда

$$r = \frac{\sqrt{2} \cdot \Delta r}{\sqrt{2} - 1}.$$

► Ответ. $r = 1,72$ м.

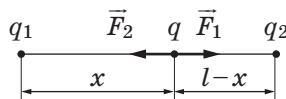
ЕГЭ

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?

► Решение.

Расположив положительный заряд q на линии, соединяющей заряды q_1 и q_2 , нужно найти точку, в которой силы отталкивания его от каждого из зарядов уравновесят друг друга (см. рисунок):



$$F_1 = F_2.$$

Подставляя сюда (3.1) и сокращая постоянные множители, получим уравнение

$$\frac{q_1}{x^2} = \frac{q_2}{(l-x)^2}$$

или

$$(q_1 - q_2)x^2 - 2q_1l \cdot x + q_1l^2 = 0.$$

Корни этого уравнения:

$$x_1 = 2l, \quad x_2 = \frac{2}{3}l.$$

Физический смысл имеет 2-й корень.

► Ответ. На расстоянии $x = 2$ см от большего заряда. Равновесие заряда q неустойчивое.

3.1.4. Напряжённость электрического поля. Графическое изображение полей

определения и основные формулы

- **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:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (3.4)$$

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

$$E = k_0 \frac{q}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}. \quad (3.5)$$

- ▮ **Принцип суперпозиции.** Напряжённость электрического поля, созданного в данной точке совокупностью N зарядов, равна сумме напряжённостей 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.
- ▮ **Электрический диполь** — совокупность двух близко расположенных друг к другу зарядов одинаковой величины, но противоположных по знаку.
- ▮ **Однородное электрическое поле** — поле, напряжённость которого всюду одинакова по величине, а линии напряжённости параллельны друг другу:

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

Единицы измерения

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

$$[E] = \text{В/м.}$$

- Расстояние измеряется в **метрах**:

$$[r] = \text{м.}$$

Подробное объяснение

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:

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

Поле можно обнаружить с помощью пробного заряда, который принято считать *положительным*.

Силовой характеристикой электрического поля служит *напряжённость поля*, определяемая равенством (3.4). Напряжённость поля составляет 1 В/м, если на заряд в 1 Кл действует сила в 1 Н.

Напряжённость электрического поля точечного заряда (3.5) убывает с расстоянием от него обратно пропорционально квадрату этого расстояния.

Электрическое поле изображают *линиями напряжённости* — *силовыми линиями*. Поскольку одноимённые заряды отталкиваются, разноимённые — притягиваются, а пробный заряд положительный, из определения напряжённости поля (3.4) следует, что силовые линии начинаются на положительных зарядах (рис. 3.2, а) и оканчиваются на отрицательных (рис. 3.2, б). Линии напряжённости электростатического поля *не замкнуты*.

Картину силовых линий поля можно построить, воспользовавшись *принципом суперпозиции*. На рис. 3.3 изображена такая картина, созданная *электрическим диполем*. Примером диполей, существующих в природе, служат молекулы *диэлектриков* — веществ, не проводящих электрический ток.

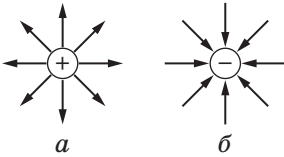


рис. 3.2

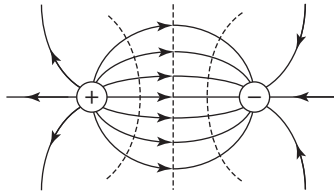


рис. 3.3

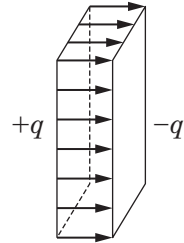


рис. 3.4

Однородное поле возникает между обкладками плоского конденсатора — двух параллельных пластин, несущих равные по модулю, но противоположные по знаку заряды. Расстояние между обкладками должно быть много меньше их линейных размеров (рис. 3.4).

Примеры решения задач

ОГЭ

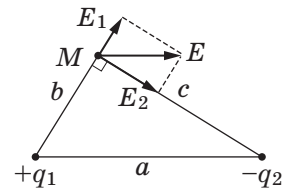
Два точечных заряда $q_1 = 6,7$ нКл и $q_2 = -13,2$ нКл находятся на расстоянии $a = 5$ см друг от друга. Найти напряжённость электрического поля E в точке, расположенной на расстоянии $b = 3$ см от положительного заряда и $c = 4$ см от отрицательного.

► Решение.

Вектор напряжённости электрического поля $\vec{E}$ в точке M (см. рисунок):

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2, \quad (1)$$

где $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ — векторы напряжённости полей, созданных каждым из зарядов.



Угол между ними прямой, поскольку в треугольнике, образованном отрезками a , b и c , выполняется теорема Пифагора:

$$a^2 = b^2 + c^2,$$

и смежный угол между сторонами b и c тоже прямой. В этом случае

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}, \quad (2)$$

где модули векторов $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ находятся по формуле (3.5). Подставляя их в (2), получим

$$E = k_0 \sqrt{\left(\frac{q_1}{b^2}\right)^2 + \left(\frac{q_2}{c^2}\right)^2}.$$

► Ответ. $E = 100 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$.

ЕГЭ

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?

► Решение. Поскольку заряд электрона e отрицательный, на него, согласно (3.4), действует тормозящая сила

$$F = eE.$$

Уравнение движения электрона (см. (1.24)):

$$m_e a = eE,$$

где m_e — масса электрона.

Отсюда найдём ускорение электрона:

$$a = \frac{eE}{m_e}.$$

Путь, пройденный им до остановки, найдём по формуле (1.8):

$$s = \frac{v_0^2}{2a}.$$

Время движения находим по формуле (1.6):

$$t = \frac{v_0}{a}.$$

► Ответ. $s = 2,35 \text{ см}$, $t = 47 \text{ нс}$.

3.1.5. Потенциал электрического поля

Определения и основные формулы

- **Кулоновская сила** — сила, действующая на заряд в электрическом поле.
- **Разность потенциалов** между двумя точками электрического поля — работа, совершаемая при перемещении единичного положительного заряда из первой точки во вторую:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q}. \quad (3.6)$$

- **Потенциал электрического поля** в данной точке — работа, совершаемая при перемещении единичного положительного заряда из данной точки «на бесконечность», где потенциал принимается за нуль:

$$\varphi = \frac{A}{q}. \quad (3.7)$$

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

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r}, \quad (r > R), \quad (3.8)$$

где q — заряд шара,
 R — его радиус.

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

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

- Эквипотенциальные поверхности **пересекаются** с линиями напряжённости **под прямым углом**.

Единицы измерения

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

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

Подробное объяснение

Кулоновская сила, действующая на заряд в электрическом поле, является *консервативной*, поскольку работа этой 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.

Пусть заряд q переносится в электрическом поле из точки 1 в точку 2 (рис. 3.5). Согласно (3.6), совершаемая при этом работа

$$A_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (3.9)$$



Удалим теперь точку 2 «на бесконечность», где заряды отсутствуют, приняв там потенциал равным нулю:

рис. 3.5

$$\varphi_2 = \varphi_\infty = 0.$$

Тогда можно ввести определение потенциала поля (3.7). Потенциал поля является функцией координат и определяется не однозначно — к нему можно добавить произвольную постоянную, зависящую от выбора точки отсчёта потенциала. За нуль потенциала обычно принимают потенциал Земли.

Разность потенциалов между двумя точками поля составляет 1 В, если при перемещении заряда в 1 Кл из первой точки во вторую совершается работа в 1 Дж.

Электрон, прошедший ускоряющую разность потенциалов в 1 В, приобретает энергию $W = e\Delta\varphi = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. Эта величина служит удобной единицей измерения энергии в физике микромира (см. разд. 5) и называется *электронвольт* (эВ):

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Энергия, свойственная многим процессам в микромире (энергия ионизации атомов, энергия химических реакций, работа выхода электрона из металла), составляет несколько электронвольт. В ядерной физике характерны значения энергии в миллион раз выше — энергия связи нуклонов в ядрах атомов, энергия, выделяющаяся при распаде и синтезе ядер. Поэтому в качестве такой единицы там используется *мегаэлектронвольт* (МэВ):

$$1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ.}$$

Точки, имеющие одинаковый потенциал — $\varphi(x, y, z) = \text{const}$, образуют поверхность, называемую *эквипотенциальной*. Графически эквипотенциальные поверхности обозначают пунктирными линиями, причем так, чтобы потенциалы двух соседних поверхностей отличались на 1 В.

Эквипотенциальные поверхности пересекаются с линиями напряжённости под прямым углом. Чтобы это показать, возьмём на поверхности равного потенциала $\varphi = \text{const}$ точки 1 и 2, столь близкие

друг к другу, что соединяющий их отрезок Δl можно считать прямолинейным (рис. 3.6). Работа, совершаемая при переносе заряда q из первой точки во вторую, с учетом (3.4) и (3.9),

$$A_{12} = qE \cdot \Delta l \cos \alpha = q(\varphi_1 - \varphi_2) = q(\varphi - \varphi) = 0.$$

Отсюда следует, что $\cos \alpha = 0$, а векторы $\Delta \vec{l}$ и $\vec{E}$ перпендикулярны друг другу.

Иллюстрацией сказанного служит рис. 3.7, где изображены силовые линии и эквипотенциальные поверхности поля заряженного шара. Потенциал созданного им поля выражается формулой (3.8).

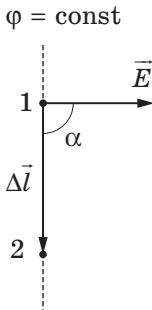


рис. 3.6

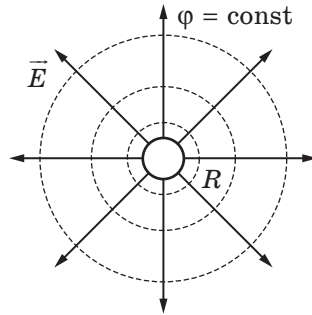


рис. 3.7

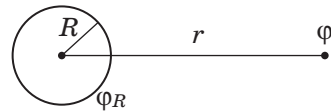
Примеры решения задач

ОГЭ

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

► Решение.

Воспользуемся формулой (3.8). На расстоянии $r + R$ от центра шара



$$\varphi = k_0 \frac{q}{r + R}. \quad (1)$$

Поверхность шара является эквипотенциальной, а её потенциал

$$\varphi_R = k_0 \frac{q}{R}. \quad (2)$$

Разделив (2) на (1), найдём

$$\varphi_R = \varphi \cdot \frac{r + R}{R}.$$

► Ответ. $\varphi_R = 2,02$ кВ.

ЕГЭ

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?

► Решение.

Поскольку оба заряда положительные, на заряд q действует тормозящая сила. Работа этой силы, согласно (3.7),

$$A = q \cdot \varphi, \quad (1)$$

где $\varphi = k_0 \frac{Q}{r_{\min}}$ — потенциал поля, созданного зарядом Q

в точке остановки заряда q .

Работа, согласно (1.38), равна кинетической энергии шарика:

$$A = \frac{mv_0^2}{2}. \quad (2)$$

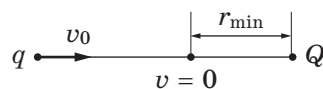
Приравнявая правые части (1) и (2), получим

$$\frac{mv_0^2}{2} = k_0 \frac{qQ}{r_{\min}},$$

откуда

$$r_{\min} = k_0 \frac{2qQ}{mv_0^2}.$$

► Ответ. $r_{\min} = 6$ см.



3.1.6. Проводники в электрическом поле

определения и основные формулы

- **Проводники** — вещества, в которых есть свободные заряды, способные перемещаться по всему объёму проводника.
- **Напряжённость электрического поля** внутри проводника:

$$E_{\text{внутр}} = 0.$$

- **Потенциал** в любой точке проводника имеет постоянное значение:

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

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

Подробное объяснение

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

Наличие в проводниках свободных зарядов можно продемонстрировать на следующем опыте. Соединим два электроскопа A и B металлическим проводником и приблизим к первому из них заряженное тело D (рис. 3.8, a). Стрелки электроскопов отклонятся, что свидетельствует о наличии на них зарядов. Если проводник, соединяющий электроскопы, убрать, то и после удаления тела D электроскопы остаются заряженными, причём заряд одного из них положительный, а другого — отрицательный (рис. 3.8, b). Это свидетельствует о перераспределении зарядов, имеющих в свободном состоянии в металлических частях электроскопов и в проводнике. Описанный процесс зарядки, когда мы приближаем к ним заряженное тело D , называется *электризацией через влияние* («по индукции»).

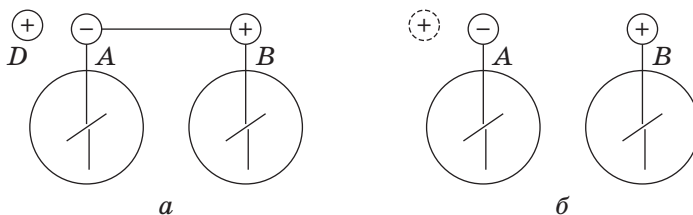


рис. 3.8

Свободные заряды в проводниках обуславливают характерные их свойства, которые мы рассмотрим.

1. Напряжённость поля внутри проводника равна нулю. В самом деле, при внесении проводника в электрическое поле свободные электроны, имеющие отрицательный заряд, смещаются в направлении, противоположном направлению внешнего поля. На другом конце проводника при этом образуется избыточный положительный заряд, обусловленный ионами кристаллической решётки (рис. 3.9). Эти заряды располагаются так, что созданное ими электрическое поле полностью компенсирует внешнее поле $\vec{E}$. В противном случае не скомпенсированное электрическое поле, действуя на свободные электроны, привело бы

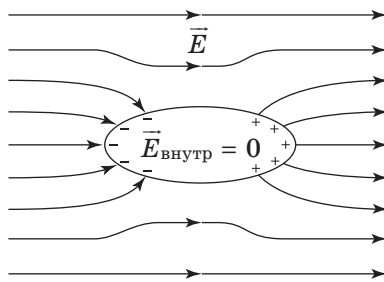


рис. 3.9

их в движение, которое продолжалось бы до тех пор, пока поле внутри проводника не исчезло.

Первое из свойств проводника в электрическом поле выражается уравнением

$$E_{\text{внутр}} = 0.$$

Это свойство используется для защиты от внешних электрических полей — *экранировки*. Приборы или устройства, которые нужно защитить, окружают проводящей оболочкой, которую соединяют с землёй, являющейся хорошим проводником. Избыточный заряд, возникающий на этой оболочке, уходит в землю.

2. Из равенства нулю напряжённости электрического поля внутри проводника следует, что потенциал во всём его объёме имеет постоянное значение:

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

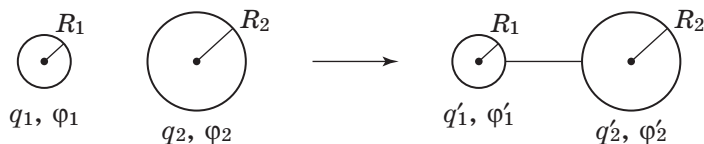
Если два проводника привести в соприкосновение или соединить проволокой, то потенциалы их немедленно сравняются, — это будет уже единый проводник. Земля, как проводящий электрический ток объект, тоже имеет определённый потенциал. Его принимают равным нулю. При устройстве заземления металлические части приборов или корпуса станков соединяют с землёй, и они принимают «нулевой потенциал».

3. Поскольку поверхность проводника является эквипотенциальной, линии напряжённости поля перпендикулярны к ней в каждой её точке (см. рис. 3.9).

Примеры решения задач



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 φ'_1 и φ'_2 после их соединения и заряд Δq , перешедший с одного шара на другой.



► Решение.

Заряды шаров в исходном состоянии найдём по формуле (3.8):

$$q_1 = 4\pi\varepsilon_0 \cdot R_1\varphi_1, \quad q_2 = 4\pi\varepsilon_0 \cdot R_2\varphi_2. \quad (1)$$

Потенциалы шаров после их соединения друг с другом:

$$\varphi'_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q'_1}{R_1}, \quad \varphi'_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q'_2}{R_2}. \quad (2)$$

Поскольку шары образуют теперь единый проводник, их потенциалы равны. Приравнявая правые части формул (2), получим уравнение

$$\frac{q'_1}{q'_2} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (3)$$

По закону сохранения заряда

$$q_1 + q_2 = q'_1 + q'_2. \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) позволяют найти q'_1 и q'_2 . Выразим q'_2 из (3) и подставим его в (4). Тогда, с учётом (1),

$$q'_1 = 4\pi\epsilon_0 \cdot \frac{R_1(R_1\varphi_1 + R_2\varphi_2)}{R_1 + R_2}, \quad (5)$$

$$q'_2 = 4\pi\epsilon_0 \cdot \frac{R_2(R_1\varphi_1 + R_2\varphi_2)}{R_1 + R_2}. \quad (6)$$

Подставив (5) и (6) в (2), получим

$$\varphi'_1 = \varphi'_2 = \frac{R_1\varphi_1 + R_2\varphi_2}{R_1 + R_2}.$$

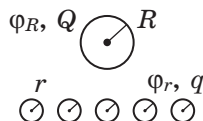
Заряд, перешедший от одного из шаров к другому,

$$\Delta q = |q_1 - q'_1|.$$

- Ответ. $\varphi'_1 = \varphi'_2 = 77$ В, $\Delta q = 0,24$ нКл. Поскольку $\varphi_1 > \varphi'_1$, заряд первого шара уменьшается, а второго — возрастает.

ЕГЭ

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



- Решение.

При слиянии капель их заряды q складываются:

$$Q = Nq. \quad (1)$$

Согласно (3.8), потенциалы капель

$$\varphi_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r}, \quad \varphi_R = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{R}.$$

Выражая отсюда q и Q и подставляя их в (1), получим

$$\varphi_R = \varphi_r \cdot N \frac{r}{R}. \quad (2)$$

Поскольку объём большой капли равен сумме объёмов маленьких капель, то

$$\frac{4\pi R^3}{3} = N \frac{4\pi r^3}{3},$$

откуда

$$\frac{r}{R} = N^{-\frac{1}{3}}.$$

Тогда уравнение (2) приобретает вид

$$\varphi_R = N^{\frac{2}{3}} \varphi_r.$$

► Ответ. $\varphi_R = 4 \text{ В}$.

3.1.7. Электрическая ёмкость и энергия заряженного конденсатора

определения и основные формулы

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

$$C = \frac{q}{U}. \quad (3.10)$$

- **Ёмкость плоского конденсатора:**

$$C_{\text{пл}} = \frac{\varepsilon_0 S}{d}, \quad (3.11)$$

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

- **Напряжённость поля внутри плоского конденсатора:**

$$E = \frac{U}{d}. \quad (3.12)$$

- **Энергия заряженного конденсатора:**

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2}. \quad (3.13)$$

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

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2}. \quad (3.14)$$

Единицы измерения

- Ёмкость плоского конденсатора измеряется в **фарадах**:
 $[C] = \Phi = \text{Кл/В}.$
- Площадь обкладок конденсатора измеряется в **квадратных метрах**:

$$[S] = \text{м}^2.$$

- Расстояние между обкладками измеряется в **метрах**:

$$[d] = \text{м}.$$

Подробное объяснение

Примеры конденсаторов — две параллельные пластины, составляющие *плоский* конденсатор, два коаксиальных цилиндра, являющихся обкладками *цилиндрического* конденсатора, две концентрические сферы, образующие *сферический* конденсатор.

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. По образовавшейся замкнутой цепи (рис. 3.10) протекает кратковременный ток, в результате чего одна из обкладок приобретает положительный заряд q , а другая — отрицательный заряд той же величины. Этот заряд называется *зарядом конденсатора*.

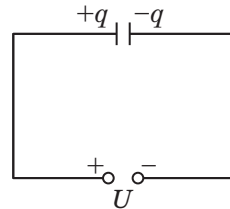


рис. 3.10

Опытным путём установлено, что заряд и напряжение между обкладками пропорциональны друг другу. Связь между ними принято записывать в виде

$$q = CU.$$

Коэффициент пропорциональности C называется *электрической ёмкостью конденсатора*, определяемой уравнением (3.10).

Ёмкость конденсатора численно равна отношению его заряда к разности потенциалов между его обкладками.

Электрическое поле существует лишь в пространстве между обкладками конденсатора и не подвержено влиянию окружающих тел. Ёмкость зависит от его формы и размеров. В частности, ёмкость плоского конденсатора выражается формулой (3.11).

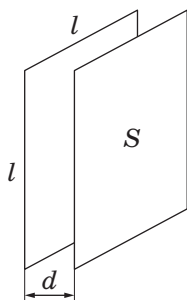


рис. 3.11

В пространстве между обкладками возникает электрическое поле. В плоском конденсаторе (рис. 3.11) напряжённость поля выражается формулой (3.12).

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

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, и выражается формулой (3.13).

Энергию конденсатора можно выразить через напряжённость электрического поля внутри него. Подставив (3.11) в (3.13) и $U = E \cdot d$ из (3.12), получим

$$W = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} V,$$

где $V = d \cdot S$ — объём, занятый полем.

Разделив на V , получим формулу (3.14) для объёмной плотности энергии электрического поля.

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.

Примеры решения задач



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

► Решение.

Мы имеем дело с двумя конденсаторами, отличающимися расстоянием между их обкладками. Заряд второго конденса-

тора тот же, что и первого, поскольку перед раздвижением обкладок он был отключён от источника тока. Исходя из формул (3.10) и (3.11) запишем:

$$C_1 = \frac{q}{U_1} = \frac{\varepsilon_0 S}{d_1}, \quad (1)$$

$$C_2 = \frac{q}{U_2} = \frac{\varepsilon_0 S}{d_2}. \quad (2)$$

Выразив q из уравнения (2) и подставив в (1), получим

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{d_2}{d_1}.$$

► Ответ. $U_2 = 400$ В.



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?

► Решение.

Согласно (3.10), заряд каждого из конденсаторов

$$q_1 = C_1 U_1, \quad q_2 = C_2 U_2. \quad (1)$$

Напряжение на батарее конденсаторов

$$U = U_1 + U_2. \quad (2)$$

Поскольку заряды конденсаторов равны друг другу, получим из (1)

$$C_1 U_1 = C_2 U_2. \quad (3)$$

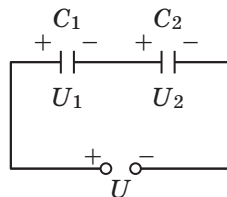
Решая уравнения (2) и (3) совместно, найдём

$$U_1 = \frac{C_2 U}{C_1 + C_2}, \quad U_2 = \frac{C_1 U}{C_1 + C_2}.$$

Подставив в (1), получим

$$q_1 = q_2 = \frac{C_1 C_2 U}{C_1 + C_2}.$$

► Ответ. $q_1 = q_2 = 1,5 \cdot 10^{-4}$ Кл, $U_1 = 150$ В, $U_2 = 50$ В.



ЕГЭ

Конденсатору ёмкостью $C = 1$ мкФ сообщён заряд $q = 1$ мКл. Обкладки конденсатора соединили проводником. Найти количество теплоты Q , выделившееся в проводнике при разрядке конденсатора, и разность потенциалов между обкладками конденсатора до разрядки.

- Решение. Количество теплоты, выделяющееся в цепи при протекании тока разрядки, равно энергии заряженного конденсатора. Согласно (3.13),

$$Q = \frac{q^2}{2C}.$$

Напряжение между обкладками конденсатора, согласно (3.10),

$$U = \frac{q}{C}.$$

- Ответ. $Q = 0,25$ Дж, $U = 500$ В.

3.1.8. Соединение конденсаторов

определения и основные формулы

- Ёмкость батареи конденсаторов зависит от способа их соединения.

- Параллельное соединение n конденсаторов:

$$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (3.15)$$

- Последовательное соединение n конденсаторов:

$$\frac{1}{C_{\text{посл}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (3.16)$$

Подробное объяснение

Найдём ёмкость батареи конденсаторов при параллельном и последовательном их соединении.

1. Параллельное соединение.

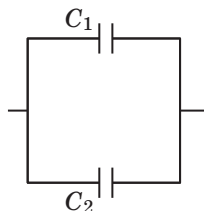


рис. 3.12

Для простоты рассмотрим батарею, состоящую из двух конденсаторов ёмкостями C_1 и C_2 (рис. 3.12). Напряжение U , приложенное к батарее, одинаково для каждого из конденсаторов. Поэтому заряды конденсаторов, согласно (3.10),

$$q_1 = C_1 U,$$

$$q_2 = C_2 U.$$

Поскольку заряд батареи $q = q_1 + q_2$, её ёмкость

$$C_{\text{пар}} = \frac{q}{U} = \frac{C_1 U + C_2 U}{U} = C_1 + C_2.$$

Ёмкость батареи параллельно соединённых конденсаторов равна сумме ёмкостей каждого из них.

2. Последовательное соединение.

При последовательном соединении конденсаторов (рис. 3.13) приложенное к батарее напряжение U распределяется по каждому из конденсаторов, так что

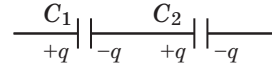


рис. 3.13

$$U = U_1 + U_2. \quad (3.17)$$

Заряды конденсаторов равны друг другу ($q_1 = q_2 = q$), поскольку при подключении батареи к источнику по цепи протекает кратковременный ток зарядки, одинаковый для каждого из конденсаторов.

Другое доказательство этого: каждая из обкладок конденсаторов изолирована от остальных. В частности, правая обкладка конденсатора C_1 и левая обкладка конденсатора C_2 вместе с соединяющим их проводом представляют собой изолированный проводник с зарядом $q = 0$. После зарядки батареи, по закону сохранения заряда, суммарный заряд этих обкладок остаётся равным нулю, поэтому, если первая из них приобретает заряд $-q$, то вторая $+q$.

Из (3.10) следует, что $U_1 = \frac{q}{C_1}$, $U_2 = \frac{q}{C_2}$, а напряжение на батарее конденсаторов $U = \frac{q}{C_{\text{посл}}}$. Подставив эти формулы в (3.17) и сократив q , получим

$$\frac{1}{C_{\text{посл}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

Величина, обратная ёмкости батареи конденсаторов при их последовательном соединении, равна сумме обратных величин ёмкостей каждого из конденсаторов.

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.

Примеры решения задач



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.

► Решение.

Ёмкость параллельно соединённых конденсаторов C_1 и C_2 найдём по формуле (3.15)

$$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2. \quad (1)$$

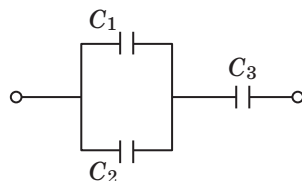
Ёмкость батареи, согласно (3.16), найдём из уравнения

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{\text{пар}}} + \frac{1}{C_3}. \quad (2)$$

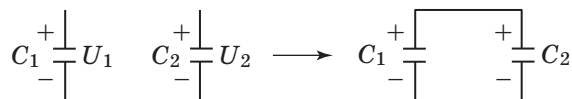
Подставив (1) в (2), получим

$$C = \frac{C_3(C_1 + C_2)}{C_1 + C_2 + C_3}.$$

► Ответ. $C = 2,5$ мкФ.



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 одноименными полюсами. Какая разность потенциалов установилась на обкладках конденсаторов после их соединения?



► Решение.

Заряды q_1 и q_2 конденсаторов до их соединения найдём по формуле (3.10):

$$q_1 = C_1 U_1, \quad q_2 = C_2 U_2. \quad (1)$$

После соединения заряд батареи конденсаторов

$$q = q_1 + q_2, \quad (2)$$

а её ёмкость, согласно (3.15),

$$C = C_1 + C_2. \quad (3)$$

Напряжение на батарее, с учётом (1)–(3),

$$U = \frac{q}{C} = \frac{C_1 U_1 + C_2 U_2}{C_1 + C_2}.$$

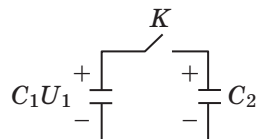
► Ответ. $U = 260$ В.



Конденсатор ёмкостью $C_1 = 1000$ пФ, заряженный до напряжения $U_1 = 100$ В, соединяют с незаряженным конденсатором ёмкостью $C_2 = 2000$ пФ. Какая энергия ΔW теряется при этом на образование искры, возникающей в момент соединения конденсаторов?

► Решение.

Энергия заряженного конденсатора C_1 , согласно (3.13),



$$W_1 = \frac{C_1 U_1^2}{2}. \quad (1)$$

После замыкания ключа K (см. рисунок) энергия батареи, составленной из параллельно соединённых конденсаторов C_1 и C_2 ,

$$W_2 = \frac{q_1^2}{2C_{\text{пар}}}, \quad (2)$$

где $q_1 = C_1 U_1$ — первоначальный заряд конденсатора C_1 , поскольку теперь это заряд батареи.

Учитывая (3.15), получим из (2)

$$W_2 = \frac{C_1^2 U_1^2}{2(C_1 + C_2)}.$$

Разность энергий

$$\Delta W = W_1 - W_2 = \frac{C_1 C_2 U_1^2}{2(C_1 + C_2)}.$$

Обобщая результат, можно утверждать, что при замыкании электрической цепи, содержащей источник тока, искра возникает всегда — независимо от величины напряжения на его клеммах.

Искра — пример самостоятельного разряда, возникающего в газе, когда напряжённость поля между контактами выключателя $E = \frac{U}{d}$ превысит величину $E_0 = 30$ кВ/см. Чем ниже напряжение источника U , тем позже наступает пробой при сближении контактов.

► Ответ. $\Delta W = 3,3 \cdot 10^{-6}$ Дж.

3.1.9. Диэлектрики в электрическом поле

определения и основные формулы

- ▶ **Диэлектрики** — вещества, не проводящие электрический ток.
- ▶ **Поляризация диэлектрика** — появление на поверхности диэлектрика связанного (поляризационного) заряда при помещении его в электрическое поле.
- ▶ **Диэлектрическая проницаемость диэлектрика:**

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}, \quad (\varepsilon > 1), \quad (3.18)$$

где E — напряжённость электрического поля в диэлектрике, E_0 — напряжённость электрического поля в вакууме.

- ▶ **Ёмкость конденсатора при наличии диэлектрика:**

$$C = \varepsilon C_0, \quad (3.19)$$

где C_0 — ёмкость воздушного конденсатора.

- ▶ **Энергия заряженного конденсатора:**

$$W = \varepsilon W_0, \quad (3.20)$$

W_0 — энергия конденсатора в отсутствие диэлектрика.

- ▶ **Закон Кулона для безграничного диэлектрика:**

$$F_{\text{кул}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}. \quad (3.21)$$

Подробное объяснение

В проводниках имеются свободные заряды, способные перемещаться по всему объёму проводника, в диэлектриках таких зарядов нет. Рассмотрим опыт, доказывающий это.

Поместим в электрическое поле плоского конденсатора проводник A и диэлектрик B (рис. 3.14, a). Разделим затем каждый из них на две части и выключим поле. Обе части проводника заряжаются по индукции и приобретают заряды противоположных знаков (рис. 3.14, b). Обе части диэлектрика остаются незаряженными, что и подтверждает сказанное.

Несмотря на отсутствие свободных зарядов, диэлектрики оказывают влияние на электрическое поле, созданное заряженными телами, и могут существенно его изменять. Это показывает простой опыт. Укрепим на стержне электроскопа металлический диск A и сообщим ему некоторый заряд, вследствие чего стрелка электроскопа отклоняется (рис. 3.15, a). Приблизим теперь к этому диску толстую пластину B из диэлектрика, например из стекла (рис. 3.15, b). Угол

отклонения стрелки электроскопа резко уменьшается, как будто диск A теряет заряд. Если убрать диэлектрик, то картина восстанавливается в прежнем виде.

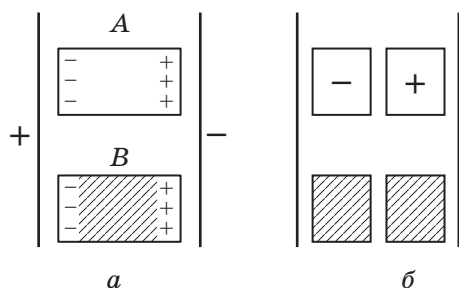


рис. 3.14

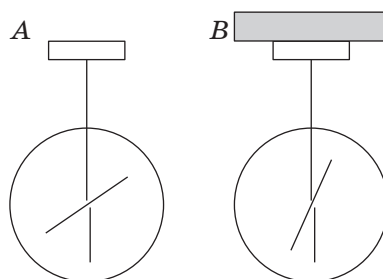


рис. 3.15

Диэлектрик, помещённый в электрическое поле, *поляризуется*. Это значит, что на его поверхности появляется избыточный заряд (рис. 3.16). Этот заряд называется *поляризационным*, или *связанным*. Механизм поляризации у разных веществ разный, и по этому признаку диэлектрики можно разделить на три типа.

К *первому типу* относятся диэлектрики, молекулы которых представляют собой диполи в отсутствие внешнего поля, т. е. являются *полярными*. Каждая молекула такого диэлектрика несёт на одном своём конце отрицательный заряд, а на другом конце — положительный.

Если внести пластинку из диэлектрика в поле заряженного плоского конденсатора (рис. 3.16), молекулы диэлектрика ориентируются вдоль направления силовых линий поля. В частности, молекулы, расположенные на поверхности, обращённой к положительной обкладке конденсатора, поворачиваются к ней своим отрицательным полюсом, а молекулы, расположенные на противоположной грани пластинки — со стороны отрицательной обкладки конденсатора, — обращаются к ней своим положительным полюсом. В результате рядом с положительной обкладкой, заряд которой $+q$, возникает связанный отрицательный заряд $-q'$, а рядом с отрицательной обкладкой — связанный положительный заряд $+q'$. Поскольку $q' < q$, заряды на поверхности диэлектрика частично компенсируют заряды обкладок конденсатора. Напряжённость поля при этом

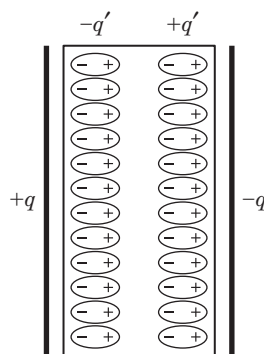


рис. 3.16

уменьшается, но не обращается в нуль, как это происходит в металлах. Этим объясняется «уменьшение» заряда диска электроскопа в описанном выше опыте (рис. 3.15).

Молекулы диэлектриков *второго типа* в отсутствие внешнего поля неполярны. Поляризация таких диэлектриков во внешнем поле проявляется в том, что центры тяжести положительных и отрицательных зарядов их молекул (ядер атомов и электронов) смещаются друг относительно друга и образуют электрические диполи. Эти диполи ведут себя во внешнем поле так же, как и дипольные молекулы диэлектриков первого типа.

К *третьему типу* диэлектриков относятся *ионные кристаллы*. Это соединения галогенидов щелочных металлов NaCl, KJ и т. п., имеющие кристаллическую решётку в виде двух одинаковых, вложенных друг в друга подрешёток, составленных из положительных и отрицательных ионов (рис. 3.17). Во внешнем электрическом поле подрешётки смещаются друг относительно друга, в результате чего на одной грани кристалла появляется избыточный положительный, а на противоположной грани — избыточный отрицательный заряд подобно тому, как это изображено на рис. 3.16.

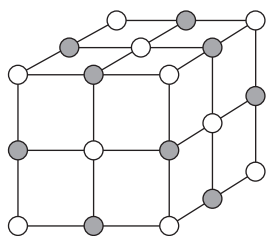


рис. 3.17

К диэлектрикам относится большинство веществ, встречающихся нам в повседневной жизни. Это сухое дерево, пластмассы, различные полимеры, минералы, чистые жидкости. Диэлектрики являются хорошими изоляторами, и это их свойство используется в разнообразных электрических приборах. При изготовлении конденсаторов диэлектриками заполняют пространство между их обкладками.

Несмотря на различие в механизмах поляризации, все диэлектрики влияют на внешнее поле одинаковым образом — ослабляют его. Диэлектрики характеризуются диэлектрической проницаемостью ϵ , которая, согласно (3.18), показывает, во сколько раз напряжённость электрического поля в веществе меньше напряжённости поля, созданного теми же зарядами в вакууме.

Помещение диэлектрика внутрь конденсатора увеличивает его ёмкость в ϵ раз. Это значит, что в ϵ раз возрастает заряд конденсатора, подключённого к источнику постоянного напряжения.

Энергия, которую способен накопить конденсатор при его зарядке, также возрастает в ϵ раз.

В формулы электростатики (3.5), (3.11) и (3.14), записанные для поля в вакууме, при наличии диэлектрика следует поставить рядом

с электрической постоянной ε_0 множитель ε . Это будет справедливо в том случае, когда диэлектрик заполняет всё пространство, где существует электрическое поле. В конденсаторе — это пространство между его обкладками.

Примеры решения задач



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 ε скипидара.

- Решение. По закону Кулона (3.1), в вакууме сила взаимодействия зарядов

$$F_0 = k_0 \frac{q_1 q_2}{r_0^2}. \quad (1)$$

В безграничном диэлектрике эта сила, согласно (3.21),

$$F = k_0 \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}. \quad (2)$$

Разделив (1) на (2), учитывая, что по условию задачи $F = F_0$, получим

$$\varepsilon = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2.$$

- Ответ. $\varepsilon = 2,2$.



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 $\varepsilon = 7$.

- Решение. Заряд конденсатора, согласно (3.10),

$$q = CU. \quad (1)$$

Заряд его в отсутствие диэлектрика, согласно (3.19),

$$q_0 = C_0 U = \frac{CU}{\varepsilon} = \frac{q}{\varepsilon}. \quad (2)$$

Следовательно, при удалении пластинки заряд конденсатора уменьшится на величину

$$\Delta q = q - q_0 = q \left(1 - \frac{1}{\varepsilon} \right).$$

Исходя из формулы (3.13), аналогичным образом найдём уменьшение энергии конденсатора:

$$\Delta W = \frac{q^2}{2C} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon} \right).$$

► Ответ. $\Delta q = 1,2 \cdot 10^{-5}$ Кл, $\Delta W = 8,4 \cdot 10^{-3}$ Дж.

ЕГЭ

Плоский воздушный конденсатор, площадь обкладок которого $S = 100$ см², заполнили диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2$, после чего ёмкость конденсатора оказалась равной $C = 177$ пФ. Найти расстояние d между обкладками конденсатора.

► Решение. Ёмкость конденсатора, согласно (3.19),

$$C = \varepsilon C_0, \quad (1)$$

где C_0 — его ёмкость в отсутствие диэлектрика.

Подставляя в (1) C_0 из формулы (3.11), найдём:

$$d = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{C}.$$

► Ответ. $d = 1$ мм.

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

определения и основные формулы

- **Электрический ток** — упорядоченное движение зарядов в проводнике.
- **Направление тока** — направление движения положительных зарядов.
- **Для существования тока необходимы:**
 - носители тока,
 - замкнутая цепь, в которой есть источник тока.
- **Носители тока** — частицы, имеющие заряд, — электроны или ионы, движущиеся в электрическом поле, созданном внутри проводника источником тока.

- **Электродвижущая сила (ЭДС)** источника тока — разность потенциалов на его клеммах при разомкнутой цепи.
- **Сила тока** — величина заряда, протекающего через поперечное сечение проводника за единицу времени:

$$I = \frac{q}{t}. \quad (3.22)$$

Единицы измерения

- Электродвижущая сила измеряется в **вольтах**:

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

- Сила тока измеряется в **амперах**:

$$[I] = \text{А} = \text{Кл/с}.$$

Подробное объяснение

Постоянный электрический ток течёт в проводнике, между концами которого поддерживается постоянная разность потенциалов, создаваемая источником тока. Носители тока в разных телах имеют разную природу: в металлах и полупроводниках носители тока — *электроны*, в растворах электролитов — *положительные и отрицательные ионы*, в газах — *положительные ионы и электроны*, в вакууме — *электроны*, испускаемые нагретым катодом.

За направление тока принято направление движения положительных зарядов, хотя в проводниках первого рода — металлах — фактически перемещаются отрицательные электроны в направлении, обратном направлению тока.

Рассмотрим замкнутую цепь, состоящую из источника тока и проводника сопротивлением R — внешнего участка цепи (рис. 3.18). Источник тока, электродвижущая сила которого $\mathcal{E}$, имеет внутреннее сопротивление r . Он создаёт внутри проводника электрическое поле, приводящее в движение заряды — носители тока.

На внешнем участке цепи ток течёт от положительного полюса источника к отрицательному.

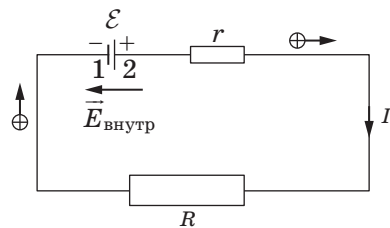


рис. 3.18

На рис. 3.19 изображена механическая модель замкнутой цепи. По наклонному жёлобу под действием силы тяжести (электрического поля, созданного источником тока) шарики (носители тока) движутся из точки 2 в точку 1. На рис. 3.18 такой жёлоб — это внешний участок цепи (сопротивлением R). Потенциал ϕ_1 отрицательного

полюса источника меньше потенциала φ_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 неэлектрического происхождения — так называемых *сторонних сил*.

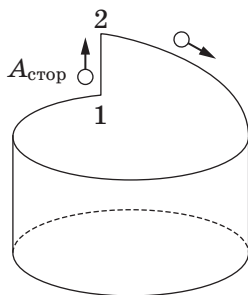


рис. 3.19

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. В механической модели, изображённой на рис. 3.19, работа сторонних сил совершается на участке 1–2.

Электродвижущая сила источника тока равна работе сторонних сил при переносе единичного положительного заряда через источник — от меньшего потенциала к большему:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор}}}{q}. \quad (3.23)$$

Направление ЭДС совпадает с направлением тока в цепи.

Сила тока, протекающего по проводнику, выражается равенством (3.22). В системе СИ единица силы тока — *ампер* — одна из основных единиц. Она определяется через магнитную силу взаимодействия токов (см. раздел 3.3.4).

Примеры решения задач

ЕГЭ

Сколько электронов проходит через поперечное сечение проводника за время $t = 1$ с, если по проводнику течёт ток силой $I = 1$ А?

► Решение. Из формулы (3.22) следует, что заряд, переносимый N электронами при протекании по проводнику тока I ,

$$q = N \cdot e = I \cdot t,$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона.

Отсюда найдём

$$N = \frac{I \cdot t}{e}.$$

► Ответ. $N = 6,25 \cdot 10^{18}$.

3.2.2. Закон Ома. Электрическое сопротивление проводника

определения и основные формулы

- **Закон Ома.** Сила тока в проводнике равна отношению приложенного напряжения к сопротивлению проводника R :

$$I = \frac{U}{R}. \quad (3.24)$$

- **Электрическое сопротивление проводника** — отношение напряжения на концах проводника к силе тока в нём:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (3.25)$$

- **Сопротивление однородного проводника:**

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (3.26)$$

где l — длина проводника,

S — площадь его поперечного сечения,

ρ — удельное сопротивление материала, из которого он изготовлен.

- **Сопротивление металлов при температуре t :**

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (3.27)$$

где R_0 — сопротивление при $t = 0$ °C,

α — температурный коэффициент сопротивления металла.

- **Закон Ома для замкнутой цепи:**

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}, \quad (3.28)$$

где $\mathcal{E}$ — ЭДС источника тока,

r — его внутреннее сопротивление,

R — сопротивление нагрузки.

Единицы измерения

- Сопротивление измеряется в **омах**:

$$[R] = \text{Ом} = \text{В/А}.$$

- Единица измерения удельного сопротивления:

$$[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{м}.$$

- Температура измеряется в **градусах Цельсия**:

$$[t] = \text{град} = ^\circ\text{C}.$$

- Единица измерения температурного коэффициента сопротивления:

$$[\alpha] = \text{град}^{-1}.$$

Подробное объяснение

Закон Ома был открыт экспериментально в 1827 году. Немецкий физик Георг Ом дал следующую формулировку своего закона:

Отношение напряжения U на концах проводника к силе тока I в нём не зависит от силы тока для проводников первого рода — металлов.

Это отношение называется *сопротивлением проводника R* [формула (3.25)].

Сопротивление проводника $R = 1$ Ом, если при напряжении $U = 1$ В по проводнику течёт ток $I = 1$ А.

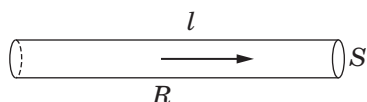


рис. 3.20

Сопротивление однородного проводника, представляемого соотношением (3.26), пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади его поперечного сечения S (рис. 3.20).

Удельное сопротивление ρ — сопротивление проводника, у которого отношение $\frac{l}{S} = 1 \text{ м}^{-1}$. Оно характеризует свойства материала, из которого изготовлен проводник.

Сопротивление металлов, согласно (3.27), с ростом температуры возрастает. Численные значения температурного коэффициента сопротивления α лежат в пределах $(4 \dots 6) \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$. Так, например, при нагревании меди от 0 до 20 °С её сопротивление увеличивается на 10 %, а при нагревании до 100 °С — на 43 %.

Если участок цепи состоит из нескольких последовательно соединённых проводников, то напряжение между концами каждого из них тем выше, чем больше его сопротивление. Напряжение на всём участке равно сумме напряжений на каждом из проводников.

Сила тока в цепи, изображённой на рис. 3.18, определяется *законом Ома для замкнутой цепи*. Согласно (3.28), она равна отношению ЭДС источника тока в этой цепи к полному её сопротивлению.

Максимальное значение тока в цепи — *ток короткого замыкания* — достигается при $R = 0$. Этот ток тем больше, чем меньше внутреннее сопротивление источника тока. Мощные источники имеют малое внутреннее сопротивление и могут создать в цепи большую силу тока.

Примеры решения задач

Источник постоянного тока с ЭДС $\mathcal{E} = 12$ В и внутренним сопротивлением $r = 1$ 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.

► Решение.

По закону Ома для замкнутой цепи (3.28):

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

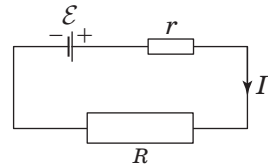
Падение напряжения на внешнем участке цепи, согласно (3.24),

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

Падение напряжения внутри источника

$$U_r = \mathcal{E} - U_R = \mathcal{E} \cdot \frac{r}{R + r}.$$

► Ответ. $I = 1,2 \text{ А}$; $U_R = 10,8 \text{ В}$; $U_r = 1,2 \text{ В}$.



ОГЭ

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 $\rho = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

► Решение.

Сила тока в цепи, согласно (3.24),

$$I = \frac{U}{R + R_0}, \quad (1)$$

где R — сопротивление реостата,

$R_0 = \frac{U_0}{I_0}$ — сопротивление фонаря.

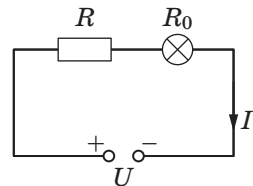
По условию задачи $I = I_0$. Тогда R можно найти из уравнения (1):

$$R = \frac{1}{I_0} (U - U_0). \quad (2)$$

Длину проволоки найдём, воспользовавшись формулой (3.26):

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

► Ответ. $R = 8 \text{ Ом}$; $l = 14,5 \text{ м}$.



ЕГЭ

В проводнике сопротивлением $R = 2$ Ом, подключённом к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 1,1$ В, течёт ток $I = 0,5$ А. Какова сила тока $I_{\max}$ при коротком замыкании источника?

► Решение.

Ток короткого замыкания $I_{\max}$ найдём, полагая в формуле (3.28) $R = 0$,

$$I_{\max} = \frac{\mathcal{E}}{r}. \quad (1)$$

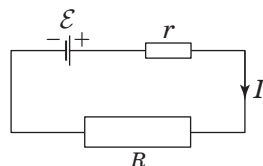
Внутреннее сопротивление источника r выразим из (3.28)

$$r = \frac{\mathcal{E}}{I} - R. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим

$$I_{\max} = \frac{\mathcal{E}I}{\mathcal{E} - IR}.$$

► Ответ. $I_{\max} = 5,5$ А.



3.2.3. Соединение проводников

определения и основные формулы

► **Последовательное соединение** N проводников. Общее сопротивление участка цепи:

$$R_{\text{посл}} = R_1 + R_2 + \dots + R_N. \quad (3.29)$$

► **Параллельное соединение** N проводников. Проводимость участка цепи:

$$\frac{1}{R_{\text{пар}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}. \quad (3.30)$$

► **Проводимость** проводника:

$$G = \frac{1}{R}, \quad (3.31)$$

где R — сопротивление проводника.

► **Электропроводность** (удельная проводимость) вещества:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (3.32)$$

Единицы измерения

► Единица измерения проводимости — **сименс**:

$$[G] = 1/\text{Ом} = \text{См}.$$

► Электропроводность измеряется в **сименсах на метр**:

$$[\sigma] = \text{См/м}.$$

Подробное объяснение

Найдём сопротивление участка цепи при последовательном и параллельном соединении проводников.

1. Последовательное соединение.

Возьмём участок цепи, составленный из двух проводников сопротивлениями R_1 и R_2 (рис. 3.21). Напряжение U на этом участке равно сумме напряжений на каждом из проводников:

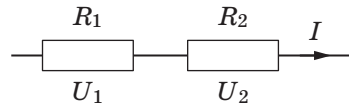


рис. 3.21

$$U = U_1 + U_2. \quad (3.33)$$

По закону Ома $U = IR$, где R — полное сопротивление цепи. Поскольку ток I , текущий в каждом из проводников, один и тот же, напряжение на первом из них $U_1 = IR_1$, а на втором — $U_2 = IR_2$. Подставляя U , U_1 и U_2 в (3.33) и сокращая I , получим

$$R = R_1 + R_2.$$

Сопротивление участка цепи при последовательном соединении проводников равно сумме сопротивлений каждого из них.

2. Параллельное соединение.

Чтобы найти сопротивление участка цепи, составленного из параллельно соединённых проводников сопротивлениями R_1 и R_2 (рис. 3.22), заметим, что напряжение U на каждом из проводников одно и то же. Поэтому ток, текущий в первом проводнике, $I_1 = \frac{U}{R_1}$, а ток, текущий во втором, $I_2 = \frac{U}{R_2}$. Общий

ток

$$I = I_1 + I_2. \quad (3.34)$$

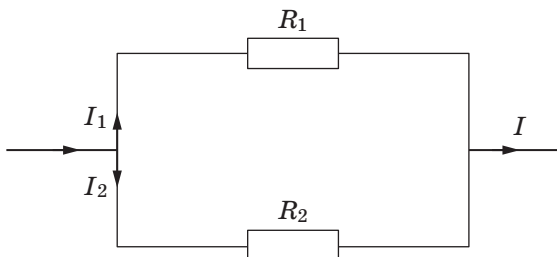


рис. 3.22

Поскольку ток в цепи I определяется общим сопротивлением цепи $R \left(I = \frac{U}{R} \right)$, то, подставляя в (3.34) токи I , I_1 и I_2 и сокращая U , получим

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Величина (3.31), обратная сопротивлению проводника, называется его *электрической проводимостью*.

Проводимость участка цепи при параллельном соединении проводников равна сумме проводимостей каждого из проводников:

$$G = G_1 + G_2.$$

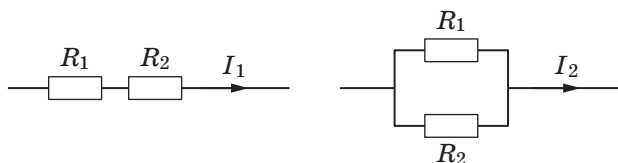
Электропроводность вещества (3.32), из которого изготовлен проводник, — величина, обратная его удельному сопротивлению.

Наибольшей электропроводностью обладают серебро, медь и алюминий, которые используются для изготовления серебряных контактов реле, а также проводов, имеющих широкое применение в промышленности и быту. Сплавы меди, никеля и марганца, такие как константан, нихром, манганин, имеющие высокое удельное сопротивление, применяются для изготовления нагревательных элементов, тугоплавкий вольфрам — для изготовления ламп накаливания.

Примеры решения задач



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 сопротивление резисторов.



► Решение.

По закону Ома (3.24), с учётом (3.29) и (3.30),

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + R_2}, \quad (1)$$

$$I_2 = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) решаем совместно. Правые и левые части уравнений будут иметь одинаковую размерность, если I , U и R выразить в единицах системы СИ — соответственно в амперах, вольтах и омах. Тогда для упрощения вида уравнений подставим в них численные значения этих величин, приведённые в условии задачи. Система уравнений (1) и (2) принимает вид:

$$\begin{cases} R_1 + R_2 = 40, \\ R_1 \cdot R_2 = 300, \end{cases}$$

откуда найдём R_1 и R_2 .

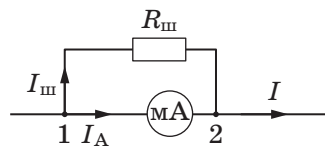
► Ответ. $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 30$ Ом.



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?

► Решение.

Шунт — сопротивление, включаемое параллельно миллиамперметру, для расширения предела его измерения (см. рисунок).



Ток в цепи I в точке 1 делится на две части: I_A — через миллиамперметр и $I_{\text{ш}}$ — через шунт, так что

$$I = I_A + I_{\text{ш}}. \quad (1)$$

Напряжение на них

$$U_{\text{ш}} = U_A.$$

По закону Ома (3.24), это можно записать в виде

$$I_A R_A = I_{\text{ш}} R_{\text{ш}}. \quad (2)$$

Выражая $R_{\text{ш}}$ из (2) и подставляя туда $I_{\text{ш}}$ из (1), найдём

$$R_{\text{ш}} = R_A \cdot \frac{I_A}{I - I_A}.$$

► Ответ. $R_{\text{ш}} = 0,05$ Ом.

3.2.4. Работа и мощность тока. Закон Джоуля - Ленца

определения и основные формулы

- **Работа кулоновской силы** при переносе заряда q по проводнику, к которому приложено напряжение U :

$$A = qU. \quad (3.35)$$

- **Мощность тока** на участке цепи сопротивлением R :

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}, \quad (3.36)$$

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:

$$Q = I^2 R t. \quad (3.37)$$

- **Мощность источника тока** в замкнутой цепи:

$$P_{\text{полн}} = I^2 (R + r) = \frac{\mathcal{E}^2}{R + r}, \quad (3.38)$$

где $\mathcal{E}$ — ЭДС источника,

r — его внутреннее сопротивление,

R — сопротивление нагрузки.

- **Коэффициент полезного действия (КПД)** источника тока в цепи:

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{полн}}} = \frac{R}{R + r}, \quad (3.39)$$

где P — мощность, выделяемая на внешнем участке цепи.

Единицы измерения

- Мощность тока измеряется в **ваттах**:

$$[P] = \text{Вт} = \text{В} \cdot \text{А}.$$

Подробное объяснение

Опыт показывает, что проводник, по которому течёт электрический ток, нагревается. Работа, совершаемая источником для поддержания тока в цепи, превращается в тепло.

Рассмотрим проводник сопротивлением R , по которому течёт ток I (рис. 3.23). Напряжение на концах проводника $U = IR$. При переносе по нему заряда q электрическое поле за время t совершает *работу*

$$A = qU = It \cdot U. \quad (3.40)$$

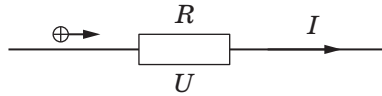


рис. 3.23

Двигаясь внутри проводника, носители тока — электроны — соударяются с ионами кристаллической решётки и передают им свою энергию. Энергия колебаний ионов увеличивается, и температура проводника возрастает. Количество выделившегося тепла, равное работе (3.40), определяется законом Джоуля — Ленца (3.37).

В замкнутой цепи тепло выделяется не только во внешнем участке цепи, но и внутри источника тока, а его *полная мощность*

$$P_{\text{полн}} = I^2(R + r) = \frac{\mathcal{E}^2}{R + r}.$$

Мощность источника определяется его ЭДС, внутренним сопротивлением и сопротивлением нагрузки. Мощность, которую выдаёт источник во внешнем участке цепи (*полезная мощность*):

$$P = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R + r)^2}.$$

Коэффициент полезного действия (КПД) источника тока в цепи:

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{полн}}} = \frac{R}{R + r}.$$

Эта величина приближается к единице, когда сопротивление нагрузки R намного превышает внутреннее сопротивление источника ($R \gg r$).

Наибольшую мощность во внешнем участке цепи можно получить, если его сопротивление сделать равным внутреннему сопротивлению источника. Тогда

$$P_{\text{max}} = \frac{\mathcal{E}^2}{4r} \quad (\text{при } R = r). \quad (3.41)$$

Из двух 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.

Выделение тепла в проводниках с током используется при изготовлении нагревательных приборов. Однако при передаче электроэнергии на большие расстояния нагревание проводов приводит к её потерям. Для снижения этих потерь силу тока уменьшают, повышая

напряжение, с тем чтобы передаваемая мощность осталась прежней. Чтобы избежать электрического пробоя изоляции проводов, их поднимают на большую высоту на мачтах высоковольтных линий электропередач, связывающих крупные электростанции с городами и посёлками, отстоящими от них на десятки и сотни километров.

Примеры решения задач



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.

► Решение.

Для нахождения двух величин — $\mathcal{E}$ и r — нужно записать два независимых уравнения, содержащих эти величины. Согласно (3.38),

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (1)$$

Мощность тока на внешнем участке цепи, согласно (3.36):

$$P = I^2 R. \quad (2)$$

Для упрощения вида уравнений подставим в (1) и (2) численные значения исходных величин, выраженные в единицах системы СИ, не указывая размерность.

Из уравнения (2) найдём

$$R_1 = \frac{P_1}{I_1^2} = 2 \text{ Ом}, \quad R_2 = \frac{P_2}{I_2^2} = 10 \text{ Ом}.$$

Подставляя поочередно R_1 и R_2 в уравнение (1), получим систему двух уравнений:

$$\begin{cases} \mathcal{E} = 3 \cdot (2 + r), \\ \mathcal{E} = 10 + r, \end{cases}$$

откуда найдём $\mathcal{E}$ и r .

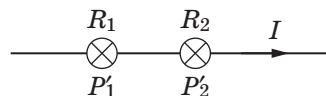
► Ответ. $\mathcal{E} = 12$ В, $r = 2$ Ом.



Имеются две электрические лампочки мощностью $P_1 = 40$ Вт и $P_2 = 60$ Вт, рассчитанные на напряжение сети $U = 200$ В. Какую мощность будет потреблять каждая из лампочек, если их подключить к сети последовательно?

► Решение.

Согласно (3.36), мощность, потребляемая каждой из лампочек,



$$P_1 = \frac{U^2}{R_1}, \quad P_2 = \frac{U^2}{R_2}. \quad (1)$$

Если лампочки включить в сеть последовательно, то мощность каждой из них

$$P'_1 = I^2 R_1, \quad P'_2 = I^2 R_2, \quad (2)$$

поскольку в этом случае общей для них служит сила тока, которую найдём по формуле (3.24):

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2}. \quad (3)$$

Для упрощения формул воспользуемся численными значениями величин, приведёнными в условии задачи. Тогда из (1) и (3) найдём

$$R_1 = \frac{U^2}{P_1} = 1210 \text{ Ом}, \quad R_2 = \frac{U^2}{P_2} = 807 \text{ Ом}.$$

$$I = 0,11 \text{ А}.$$

Подставив в (2), найдём численные значения мощности P'_1 и P'_2 , потребляемой лампочками.

Следует отметить, что лампочка меньшей мощности потребляет теперь бóльшую мощность — светит ярче.

► Ответ. $P'_1 = 14,6 \text{ Вт}$, $P'_2 = 9,8 \text{ Вт}$.

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.

В настоящем разделе мы рассмотрим некоторые явления электромагнетизма, подтверждающие эти положения. В частности, обсудим лежащие в их основе эксперименты, введём силовую характеристику магнитного поля и определим одну из основных единиц измерения физических величин в системе СИ — единицу силы тока — ампер.

3.3.1. Взаимодействие магнитов. Магнитное поле

определения и основные формулы

- ▶ **Постоянный магнит** — железный образец, подвергнутый действию магнитного поля и сохраняющий намагниченность.
- ▶ **Магнитные полюса** — места, где собираются железные опилки при поднесении к ним магнита.
- ▶ **Северный полюс магнита N** — конец, указывающий на север.
- ▶ **Южный полюс магнита S** — конец, указывающий на юг.
- ▶ **Магнитные силовые линии** — замкнутые линии, изображающие магнитное поле.
- ▶ **Направление силовой линии** указывает северный полюс помещённой в поле магнитной стрелки.

Подробное объяснение

В древности, в VI веке до н.э., был обнаружен минерал, способный притягивать к себе железные предметы. Он состоит из смеси окислов железа и входит в состав железных руд, которые человек добывает для получения из них железа и стали, используемых в промышленном производстве. Кусок такой руды представляет собой природный магнит, имеющий два полюса.

Постоянный магнит (или магнитная стрелка), подвешенный на нити, ориентируется вдоль магнитного меридиана Земли. Конец его, указывающий на север, называется *северным полюсом (N)*, а противоположный конец — *южным полюсом (S)*. Приближая два магнита друг к другу, заметим, что одноимённые их полюса отталкиваются, а разноимённые — притягиваются (рис. 3.24).



рис. 3.24

Разделив полюса, разрезав магнит на две части, обнаружим, что каждая из них тоже будет иметь два полюса, т. е. будет постоянным магнитом (рис. 3.25). Оба полюса — северный и южный, — неотделимы друг от друга, равноправны.

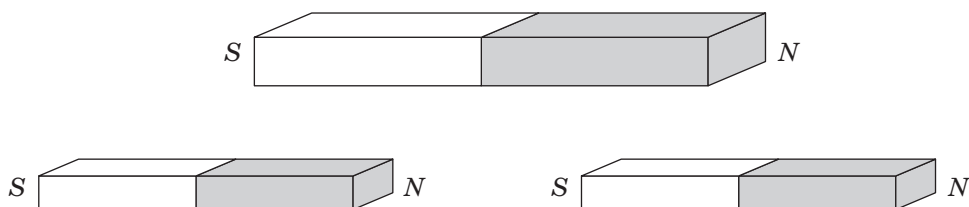


рис. 3.25

Магнитное поле, создаваемое Землёй или постоянными магнитами, изображается, подобно электрическому полю, *магнитными силовыми линиями*. Картину линий поля какого-нибудь магнита можно получить, помещая над ним лист бумаги, на котором насыпаны равномерным слоем железные опилки. Попадая в магнитное поле, опилки намагничиваются — у каждой из них появляется северный и южный полюсы. Противоположные полюсы стремятся сблизиться друг с другом, но этому мешает трение опилок о бумагу. Если постучать по бумаге пальцем, трение уменьшается и опилки притягиваются друг к другу, образуя цепочки, изображающие линии магнитного поля.

На рис. 3.26 показано расположение в поле прямого магнита опилок и маленьких магнитных стрелок, указывающих направление линий магнитного поля. За это направление принято направление *северного полюса* магнитной стрелки. Линии магнитного поля выходят из его северного полюса и входят в южный.

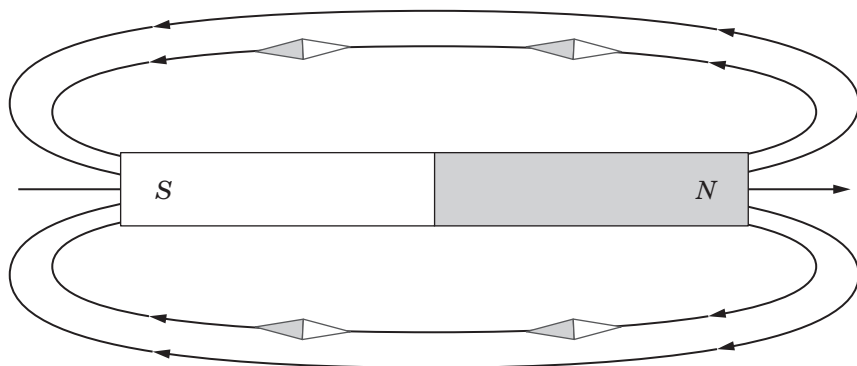


рис. 3.26

3.3.2. Опыт Эрстеда. Магнитное поле тока

определения и основные формулы

► **Вектор магнитной индукции** $\vec{B}$ — силовая характеристика магнитного поля.

► **Магнитное поле прямого проводника с током:**

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}, \quad (3.42)$$

где I — сила тока в проводнике,

r — расстояние от него,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м (**генри на метр**) — магнитная постоянная.

► **Соленоид** — катушка из провода.

► **Магнитное поле внутри длинного соленоида:**

$$B = \mu_0 n I, \quad (3.43)$$

где $n = \frac{N}{l}$ — число витков, приходящееся на единицу длины

соленоида,

I — сила тока в его обмотке.

► **Однородное поле** — поле, в котором вектор магнитной индукции всюду имеет постоянное значение, а силовые линии параллельны друг другу:

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

Единицы измерения

► Модуль вектора индукции магнитного поля 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**:

$$[r] = \text{м}.$$

Подробное объяснение

В начале XIX века датский учёный Эрстед сделал важное открытие, обнаружив действие электрического тока на постоянные магниты. Он поместил длинный провод над магнитной стрелкой. При пропускании по проводу тока стрелка поворачивалась, стремясь

расположиться перпендикулярно ему (рис. 3.27). Это можно было объяснить возникновением вокруг проводника магнитного поля.

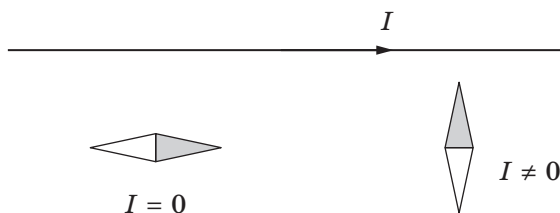


рис. 3.27

Подобно вектору напряжённости электрического поля $\vec{E}$, силовой характеристикой магнитного поля является *вектор магнитной индукции* $\vec{B}$. В каждой точке он направлен по касательной к проходящей через эту точку магнитной силовой линии, поэтому эти линии называются также *линиями магнитной индукции*.

Линии напряжённости электрического поля начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных, а сила, действующая в этом поле на заряд, направлена по касательной к линии в каждой её точке.

В отличие от линий электрического поля, 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.

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. 3.28). Направление линий определяется *правилом правого винта*.

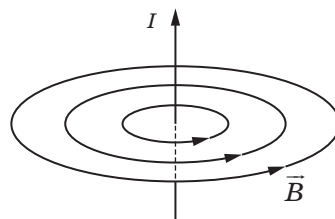


рис. 3.28

Винт располагают параллельно проводнику так, чтобы при вращении он двигался в направлении тока. Тогда направление вращения винта укажет направление силовых линий поля.

Модуль вектора магнитной индукции поля, созданного длинным проводником с током, выражается формулой (3.42).

Константа μ_0 называется *магнитной постоянной*. В системе СИ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м (*генри на метр*).

Магнитное поле тока принципиально ничем не отличается от поля, созданного постоянным магнитом. В этом смысле аналогом

плоского магнита является *длинный соленоид* — катушка из провода, длина которой значительно больше её диаметра (рис. 3.29).



рис. 3.29

Схема линий созданного им магнитного поля, изображённая на рис. 3.30, аналогична схеме линий плоского магнита (рис. 3.26). Кружочками обозначены сечения провода, образующего обмотку соленоида. Токи, текущие по проводу от наблюдателя, обозначены крестиками, а токи противоположного направления — к наблюдателю — обозначены точками.

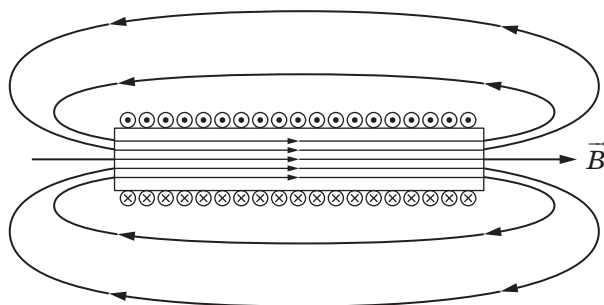


рис. 3.30

Такие же обозначения приняты и для линий магнитного поля, когда они перпендикулярны плоскости чертежа (рис. 3.31).

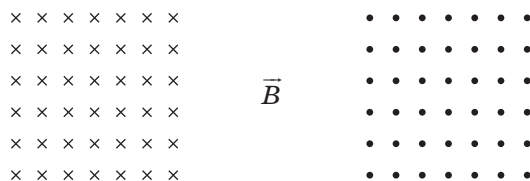


рис. 3.31

Направление тока в обмотке соленоида и направление линий магнитной индукции внутри него связаны *правилом правого винта*, которое в этом случае 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. 3.29).

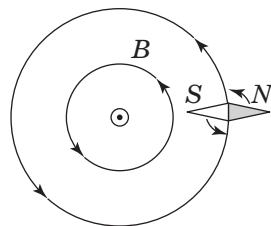
Исходя из этого правила, легко сообразить, что у соленоида, изображённого на рис. 3.30, северным полюсом служит правый его конец, а южным — левый.

Внутри соленоида создаётся *однородное* магнитное поле — вектор магнитной индукции имеет там постоянное значение ($\vec{B} = \text{const}$). В этом отношении соленоид подобен плоскому конденсатору, внутри которого создаётся однородное электрическое поле (см. рис. 3.4).

Примеры решения задач

ЕГЭ

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.



► **Решение.** Линии магнитной индукции $\vec{B}$ вблизи проводника — концентрические окружности, изображённые на рис. 3.28. Направление силовых линий показывает северный полюс N магнитной стрелки. В данном случае линии направлены против часовой стрелки, значит, ток по проводнику идёт к наблюдателю — направление тока и линий $\vec{B}$ связаны правилом правого винта.

► **Ответ.** К наблюдателю.

3.3.3. Силы, действующие в магнитном поле на движущиеся заряды и токи

определения и основные формулы

► **Сила Лоренца** — сила, действующая в магнитном поле на движущийся заряд q :

$$F_{\text{л}} = qvB \sin \alpha, \quad (3.44) \text{ где}$$

v — скорость заряда,

B — модуль вектора магнитной индукции, α — угол между векторами $\vec{v}$ и $\vec{B}$.

► **Сила Ампера** — сила, действующая в магнитном поле на прямолинейный проводник длиной l , по которому течёт ток I :

$$F_{\text{А}} = IlB \sin \alpha, \quad (3.45)$$

где α — угол между направлением тока и вектором B .

Единицы измерения

- Сила измеряется в **ньютонах**:

$$[F] = \text{Н.}$$

- Заряд измеряется в **кулонах**:

$$[q] = \text{Кл.}$$

- Скорость измеряется в **метрах в секунду**:

$$[v] = \text{м/с.}$$

Подробное объяснение

Сила Лоренца (3.44) направлена перпендикулярно линиям индукции магнитного поля $\vec{B}$ и скорости заряда $\vec{v}$ (рис. 3.32). Её направление удобно определять по *правилу левой руки*.

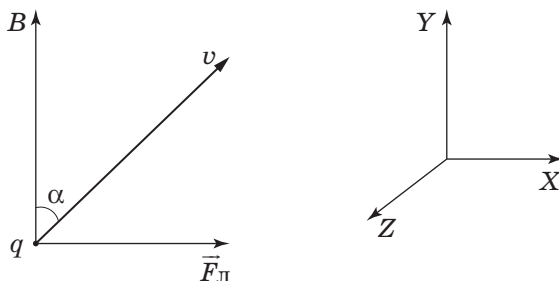


рис. 3.32

Четыре вытянутых пальца левой руки направляют вдоль вектора $\vec{v}$ так, чтобы линии $\vec{B}$ входили в ладонь. Тогда отставленный на 90° большой палец покажет направление силы, действующей на положительный заряд (рис. 3.33).

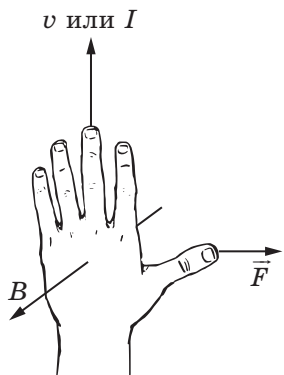


рис. 3.33

Сила, действующая в магнитном поле на проводник с током (3.45), складывается из суммы сил, действующих на каждый из зарядов, создающих в проводнике электрический ток. Она называется *силой Ампера*.

Направление силы Ампера также определяется правилом левой руки, но теперь направление четырёх её вытянутых пальцев должно совпадать с направлением тока в проводнике (рис. 3.33). На проводник, расположенный вдоль силовых линий, магнитная сила не действует.

Уравнение (3.45) позволяет дать количественную характеристику индукции магнитного поля. Отношение

$$B = \frac{F}{I \cdot l}$$

характеризует магнитное поле.

Модуль вектора магнитной индукции $\vec{B}$ численно равен силе, действующей на расположенный перпендикулярно к нему проводник длиной $l = 1$ м, по которому течёт ток $I = 1$ А.

Единицу индукции магнитного поля — *тесла* — можно представить в виде

$$[B] = \text{Тл} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}},$$

что эквивалентно её выражению, приведённому в п. 3.3.2.

Примеры решения задач



Электрон движется со скоростью $v = 5$ м/с параллельно длинному проводнику, по которому течёт ток $I = 2$ А. Найти силу, действующую на электрон, если расстояние между ним и проводником $r = 1$ см. Каково ускорение электрона?

► Решение.

Согласно (3.44), электрон испытывает действие силы со стороны магнитного поля, созданного током, текущим по проводнику:

$$F_{\text{Л}} = evB, \quad (1)$$

где e — заряд электрона.

Магнитное поле B находим по формуле (3.42):

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

Подставляя (2) в (1), получим

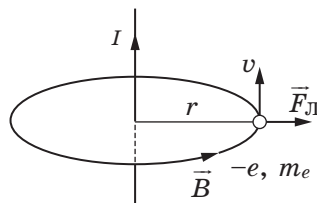
$$F_{\text{Л}} = \frac{\mu_0 I e v}{2\pi r}. \quad (3)$$

Ускорение электрона, согласно (1.24),

$$a = \frac{F_{\text{Л}}}{m_e},$$

где m_e — масса электрона.

► Ответ. $F_{\text{Л}} = 3,2 \cdot 10^{-23}$ Н; $a = 3,5 \cdot 10^7$ м/с².



ОГЭ

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?

► Решение.

Согласно (3.45), сила Ампера

$$F_A = IlB,$$

откуда

$$B = \frac{F_A}{Il}.$$



Работа при перемещении проводника, согласно (1.35),

$$A = F_A \cdot s.$$

Заметим, что работа силы Лоренца, действующая на отдельный заряд, равна нулю, поскольку в каждой точке траектории заряда сила перпендикулярна его перемещению.

► Ответ. $B = 0,04$ Тл; $A = 5 \cdot 10^{-3}$ Дж.

ЕГЭ

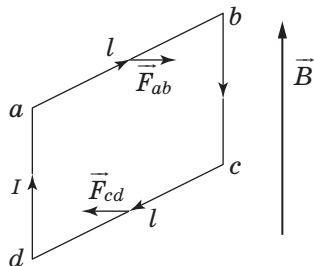
Прямоугольная рамка $abcd$ находится в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,1$ Тл. Плоскость рамки параллельна линиям $\vec{B}$. Длина сторон ab и cd $l = 5$ см. Найти силы, действующие на эти стороны, если в рамке начинает течь ток $I = 0,2$ А. Как в этом случае расположится рамка относительно направления силовых линий поля $\vec{B}$?

► Решение.

На отрезок проводника с током, согласно (3.45), действует сила Ампера:

$$F_{ab} = F_{cd} = IlB.$$

Под действием этой пары сил рамка повернётся, а её плоскость расположится перпендикулярно силовым линиям магнитного поля так, что направление тока в рамке и направление вектора $\vec{B}$ будут связаны правилом правого винта — при вращении винта по направлению тока он движется в направлении вектора $\vec{B}$.



► Ответ. $F_{ab} = F_{cd} = 10^{-3}$ Н.

3.3.4. Сила взаимодействия двух параллельных проводников.

Единица силы тока — ампер

определения и основные формулы

- **Сила взаимодействия** двух параллельных прямолинейных проводников, по которым текут токи I_1 и I_2 , приходящаяся на единицу длины проводников l :

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I_1 I_2}{R}, \quad (3.46)$$

где R — расстояние между ними.

Подробное объяснение

Пусть токи I_1 и I_2 текут в одном направлении по двум параллельным длинным проводникам, расстояние между которыми R много меньше их длины (рис. 3.34).

Индукция B_1 магнитного поля, созданного током I_1 на линии расположения второго проводника, согласно (3.42),

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi R}.$$

Согласно (3.45), на отрезок проводника длиной l действует сила

$$F_{21} = I_2 B_1 l = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi R}. \quad (3.47)$$

Сила F_{12} , действующая на первый проводник со стороны второго, как легко видеть, выражается этой же формулой. Эта сила пропорциональна каждому из токов в проводниках и обратно пропорциональна расстоянию между ними.

Формула (3.47) позволяет принципиально определить единицу силы тока. В системе СИ — это ампер.

1 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 $I = 1$ А, $R = 1$ м.

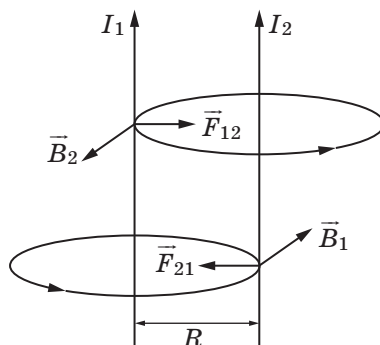


рис. 3.34

Единица заряда *кулон* — производная от ампера:

1 Кл — *величина заряда, который проходит через поперечное сечение проводника за 1 с, когда по этому проводнику течёт ток силой в 1 А.*

3.3.5. Движение заряженных частиц в магнитном поле. Принцип работы циклотрона

определения и основные формулы

- **Радиус окружности**, по которой движется заряженная частица в однородном магнитном поле B :

$$R = \frac{mv}{qB}, \quad (3.48)$$

где m — масса частицы,

q — её заряд,

v — скорость частицы.

- **Период обращения** частицы по окружности:

$$T = \frac{2\pi m}{qB}. \quad (3.49)$$

Единицы измерения

- Радиус окружности измеряется в **метрах**:

$$[R] = \text{м}.$$

- Масса измеряется в **килограммах**:

$$[m] = \text{кг}.$$

- Период измеряется в **секундах**:

$$[T] = \text{с}.$$

Подробное объяснение

Рассмотрим движение частицы массой m и зарядом q в постоянном однородном магнитном поле $\vec{B}$. Линии магнитной индукции перпендикулярны плоскости чертежа и вектору скорости частицы $\vec{v}$ и направлены за чертёж (рис. 3.35). Частица движется по окружности, поскольку действующая на неё сила Лоренца в каждой точке траектории перпендикулярна скорости, постоянна по величине и является, таким образом, центростремительной силой:

$$F_{\text{ц}} = F_{\text{л}} = qvB.$$

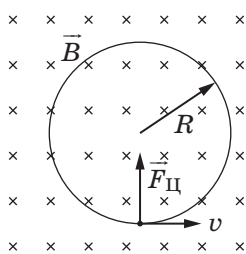


рис. 3.35

Радиус этой окружности R можно найти, приравняв выражения для этих сил:

$$\frac{mv^2}{R} = qvB,$$

откуда следует (3.48).

Радиус окружности уменьшается с увеличением индукции магнитного поля B и возрастает пропорционально скорости частицы.

Период обращения частицы по окружности (3.49), т. е. время, за которое она совершает один оборот, найдём, разделив длину окружности на её скорость:

$$T = \frac{2\pi R}{v}.$$

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. Принципиальная схема циклотрона приведена на рис. 3.36.

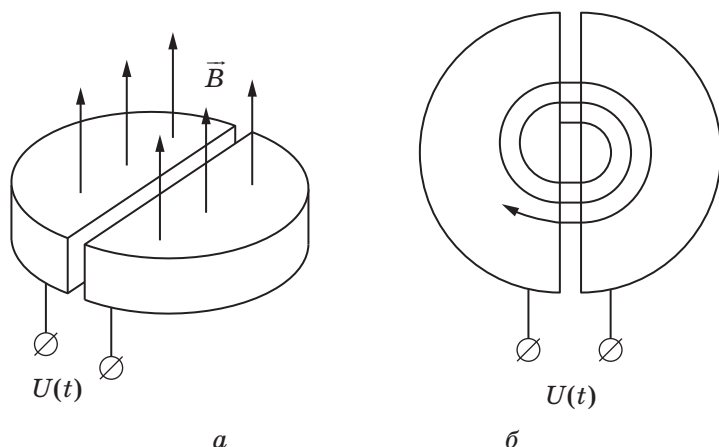


рис. 3.36

В вакуумную камеру, в которой движутся ускоряемые частицы, помещён полый металлический цилиндр, разрезанный по диаметру на две одинаковые части, называемые *дуантами*. Переменное напряжение, приложенное к дуантам, создаёт в промежутке между ними электрическое поле напряжённостью

$$E(t) = E_0 \cos \frac{2\pi}{T_E} t,$$

где T_E — период его изменения.

В центре вакуумной камеры находится источник заряженных частиц — положительных ионов. Под действием электрического поля частицы приобретают некоторую скорость и попадают внутрь одного из дуантов. Внутри дуантов электрическое поле отсутствует, а магнитное поле, направленное вертикально, заставляет частицы двигаться по окружности. Пройдя половину окружности, частицы вновь оказываются в промежутке между дуантами, но движутся в обратном направлении. Если период изменения электрического поля T_E равен периоду обращения частиц по окружности T , то электрическое поле в момент прихода частиц в этот промежуток изменяет своё направление на противоположное и снова подталкивает частицы, увеличивая их скорость. С увеличением скорости увеличивается и радиус окружности, по которой движутся частицы, поэтому траекторией частиц в магнитном поле будет плоская спираль.

Достоинство циклического ускорителя заключается в том, что с помощью сравнительно невысокого напряжения, приложенного к дуантам, можно разогнать частицы до больших энергий. Однако при скоростях движения, сравнимых со скоростью света c , проявляется релятивистский эффект — возрастание массы ускоряемых частиц с увеличением скорости:

$$m' = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

что, согласно (3.49), приводит к увеличению периода их обращения по окружности. Чтобы сохранить этот период неизменным, нужно соответствующим образом увеличить индукцию магнитного поля B . Ускорители, в которых это осуществляется, называются *синхротронами*. Можно также для сохранения синхронизации частоты обращения частиц по окружности и частоты ускоряющего напряжения изменять эту частоту (*фазотроны*) или делать то и другое одновременно. В последнем случае ускорители носят название *синхрофазотронов*.

Вакуумная камера первого циклотрона, построенного в 1931 г. Лоуренсом в Америке, имела диаметр 30 см. В современных ускорителях частицы движутся внутри тороидальной камеры диаметром в сотни метров, поперечник которой — несколько метров. Ускорители используются для исследований в области физики элементарных частиц и для получения искусственных химических элементов, находящихся в конце таблицы Менделеева.

Примеры решения задач

ОГЭ

В направлении, перпендикулярном линиям индукции, влетает в магнитное поле электрон со скоростью $v = 10^7$ м/с. Найти индукцию поля B , если электрон описал окружность радиусом $R = 1$ см.

► Решение.

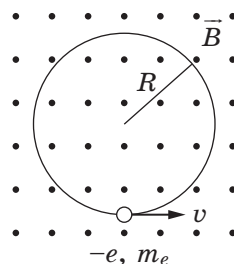
В однородном магнитном поле электрон движется по окружности, радиус которой, согласно (3.48),

$$R = \frac{m_e v}{eB},$$

где m_e — масса электрона, e — его заряд. Отсюда индукция магнитного поля

$$B = \frac{m_e v}{eR}.$$

► Ответ. $B = 5,7 \cdot 10^{-3}$ Тл.



ЕГЭ

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?

► Решение. Скорость протона найдём из уравнения (1.37):

$$\frac{m_p v^2}{2} = K,$$

откуда $v = \sqrt{\frac{2K}{m_p}}.$

Подставляя в (3.48), получим

$$R = \frac{\sqrt{2m_p K}}{eB}.$$

Частота его обращения по окружности, как следует из 1.1.4,

$$n = \frac{v}{2\pi R} = \frac{eB}{2\pi m_p}.$$

► Ответ. $R = 3,6$ см; $n = 1,5 \cdot 10^6$ об/с.

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.

В настоящем разделе мы рассмотрим опыты, которые привели Фарадея к его открытию, сформулируем закон электромагнитной индукции и обсудим следствия из него, в частности явление самоиндукции; введём понятие индуктивности проводника и выясним его роль в процессах, связанных с изменением магнитного поля, в котором находится проводник.

3.4.1. Явление электромагнитной индукции. Опыты Фарадея

определения и основные формулы

- ▮ **Явление электромагнитной индукции** — возникновение электрического тока в замкнутом проводнике при изменении магнитного поля, в котором он находится.

Подробное объяснение

Суть явления электромагнитной индукции можно пояснить несколькими простыми опытами.

Первый опыт заключается в следующем. Катушку из провода соединяют с гальванометром — прибором, измеряющим ток, — и они образуют замкнутую цепь (рис. 3.37). Внутри катушки вносят постоянный магнит. Во время его движения стрелка прибора отклоняется, показывая, что в цепи течёт электрический ток. При выдвигении магнита стрелка отклоняется в противоположную сторону, указывая на обратное направление тока.

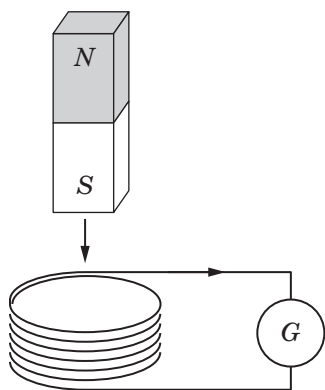


рис. 3.37

Те же явления происходят, если вместо постоянного магнита использовать соленоид, который, как мы знаем, тоже создаёт магнитное поле.

Ток в цепи, составленной из катушки и гальванометра, возникает и в том случае,

если катушку быстро повернуть, изменив её ориентацию относительно магнитного меридиана Земли.

Во всех трёх случаях наблюдается общая закономерность — ток возникает только в тот момент, когда изменяется взаимное расположение источника магнитного поля (постоянного магнита, соленоида или Земли) и приёмника — катушки, которая в соединении с гальванометром играет роль источника тока в замкнутой цепи.

Постоянный магнит и соленоид создают вокруг себя неоднородное магнитное поле, поэтому перемещение их в катушке-приёмнике равносильно изменению магнитного поля, в котором она находится. Поворот катушки с точки зрения наблюдателя, связанного с самой катушкой, можно рассматривать как изменение направления магнитного поля Земли относительно катушки. Чем быстрее изменяется поле, тем больше амплитудное значение тока. Во всех трёх опытах, образно говоря, изменяется число линий магнитного поля, охватываемых витками катушки.

Ток в цепи возникает под действием ЭДС, созданной в катушке переменным магнитным полем. Этот ток называется *индукционным*, а его возникновение — *явлением электромагнитной индукции*.

3.4.2. Закон Фарадея. Магнитный поток

определения и основные формулы

- **Магнитный поток** через площадку ΔS :

$$\Delta\Phi = B\Delta S \cos \alpha, \quad (3.50)$$

где B — модуль вектора магнитной индукции,

α — угол между вектором $\vec{B}$ и нормалью к площадке $\vec{n}$.

- **Закон электромагнитной индукции Фарадея.** ЭДС индукции, возникающая в замкнутом контуре, численно равна взятой с обратным знаком скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур:

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (3.51)$$

- **ЭДС индукции в прямом проводнике**, движущемся в магнитном поле в направлении, перпендикулярном проводнику и вектору $\vec{B}$:

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = Blv, \quad (3.52)$$

где l — длина проводника,

v — его скорость.

Единицы измерения

► Единица измерения магнитного потока — **вебер**:

$$[\Phi] = \text{Вб} = \text{Тл} \cdot \text{м}^2.$$

► ЭДС измеряется в **вольтах**:

$$[\mathcal{E}_{\text{инд}}] = \text{В}.$$

Подробное объяснение

Рассмотрим механизм возникновения ЭДС индукции. Возьмём контур L в виде прямоугольной проводящей рамки, одна из сторон которой — перемычка длиной l — перемещается вдоль оси X парал-

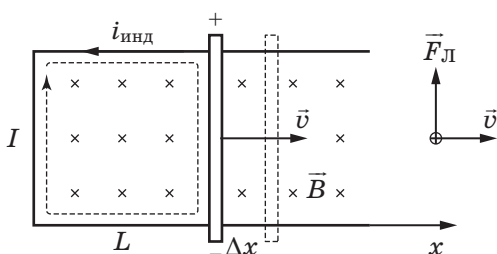


рис. 3.38

лельно самой себе со скоростью v , сохраняя электрический контакт с двумя другими сторонами рамки (рис. 3.38). Контур находится в магнитном поле, вектор магнитной индукции $\vec{B}$ которого перпендикулярен плоскости контура и направлен за плоскость чертежа.

При движении перемычки имеющиеся в ней свободные заряды — носители тока — движутся вместе с перемычкой и испытывают действие силы Лоренца $F_{\text{Л}} = qvB$, в результате чего заряды смещаются вдоль перемычки и на её концах возникает разность потенциалов. Движущаяся перемычка выступает в роли источника тока в контуре L . Роль сторонней силы играет сила Лоренца. Напряжённость созданного ею электрического поля

$$E_{\text{стор}} = \frac{F_{\text{Л}}}{q} = vB.$$

Разность потенциалов на концах перемычки, т. е. ЭДС индукции,

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = E_{\text{стор}} l = Blv. \quad (3.53)$$

Эта формула записана по аналогии с формулой (3.12), связывающей напряжённость однородного электрического поля с разностью потенциалов между двумя его точками. Мы получили её в частном случае, когда причиной возникновения ЭДС индукции является изменение площади контура. Чтобы обобщить её на другие случаи, вводится понятие *магнитного потока*. Понятие потока вектора возникло в гидродинамике — разделе физики, изучающем движение жидкости.

Пусть жидкость движется со скоростью v и протекает через малую площадку площадью ΔS , служащую одним из оснований косого цилиндра (рис. 3.39). Вектор $\vec{n}$ — единичный вектор нормали к площадке. Образующие цилиндра параллельны вектору $\vec{v}$, α — угол между этими векторами. Длина цилиндра численно равна произведению vt — расстоянию, которое жидкость проходит за время t .

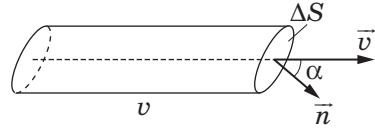


рис. 3.39

За $t = 1$ с через площадку протекает столько жидкости, сколько её заключено в цилиндре длиной v :

$$\Delta V = v \cdot \Delta S \cos \alpha.$$

Потоком вектора $\vec{v}$ через площадку ΔS называется объём жидкости, протекающей через неё за единицу времени.

По аналогии, хотя в магнетизме никакого реального движения не происходит, говорят о потоке вектора магнитной индукции $\vec{B}$, определяемом равенством (3.50).

Поскольку скорость движения перемычки $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$, «замечаемая» ею за время Δt площадь $\Delta S = l \cdot \Delta x$ (рис. 3.38), а магнитный поток через эту площадь $\Delta \Phi = B \Delta S$, уравнение (3.53) можно привести к виду

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad (3.54)$$

Чтобы учесть направление ЭДС, совпадающее с направлением индукционного тока $i_{\text{инд}}$, указывают направление обхода контура, которое связывают с направлением вектора $\vec{B}$ правилом правого винта — винт, вращающийся по направлению обхода, движется вдоль вектора $\vec{B}$. В нашем случае обход контура L происходит по часовой стрелке (на рис. 3.38 направление обхода обозначено пунктирной линией со стрелкой). Поскольку индукционный ток $i_{\text{инд}}$ имеет противоположное направление, в правой части (3.54) следует поставить знак «минус» и мы приходим к уравнению (3.51), выражающему закон электромагнитной индукции Фарадея.

Изменение магнитного потока, согласно (3.50), может происходить благодаря изменению модуля $\vec{B}$, площади контура ΔS 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.

Примеры решения задач



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.

- Решение. Разность потенциалов между концами крыльев самолёта найдём по формуле (3.52):

$$U = \mathcal{E}_{\text{инд}} = Blv.$$

- Ответ. $U = 0,55$ В.



На соленоид длиной $l = 20$ см и площадью поперечного сечения $S = 30$ см² 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.

- Решение. Согласно (3.54), ЭДС индукции, возникающая в витке, равна изменению магнитного потока, пронизывающего виток, за единицу времени:

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (1)$$

Магнитный поток изменяется от своего первоначального значения до нуля, т. е.

$$\Delta\Phi = \Phi,$$

где, согласно (3.50),

$$\Phi = B \cdot S. \quad (2)$$

Индукцию поля B в соленоиде найдём по формуле (3.43):

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I. \quad (3)$$

Подставляя (3) и (2) в (1), найдём

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = \mu_0 \frac{NS}{l \cdot \Delta t} \cdot I.$$

- Ответ. $\mathcal{E}_{\text{инд}} = 0,018$ В.



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.

- Решение. В каждом витке соленоида при изменении внешнего магнитного поля, согласно (3.51), индуцируется ЭДС

$$\mathcal{E}_1 = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Поскольку число витков соленоида N , суммарная ЭДС

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = N \cdot \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Delta t}.$$

- Ответ. $\mathcal{E}_{\text{инд}} = 400 \text{ В}$.

3.4.3. Правило Ленца

определения и основные формулы

- **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**, возникающая в контуре, вращающемся в магнитном поле с угловой скоростью ω :

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{max}} \sin \omega t. \quad (3.55)$$

Единицы измерения

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

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

Подробное объяснение

Рассмотрим замкнутый проводящий контур L , находящийся в магнитном поле $\vec{B}$, которое изменяется со временем (рис. 3.40). Направление обхода контура, обозначенное стрелкой на контуре, связано с направлением вектора $\vec{B}$ правилом правого винта.

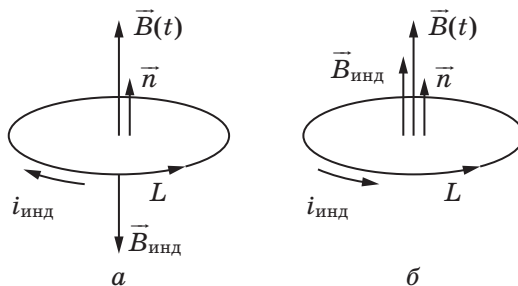


рис. 3.40

Пусть магнитное поле B возрастает. Тогда $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$ и ЭДС индукции, согласно (3.51), отрицательна: $\mathcal{E}_{\text{инд}} < 0$. Индукционный ток $i_{\text{инд}}$ в этом случае течёт в направлении, противоположном направлению обхода контура (рис. 3.40, а), а созданное им магнитное поле $\vec{B}_{\text{инд}}$ направлено против внешнего поля $\vec{B}$, т. е. препятствует его нарастанию.

Пусть теперь внешнее поле B убывает. При этом $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0$, $\mathcal{E}_{\text{инд}} > 0$, а индукционный ток $i_{\text{инд}}$ течёт в направлении обхода контура. Магнитное поле $\vec{B}_{\text{инд}}$, созданное индукционным током, направлено в ту же сторону, что и внешнее поле $\vec{B}$, и препятствует его убыванию (рис. 3.40, б).

Правило, определяющее направление индукционного тока, установлено опытным путём русским физиком Э. Х. Ленцем в 1833 г.

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 (рис. 3.41). Подобным образом изменяется и ток, возникающий в катушке вследствие явления электромагнитной индукции.

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. 3.42.

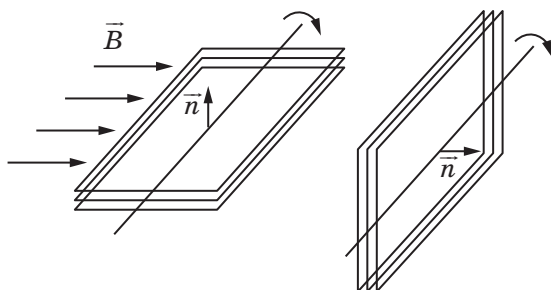


рис. 3.41

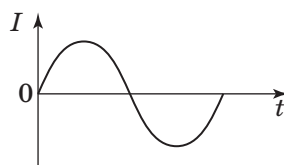


рис. 3.42

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.

3.4.4. Явление самоиндукции

Определения и основные формулы

- ▮ **Явление самоиндукции** — возникновения ЭДС индукции в проводнике, по которому течёт переменный ток.
- ▮ **Магнитный поток** через контур, образованный замкнутым проводником:

$$\Phi = LI, \quad (3.56)$$

где L — индуктивность проводника,
 I — сила тока в нём.

- ▮ **ЭДС самоиндукции**, возникающая в проводнике, по которому течёт ток I , изменяющийся со временем:

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (3.57)$$

- ▮ **Индуктивность** длинного соленоида:

$$L = \mu_0 n^2 V, \quad (3.58)$$

где $n = \frac{N}{l}$ — плотность его витков,

V — объём соленоида,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

- ▮ **Индуктивное сопротивление** проводника:

$$X_L = \omega L, \quad (3.59)$$

где $\omega = 2\pi\nu$ — циклическая частота тока в нём.

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**:

$$[X_L] = \text{Ом}.$$

Подробное объяснение

В замкнутом проводнике, находящемся в переменном магнитном поле, благодаря явлению электромагнитной индукции возникает индукционный ток. При этом магнитное поле может быть создано током, текущим по этому же проводнику. Если ток изменяется, изменяется и созданное им магнитное поле. В результате в проводнике появляется ЭДС, называемая *электродвижущей силой самоиндукции*.

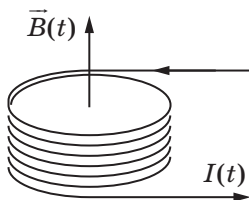


рис. 3.43

Чтобы её найти, возьмём катушку из N витков провода, в котором течёт изменяющийся во времени электрический ток $I(t)$ (рис. 3.43). Этот ток создаёт в катушке магнитное поле $B(t)$, которое тоже будет изменяться в соответствии с изменением тока.

Поскольку магнитный поток через катушку пропорционален индукции поля B , которая, в свою очередь, пропорциональна току I ($\Phi \sim B \sim I$), можно записать:

$$\Phi = LI.$$

Коэффициент пропорциональности L называется *индуктивностью* катушки.

Подставляя в (3.51), получим формулу (3.57) для ЭДС самоиндукции.

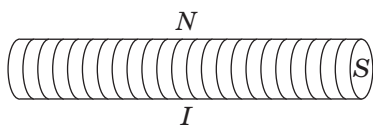


рис. 3.44

Формулы (3.56) и (3.57) справедливы для любого проводника. В качестве него возьмём длинный соленоид (рис. 3.44). ЭДС самоиндукции возникает в каждом из его витков. Суммарная ЭДС, согласно (3.51),

$$\mathcal{E}_c = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}, \quad (3.60)$$

где $\Phi = BS$, (S — площадь поперечного сечения соленоида), $B = \mu_0 \frac{N}{l} I$.

Подставляя в (3.60) и сравнивая полученную формулу с (3.57), видим, что индуктивность соленоида представляется выражением (3.58).

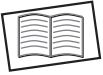
Индуктивность проводника зависит от его размеров и формы, а также магнитных свойств окружающего его вещества.

Индуктивность проводника составляет 1 Гн, если при изменении тока на 1 А за секунду в нём возникает ЭДС самоиндукции в 1 В.

Если ток в проводнике возрастает, ЭДС самоиндукции препятствует его нарастанию, если ток уменьшается — препятствует уменьшению.

Явление самоиндукции приводит к возникновению дополнительного сопротивления проводника переменному току. Наряду с активным (омическим) сопротивлением проводник приобретает *индуктивное сопротивление* (3.59).

Примеры решения задач



За какой промежуток времени Δt 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?

► Решение. ЭДС самоиндукции находится по формуле (3.57):

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (1)$$

где ΔI — изменение тока за время Δt .

Опуская знак «минус» и учитывая, что $\Delta I = I$, получим из (1)

$$\Delta t = \frac{LI}{\mathcal{E}_c}.$$

► Ответ. $\Delta t = 91,2$ с.



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.

► Решение. Индуктивность длинного соленоида, согласно (3.58),

$$L = \mu_0 \left(\frac{N}{l} \right)^2 V, \quad (1)$$

где $V = S \cdot l$ — объём соленоида.

По условию задачи,

$$l = N \cdot d. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), найдём

$$S = \frac{L \cdot d^2}{\mu_0 l}.$$

► Ответ. $S = 0,014$ м².

ЕГЭ

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.

► Решение. Полное сопротивление катушки складывается из омического сопротивления R и индуктивного сопротивления $X_L = 2\pi\nu \cdot L$ [см. формулу (3.59)]:

$$Z = R + 2\pi\nu \cdot L.$$

► Ответ. $Z = 70$ Ом.

3.4.5. Вихревые токи, или токи Фуко

определения и основные формулы

► **Токи Фуко** — вихревые индукционные токи, возникающие в массивном проводнике, находящемся в переменном магнитном поле.

Подробное объяснение

Токи Фуко возникают в переменном магнитном поле 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. 3.45), резко останавливается при включении магнитного поля.

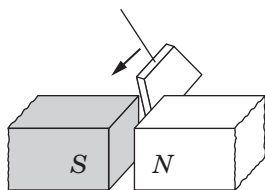


рис. 3.45

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, разделённых слоями изолятора, препятствующего развитию больших индукционных токов, а сами пластины изготавливают из сплавов, имеющих высокое удельное сопротивление.

3.4.6. Энергия магнитного поля

Определения и основные формулы

- **Энергия магнитного поля**, запасённая в катушке индуктивностью L :

$$W_{\text{м}} = \frac{LI^2}{2}, \quad (3.61)$$

где I — сила тока в катушке.

- **Энергия магнитного поля**, заключённого в единице объёма:

$$w_{\text{м}} = \frac{W_{\text{м}}}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0}, \quad (3.62)$$

где B — модуль вектора магнитной индукции.

Единицы измерения

- Энергия магнитного поля измеряется в джоулях:

$$[W_{\text{м}}] = \text{Дж.}$$

Подробное объяснение

Явление самоиндукции можно наблюдать на простом опыте. Воспользуемся схемой, изображённой на рис. 3.46. Лампа накаливания L и последовательно соединённая с ней катушка индуктивностью L с помощью переключателя Π подключаются к источнику тока, образуя замкнутую цепь (переключатель Π переводится в положение 1). Нарастание тока в цепи происходит постепенно, т. к. наряду с ЭДС источника $\mathcal{E}$ действует обратная по направлению электродвижущая сила самоиндукции $\mathcal{E}_s$, возникающая в катушке. Лампа загорается в течение некоторого времени, тем большего, чем больше индуктивность катушки.

Переводя переключатель Π в положение 2, мы образуем ту же замкнутую цепь, но без источника тока. В момент его

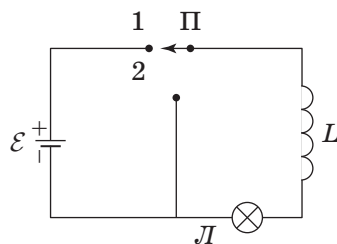


рис. 3.46

отключения направление ЭДС самоиндукции совпадает с направлением ЭДС источника, и она будет некоторое время поддерживать ток в цепи. Если индуктивность катушки L достаточно велика, $\mathcal{E}_c$ может превысить $\mathcal{E}$ источника тока. Тогда лампа на мгновение вспыхнет более ярким светом. В сложных радиосхемах, содержащих катушки индуктивности, это может привести к выходу их из строя. Чтобы избежать этого, принимают специальные меры, в частности поэтапное отключение отдельных блоков радиоэлектронной аппаратуры.

На рис. 3.47 приведены графики изменения тока со временем при замыкании и размыкании цепи при двух значениях индуктивности. Графики проясняют смысл индуктивности как меры инертности электрической цепи по отношению к изменению тока в ней. Нарастание и спад тока будут тем более плавными, чем больше индуктивность катушки.

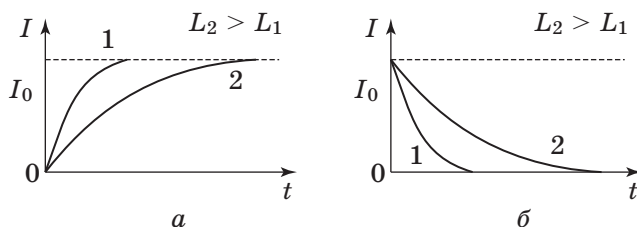


рис. 3.47

Работа источника тока при замыкании цепи частично идёт на создание в катушке магнитного поля, энергия которого расходуется на поддержание тока при её размыкании.

Энергия магнитного поля, запасённая в катушке, выражается формулой (3.61).

Эта формула аналогична формуле кинетической энергии тела массой m , если массу в ней заменить индуктивностью, а скорость тела v — силой тока. Индуктивность проводника в электродинамике — аналог массы тела в механике, аналогом скорости служит сила тока в проводнике. Энергия магнитного поля катушки с током имеет смысл кинетической энергии носителей заряда, создающих в ней электрический ток.

Энергию магнитного поля можно выразить через индукцию магнитного поля B . Используем для этого формулы, полученные для соленоида. Согласно (3.43), сила тока в соленоиде связана с индукцией соотношением $I = \frac{B}{\mu_0 n}$. Подставляя его и индуктивность со-

ноида L в (3.61), получим

$$W_{\text{м}} = \frac{B^2}{2\mu_0} V,$$

где V — объём соленоида. Разделив на V , найдём объёмную плотность энергии магнитного поля (3.62).

Примеры решения задач

ОГЭ

Обмотка электромагнита имеет сопротивление $R = 10$ Ом, индуктивность $L = 0,2$ Гн и находится под напряжением. В течение какого времени Δt в обмотке выделится количество теплоты Q , равное энергии магнитного поля $W_{\text{м}}$ в сердечнике?

► Решение. Воспользуемся формулами (3.37) и (3.61). Приравняв их правые части, получим

$$I^2 R t = \frac{1}{2} L I^2,$$

откуда

$$t = \frac{L}{2R}.$$

► Ответ. $t = 0,01$ с.

ЕГЭ

Найти энергию магнитного поля соленоида, в котором при силе тока $I = 10$ А возникает магнитный поток $\Phi = 0,5$ Вб.

► Решение. Энергия магнитного поля соленоида, согласно (3.61),

$$W_{\text{м}} = \frac{L I^2}{2}. \quad (1)$$

Чтобы найти индуктивность соленоида L , воспользуемся формулой (3.56):

$$\Phi = L I. \quad (2)$$

Тогда (1) с учётом (2) приобретает вид

$$W_{\text{м}} = \frac{1}{2} \Phi I.$$

► Ответ. $W_{\text{м}} = 2,5$ Дж.

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*.

Классическая электродинамика явилась одним из высших достижений человеческого разума. Она оказала огромное влияние на последующее развитие человеческой цивилизации, предсказав существование электромагнитных волн. Это привело в дальнейшем к созданию радио, телевидения, телекоммуникационных систем, спутниковых средств навигации, а также компьютеров, промышленных и бытовых роботов и прочих атрибутов современной жизни.

В настоящем разделе мы рассмотрим электромагнитные колебания, возникающие в колебательном контуре, свойства электромагнитного поля и способы излучения и приёма электромагнитных волн, которые использовали их первые исследователи.

3.5.1. Электрический колебательный контур

определения и основные формулы

- **Электрический колебательный контур** — замкнутая цепь, состоящая из конденсатора и катушки индуктивности.
- **Электромагнитные колебания** — периодические изменения заряда конденсатора и тока в цепи:

$$q(t) = q_0 \cos \omega t, \quad (3.63, a)$$

$$I(t) = I_0 \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (3.63, б)$$

где q_0 — начальный заряд конденсатора,

$I_0 = \omega q_0$ — амплитудное значение тока,

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ — циклическая частота колебаний.

- **Период электромагнитных колебаний** в колебательном контуре:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}, \quad (3.64)$$

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**:

$$[C] = \text{Ф}.$$

Подробное объяснение

Рассмотрим *колебательный контур*, состоящий из конденсатора ёмкостью C и катушки индуктивностью L (рис. 3.48). Если сообщить конденсатору заряд, а затем замкнуть ключ K , то конденсатор начнёт разряжаться и по цепи потечёт изменяющийся со временем 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*.

Электромагнитные колебания в контуре аналогичны колебаниям маятника. Отклонённый от положения равновесия маятник благодаря инерции проходит положение равновесия и отклоняется в обратную сторону (рис. 3.49). Затем он снова начинает движение и возвращается в исходное положение. При колебаниях маятника его потенциальная энергия в крайнем левом положении переходит в кинетическую энергию в нижней точке, которая, в свою очередь, переходит в потенциальную энергию в крайнем правом положении.

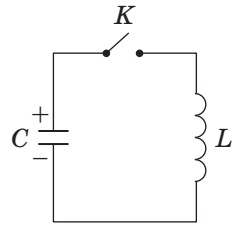


рис. 3.48

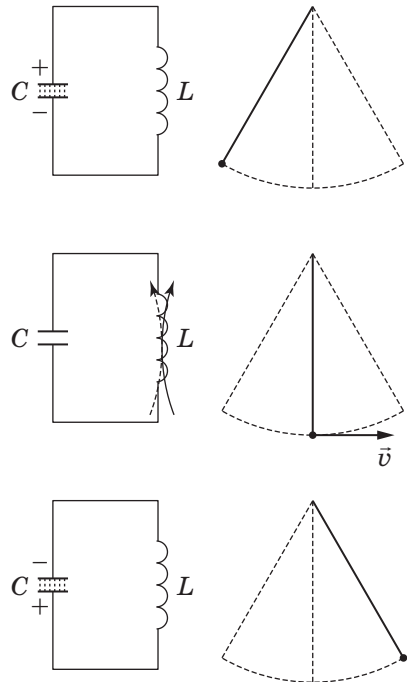


рис. 3.49

Аналогично в колебательном контуре первоначальный запас энергии электрического поля заряженного конденсатора преобразуется в энергию магнитного поля катушки с током, которая затем снова преобразуется в энергию заряженного конденсатора. На рис. 3.49 наличие электрического и магнитного полей показано пунктирными линиями и иллюстрирует указанную аналогию. Из этого сравнения видно, что катушка индуктивности играет роль инертной массы в механике, о чём уже говорилось в разделе 3.4.6.

Первоначальный запас энергии конденсатора, согласно (3.13),

$$W = \frac{q_0^2}{2C}. \quad (3.65)$$

Согласно (3.61), максимальное значение энергии катушки с током

$$W_m = \frac{LI_0^2}{2}. \quad (3.66)$$

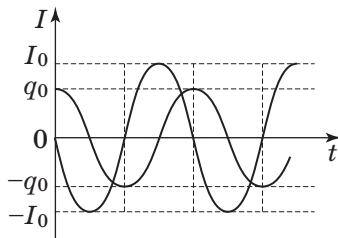


рис. 3.50

Графики зависимости от времени силы тока в цепи I и заряда конденсатора q (рис. 3.50) сдвинуты друг относительно друга на четверть периода. Заряд конденсатора приобретает максимальное значение, когда ток в цепи становится равным нулю, и, наоборот, ток максимален, когда заряд равен нулю.

Приравнявая амплитудные значения энергии конденсатора (3.65) и энергии катушки (3.66) и учитывая, что $\omega = \frac{2\pi}{T}$, получим формулу для периода электромагнитных колебаний в колебательном контуре (3.64). Она называется *формулой Томсона*.

В реальном колебательном контуре колебания будут затухающими, поскольку катушка и подводящие провода обладают сопротивлением и запасённая в контуре энергия постепенно превращается в тепло.

Процессы, протекающие в колебательном контуре, дают нам пример превращения энергии электрического поля в энергию магнитного поля и обратно.

Описанные электромагнитные колебания являются *свободными*. Можно осуществить *вынужденные колебания* — подобно рассмотренным в 1.5.4 механическим колебаниям. Для этого на обкладки конденсатора подают переменное напряжение или катушку помещают в переменное магнитное поле. Закономерности вынужденных

колебаний здесь те же, что и в случае механических колебаний. В частности, наблюдается *явление резонанса* — амплитуда колебаний тока в цепи резко возрастает при совпадении частоты приложенного напряжения с частотой собственных колебаний колебательного контура. Это явление используется при настройке радиоприёмников на частоту передающей станции, обычно осуществляемой путём изменения ёмкости конденсатора.

Примеры решения задач



Какой величины индуктивность надо включить в колебательный контур, чтобы при ёмкости конденсатора $C = 50$ пФ получить частоту свободных колебаний $\nu = 10$ МГц?

- Решение. Воспользуемся формулой (3.64), из которой следует

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

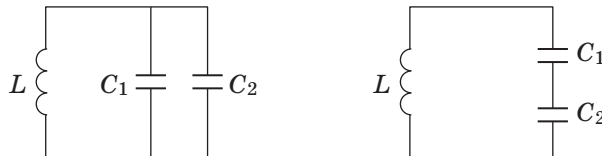
Отсюда найдём

$$L = \frac{1}{4\pi^2\nu^2 C}.$$

- Ответ. $L = 5,1$ мкГн.



Колебательный контур состоит из катушки и двух одинаковых конденсаторов, включённых параллельно. Во сколько раз изменится частота собственных колебаний, если эти конденсаторы включить последовательно?



- Решение.

Согласно (3.64), периоды колебаний в колебательных контурах (см. рисунок)

$$T_1 = 2\pi\sqrt{LC_{\text{пар}}}, \quad T_2 = 2\pi\sqrt{LC_{\text{посл}}}, \quad (1)$$

где, согласно (3.15) и (3.16),

$$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2 = 2C, \quad (2)$$

$$C_{\text{посл}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{C}{2}. \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в (1) и учитывая, что $\nu = \frac{1}{T}$, найдём

$$\frac{\nu_2}{\nu_1} = \frac{T_1}{T_2} = \sqrt{\frac{C_{\text{пар}}}{C_{\text{посл}}}} = 2.$$

► Ответ. Частота колебаний возрастает в 2 раза.

ЕГЭ

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.

► Решение. Энергия электромагнитных колебаний в колебательном контуре

$$W = \frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2} = \frac{CU_m^2}{2}, \quad (1)$$

где U и I — текущие значения напряжения на конденсаторе и тока в катушке.

Амплитудные значения энергии конденсатора и катушки индуктивности равны друг другу

$$\frac{CU_m^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}. \quad (2)$$

Отсюда найдём

$$\frac{C}{L} = \left(\frac{I_m}{U_m} \right)^2. \quad (3)$$

Выражая I из уравнения (1) с учётом (3), получим

$$I = \frac{I_m}{U_m} \sqrt{U_m^2 - U^2}.$$

► Ответ. $I = 1,96$ мА.

3.5.2. Электромагнитное поле

определения и основные формулы

- **Электромагнитное поле** — совокупность порождающих друг друга переменного электрического и переменного магнитного полей.
- **Электромагнитная волна** — форма существования электромагнитного поля.

► Скорость электромагнитной волны в вакууме:

$$c = \lambda \cdot \nu, \quad (3.67)$$

где λ — длина волны,
 ν — её частота.

Подробное объяснение

Формулируя закон электромагнитной индукции, мы рассматривали замкнутый проводящий контур, в котором в переменном магнитном поле возникает ЭДС индукции и течёт индукционный ток. При этом источник ЭДС был равномерно распределён по всему контуру, а линии напряжённости созданного им переменного электрического поля внутри проводника — замкнуты, подобно линиям магнитного поля. Такое поле называется *вихревым*. Максвелл предположил, что вихревое электрическое поле возникает в пространстве всегда, когда там есть переменное магнитное поле, а проводящий контур служит лишь инструментом, позволяющим его обнаружить.

Краеугольным камнем теории Максвелла явилось утверждение, что источником магнитного поля может служить одно только переменное электрическое поле, подобно тому, как источником электрического поля, создающим в проводнике индукционный ток, служит переменное магнитное поле. Электрическое и магнитное поля равноправны. Их совокупность называется *электромагнитным полем*.

Электромагнитное поле существует в виде *электромагнитной волны* и распространяется в пространстве со скоростью света, которая в вакууме составляет 300 000 км/с.

Электромагнитная волна поперечна. Колебания совершает вектор напряжённости электрического поля $\vec{E}$ и вектор магнитной индукции $\vec{B}$. Оба они перпендикулярны направлению распространения волны (вектору скорости $\vec{v}$) и лежат во взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 3.51).

Такая их взаимная ориентация — природное свойство волны, не зависящее от выбора системы координат.

Плоскость, в которой колеблется вектор $\vec{E}$, называется *плоскостью поляризации*, а перпендикулярная к ней плоскость, в которой колеблется вектор $\vec{B}$, — *плоскостью колебаний*.

Сходство электромагнитных волн со световыми позволило предположить, что световые волны являются волнами электромагнитными. Впоследствии было установлено, что видимый свет, имеющий

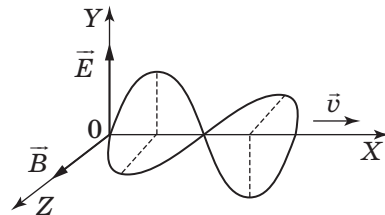


рис. 3.51

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 (рис. 3.52). Это инфракрасные и ультрафиолетовые лучи, испускаемые Солнцем, радиоволны, рентгеновские и гамма-лучи.

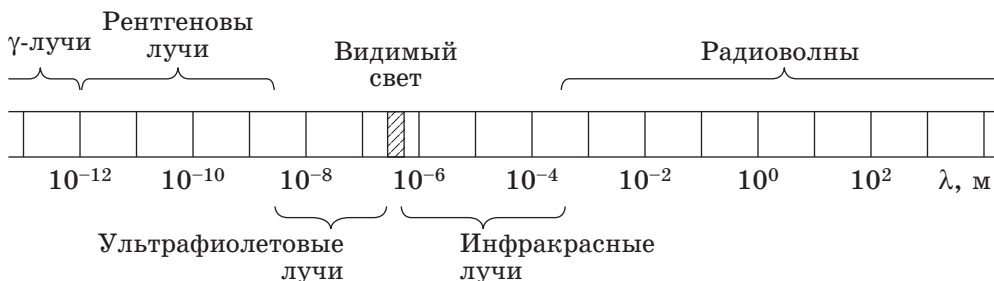


рис. 3.52

Примеры решения задач



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?

► Решение. Длина волны и её частота связаны друг с другом соотношением (3.67):

$$c = \lambda \cdot \nu = \frac{\lambda}{T}. \quad (1)$$

Длина волны, воспринимаемая радиоприёмником, с учётом (3.64),

$$\lambda = 2\pi c \sqrt{LC}.$$

Минимальная длина волны соответствует ёмкости конденсатора C_1 , максимальная — ёмкости C_2 .

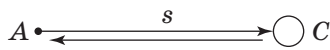
► Ответ. $\lambda_{\min} = 60$ м, $\lambda_{\max} = 188$ м.



На каком расстоянии s от антенны радиолокатора A находится объект C , если отражённый от него радиосигнал возвратился обратно через промежуток времени $\tau = 200$ мкс?

► Решение.

Скорость радиоволны, излучённой радиолокатором, равна $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Поэтому время τ , за которое радиосигнал проходит путь $2s$ — туда и обратно, — согласно (3.67),



$$\tau = \frac{2s}{c},$$

откуда

$$s = \frac{c\tau}{2}.$$

- Ответ. $s = 30$ км.



Каким может быть максимальное число импульсов, испускаемых радиолокатором за время $t = 1$ с, при разведывании цели, находящейся на расстоянии $s = 30$ км от него? (См. рисунок предыдущей задачи.)

- Решение. Расстояние s до объекта радиолокатора определяют по времени τ , прошедшему с момента излучения импульса радиоволн до момента приёма отражённого импульса:

$$\tau = \frac{2s}{c}.$$

Каждый следующий импульс не может быть отправлен раньше, чем придёт ответ на предыдущий. Поэтому максимальное число импульсов, излучённых за время t ,

$$N = \frac{t}{\tau} = \frac{ct}{2s}.$$

- Ответ. $N = 5000$.

3.5.3. Излучение электромагнитных волн. Опыты Герца

Определения и основные формулы

- **Открытый колебательный контур** — источник электромагнитных волн. В опытах Герца — это два разделённых промежутком соосных стержня, к которым приложено высокое напряжение.

Подробное объяснение

В колебательном контуре, рассмотренном в 3.5.1, происходит превращение энергии электрического поля заряженного конденсатора в энергию магнитного поля катушки и обратно — энергии магнитного поля катушки в энергию электрического поля конденсатора. Колебательный контур служит генератором электромагнитных колебаний. При этом электрическое и магнитное поля заключены соответственно внутри конденсатора и катушки. Чтобы получить

электромагнитную волну, нужно сделать колебательный контур открытым. Если развести обкладки конденсатора, как показано на

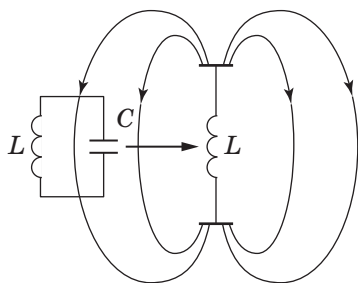


рис. 3.53

рис. 3.53, то переменное электрическое поле выйдет наружу и будет порождать в окружающем пространстве переменное магнитное поле. Открытый колебательный контур излучает электромагнитную волну.

Первые опыты по излучению и приёму электромагнитных волн поставил немецкий физик Генрих Герц в 80-х годах XIX века. Он использовал излучатель,

представляющий собой два металлических стержня, разделенных «искровым» промежутком (диполь Герца) (рис. 3.54). Такая система по сути является открытым колебательным контуром, поскольку обладает и ёмкостью и индуктивностью. К стержням присоединяются полюса источника высокого переменного напряжения — индуктора I . Когда напряжение источника достигает значения, достаточного для пробоя воздуха, между стержнями проскакивает искра. За время существования искры в колебательном контуре (стержнях) успевают произойти огромное число электромагнитных колебаний, энергия которых излучается в пространство в виде электромагнитной волны. Изображённые на рис. 3.54 катушки индуктивности L препятствуют прохождению высокочастотного тока по цепи индуктора, поскольку их сопротивление переменному току $X_L = \omega L$ очень велико.

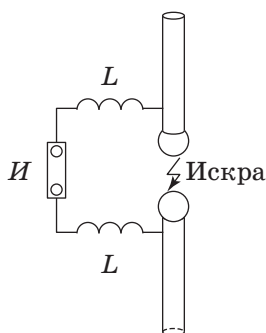


рис. 3.54

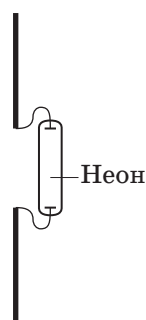


рис. 3.55

В качестве приёмника электромагнитных волн Герц использовал аналогичную систему из двух стержней, между которыми находилась стеклянная трубочка, заполненная инертным газом — неоном (рис. 3.55). Электрическое поле волны возбуждало в стержнях

электрический ток, который, проходя через трубку, вызывал свечение газа.

Герц изучал отражение электромагнитных волн от поверхности металлических экранов, их преломление и поляризацию и показал, что электромагнитная волна, подобно световой волне, является *поперечной*.

3.5.4. Давление электромагнитной волны. Опыты Лебедева по измерению давления света

определения и основные формулы

- **Давление** — отношение силы, действующей по нормали к поверхности, к площади этой поверхности:

$$p = \frac{F}{S}.$$

- **Давление электромагнитной волны:**

$$p = (1 + \rho)w, \quad (3.68)$$

где w — объёмная плотность энергии электромагнитного поля, ρ — коэффициент отражения от поверхности, на которую падает волна.

- **Энергия электромагнитного поля**, заключённого в единице объёма:

$$w = \frac{\varepsilon_0 E_0^2}{2}, \quad (3.69)$$

где E_0 — амплитудное значение напряжённости электрического поля.

Единицы измерения

- Давление измеряется в **паскалях**:

$$[p] = \text{Па} = \text{Н/м}^2.$$

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

$$[w] = \text{Дж/м}^3.$$

Подробное объяснение

При падении на поверхность какого-либо тела электромагнитная волна оказывает на неё давление. Чтобы показать это, рассмотрим плоскую волну, падающую на бесконечную проводящую плоскость, фрагмент которой в виде пластинки изображён на рис. 3.56.

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 $\vec{F}_A$. 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.

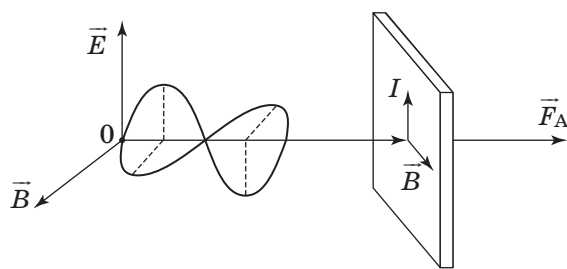


рис. 3.56

Расчёт давления по теории Максвелла приводит к выражению (3.68).

Коэффициент отражения показывает, какая часть энергии падающей на тело волны отражается от его поверхности:

$$\rho = \frac{W_{\text{отр}}}{W_{\text{пад}}}.$$

Для блестящего тела $\rho = 1$, для чёрного — $\rho = 0$.

В формулу (3.68) входит объёмная плотность энергии электромагнитного поля w . Она складывается из энергии электрического и энергии магнитного полей:

$$w = w_E + w_B = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (3.70)$$

(см. 3.1.7 и 3.4.6).

Можно показать, что средние значения этих величин в электромагнитной волне равны друг другу:

$$\bar{w}_E = \bar{w}_B = \frac{\varepsilon_0 E_0^2}{4},$$

где E_0 — амплитуда электрической составляющей волны.

Подставляя их в (3.70), получим формулу (3.69).

Давление света первым измерил русский физик П. Н. Лебедев в 1899 г. Это явилось прямым подтверждением электромагнитной теории света и способствовало окончательному утверждению теории Максвелла.

Давление света очень мало. В яркий солнечный день свет давит на один квадратный метр поверхности с силой, равной весу пухового перышка. Поэтому измерение давления света — очень трудная экспериментальная задача.

Прибор Лебедева для измерения этого давления представляет собой весьма чувствительные крутильные весы, состоящие из коромысла на упругой нити, к которому прикреплены два тонких кружочка (крылышка). Один из них блестящий, а второй — чёрный (рис. 3.57). Они находятся в баллоне, в котором создан глубокий вакуум. Свет падает на оба кружка, но большее давление оказывает на блестящий кружок. Поэтому коромысло поворачивается и закручивает нить на некоторый угол. Угол поворота отсчитывается по шкале, на которую падает луч света, отражённый от зеркала, соединённого с коромыслом (не показанного на рисунке). Зная упругость нити и измерив угол поворота, можно найти и силу давления.

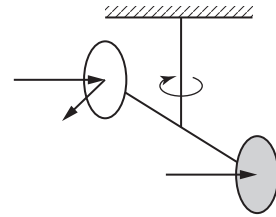


рис. 3.57

Простая идея опыта на практике сталкивается с большими экспериментальными трудностями. Так, при поглощении света крылышки нагреваются. Тепло, в свою очередь, передаётся молекулам газа, остающимся в баллоне. Поэтому давление газа на крылышки возрастает, причём этот «радиационный эффект» более сильный, чем измеряемое давление света. Использование очень тонких крылышек позволило его устранить, т. к. крылышки успевали прогреться и температура, а с нею и давление газа на обеих их поверхностях, были практически одинаковыми.

Результаты, полученные Лебедевым, совпали с теоретическим значением (3.68) с точностью до 20 %, что не превышало погрешности эксперимента. В 1907 г. Лебедеву удалось решить ещё более сложную задачу — измерить давление света на газы.

3.5.5. Изобретение радиотелеграфа А. С. Поповым в России

определения и основные формулы

- **Радиосвязь** — передача информации на расстояние при помощи электромагнитных волн.

Подробное объяснение

Излучение и приём электромагнитных волн, осуществлённые Г. Герцем в Германии, нашли практическое применение. В 1895 г. русский физик, преподаватель Минных офицерских классов в Кронштадте Александр Степанович Попов впервые продемонстрировал своё устройство, позволяющее передавать с помощью азбуки Морзе информацию без проводов. Это устройство называлось тогда беспроволочным телеграфом. Первая радиограмма, переданная на расстояние 250 м, содержала всего два слова: «Генрих Герц». Это произошло 7 мая 1895 г. на заседании Русского физико-химического общества.

А. С. Попов соединил передатчик Герца с телеграфным ключом, а в качестве приёмника использовал изобретённое им устройство, состоящее из двух стержней, которые использовал Герц, и стеклянной трубочки между ними, наполненной оксидированными железными опилками — *когерер* Бранли. Трубочка была включена в электрическую цепь, состоящую из источника постоянного тока и звонка (рис. 3.58). Покрытые окисью железные опилки имеют очень большое электрическое сопротивление, поэтому ток в цепи весьма мал. В момент прихода сигнала — электромагнитного импульса — опилки спекаются и сопротивление их падает. Звонки начинают звенеть, используя энергию источника тока в цепи. Чтобы выключить звонок, нужно встряхнуть трубочку и тем самым восстановить её начальное высокое сопротивление.

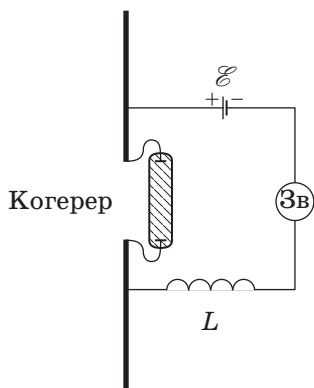


рис. 3.58

А. С. Попов использовал принцип отрицательной обратной связи. Он заставил молоточек звонка одновременно встряхивать и трубочку. Тогда поступивший в приёмник электромагнитный импульс вызывал кратковременный звуковой сигнал, а молоточек возвращал устройство в состояние готовности к приёму нового импульса. Так можно было передавать с помощью электромагнитных волн (радиоволн) телеграфные

сообщения. В дальнейшем А. С. Попов для повышения чувствительности приёмника впервые применил длинный провод, поднятый над землёй — *антенну*.

Одновременно с А. С. Поповым в России подобное изобретение было сделано Гульельмо Маркони в Италии. Маркони запатентовал своё изобретение, и оно получило широкое распространение в мире под его именем. Это были первые радиоприёмники, созданные человечеством. Дальнейшее развитие радиосвязи привело к созданию широкой сети радиопередающих станций и внедрению радиосвязи и телевидения в повседневную жизнь.

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.

Двойственная природа присуща не только электромагнитному полю — микрочастицы вещества при некоторых условиях могут проявлять и волновые свойства. Эти вопросы мы обсудим в следующей части нашего курса, посвящённой атомной физике.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Видимый свет — электромагнитное излучение, воспринимаемое глазом человека, длина волны которого лежит в пределах от 0,4 до 0,7 мкм.

Волновая природа света проявляется в явлениях интерференции и дифракции, которые находят широкое применение в науке, технике и быту.

Источники света — Солнце, Луна 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 далёких звёзд, несёт информацию об их движении и химическом составе.

Оптические квантовые генераторы — лазеры — созданы человеком в последние десятилетия в результате глубокого изучения свойств микромира.

Излучение лазеров обладает уникальными свойствами — высокой монохроматичностью и когерентностью, поэтому лазеры широко используются в научных исследованиях, технике и быту.

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

Определения и основные формулы

- ▶ **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.
- ▶ **Закон преломления света.** Лучи падающий, преломленный и нормаль к поверхности раздела сред лежат в одной плоскости, а углы их падения и преломления связаны соотношением:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{12}, \quad (4.1)$$

где α — угол падения,

β — угол преломления,

n_1 и n_2 — показатели преломления сред относительно вакуума,

n_{12} — показатель преломления второй среды относительно первой.

- **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 β превышает β_0 — значение, удовлетворяющее уравнению

$$\sin \beta_0 = \frac{1}{n}, \quad (4.3)$$

где n — показатель преломления среды.

Подробное объяснение

Длины волн видимого света очень малы в сравнении с размерами тел, встречающихся нам в повседневной жизни. Поэтому волновая природа света не проявляет себя, а характерным его свойством является прямолинейное распространение, на что указывает образование резких теней предметов, освещаемых точечными источниками света.

Луч света в воздухе или воде можно сделать видимым, если внести в их среду примесь в виде табачного дыма, капли молока или мыльного раствора. Наблюдение за ходом лучей становится удобным и позволяет выявить закономерности, которым они подчиняются. Сам луч света, исходящий от источника, например лампы накаливания, можно сделать тонким, воспользовавшись системой диафрагм — непрозрачных экранов с отверстиями или щелями.

Опыт показывает, что *в однородной среде луч света распространяется по прямой линии.*

Отклонения от этого закона наблюдаются в неоднородных средах. Например, лучи света, идущие с небосклона, искривляются в разогретом воздухе вблизи асфальта дороги настолько, что мы видим вблизи него полоску неба.

Световой луч — геометрическое понятие. Рассматривая распространение света в виде направленных лучей, мы пренебрегаем его волновой природой. Такое приближение упрощает задачу описания этого процесса и позволяет сформулировать правила, по которым можно решать практические задачи построения изображений

предметов, которые дают оптические приборы — линза, микроскоп, телескоп.

Самый простой случай — падение света на отражающую поверхность зеркала. Отражательная способность хорошо отполированных металлов очень высока — приближается к 100 %. Зеркала изготавливают, нанося слой металла на стеклянную поверхность.

Опытным путём установлен сформулированный выше *закон отражения света*, позволяющий строить изображения предметов в плоском зеркале. Иллюстрацией к нему служит рис. 4.1.

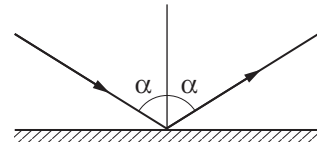


рис. 4.1

Изображение материальной точки A будет видно в точке A' за зеркалом, на продолжении произвольно взятых лучей 1 и 2 (рис. 4.2). Из равенства углов падения и отражения легко заключить, что эта точка находится на том же расстоянии от поверхности зеркала BC , что и точка A , если это расстояние откладывать вдоль нормали к нему.

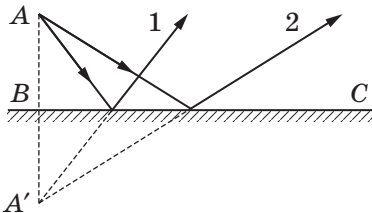


рис. 4.2

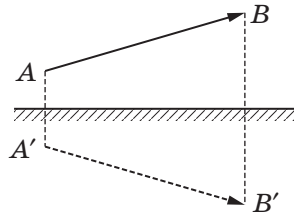


рис. 4.3

Оба рассмотренных изображения — точки A и отрезка AB — называются *мнимыми изображениями*, т. к. образуются на продолжении лучей за плоскость зеркала, где их фактически нет.

Опытным путём установлено также, что если луч света переходит через границу раздела двух прозрачных сред, то он изменяет своё направление — преломляется (рис. 4.4). При этом выполняется *закон преломления света* (4.1).

Относительный показатель преломления n_{12} имеет постоянное значение для

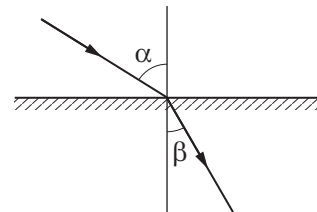


рис. 4.4

данных граничащих сред и не зависит от угла падения. Если первая среда — вакуум или воздух, он называется *абсолютным показателем преломления*.

Среда, обладающая бóльшим показателем преломления, называется *оптически более плотной*. При переходе в такую среду угол, составленный лучом и нормалью, уменьшается, при обратном переходе — увеличивается.

Оптические схемы, изображающие ход лучей при отражении и преломлении, сохраняют свой вид, если направления всех лучей изменить на противоположные. Это следует из обратимости хода лучей света, установленной экспериментально, — луч, идущий в обратном направлении, выбирает тот же путь, что и при прямом ходе.

При переходе света из среды в воздух (или оптически менее плотную среду) наблюдается явление *полного внутреннего отражения*. Из рис. 4.5 видно, что с увеличением угла β угол α тоже увеличивается и для некоторого значения β_0 должен составить 90° , т. е. луч должен пойти вдоль поверхности раздела сред. Однако в действительности он направляется во вторую среду, отразившись от этой поверхности зеркально (лучи 2 и 2' на рис. 4.5). Все лучи, идущие под углами, бóльшими β_0 , в первую среду не выходят.

Рисунок 4.6 иллюстрирует это явление. Точечный источник света S расположен под слоем воды на некоторой глубине. Наблюдатель, перемещаясь вдоль её поверхности от центра картины O вправо или влево, заметит «исчезновение» источника при переходе через точку A или A' .

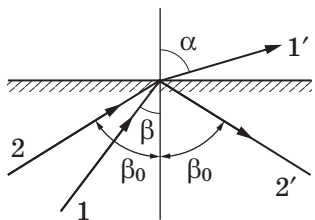


рис. 4.5

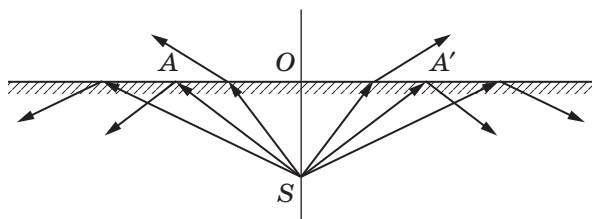


рис. 4.6

Угол полного внутреннего отражения β_0 для данного вещества относительно вакуума находится из уравнения (4.1), в котором нужно принять $\sin \alpha = 1$, $n_1 = 1$, что приводит к формуле (4.3).

Явление полного внутреннего отражения используется в поворотных (а) и обращающих (б) призмах, изображённых на рис. 4.7. Они более просты в изготовлении по сравнению с зеркалами, т. к. не требуют нанесения на стеклянную поверхность слоя металла

и отличаются стабильностью свойств, поскольку не подвержены влиянию атмосферного кислорода, окисляющего металл.

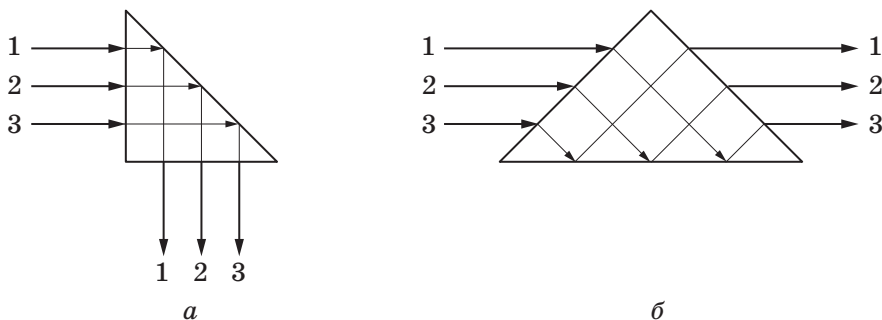


рис. 4.7

Примеры решения задач



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?

► Решение.

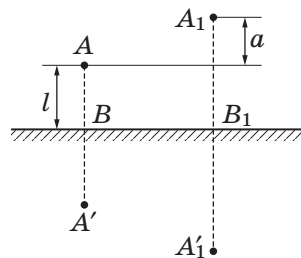
Расстояние от предмета до его изображения

$$AA' = 2AB = 2l.$$

Если расстояние от предмета до зеркала увеличить на a см, то, как видно из рисунка, расстояние AA' увеличится на $2a$ см:

$$A_1A'_1 = 2(l + a).$$

► Ответ. $A_1A'_1 = 30$ см.



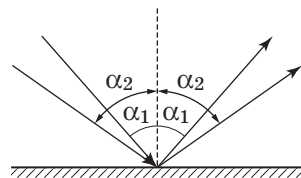
Угол падения луча на плоское зеркало увеличили от $\alpha_1 = 20^\circ$ до $\alpha_2 = 40^\circ$. Как изменился угол между падающим и отражённым лучами?

► Решение.

Угол между падающим и отражённым лучами равен удвоенному углу падения:

$$\theta = 2\alpha.$$

Тогда изменение этого угла



$$\Delta\theta = 2(\alpha_2 - \alpha_1).$$

► Ответ. Увеличился на $\Delta\theta = 40^\circ$.

ЕГЭ

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° ?

► Решение.

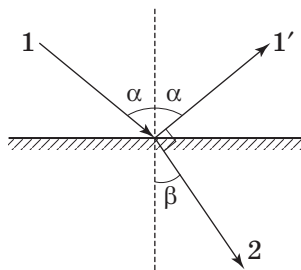
Согласно (4.1),

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n. \quad (1)$$

По условию задачи, угол между лучами $1'$ и 2 — прямой. Тогда, как видно из рисунка, $\alpha + \beta = 90^\circ$. Подставляя в (1), получим

$$\frac{\sin \alpha}{\sin(90^\circ - \alpha)} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha = n.$$

► Ответ. $\operatorname{tg} \alpha = 1,6$; $\alpha = 58^\circ$.



4.1.2. Дисперсия света

определения и основные формулы

► **Дисперсия света** — зависимость показателя преломления от длины волны света.

Подробное объяснение

Лучи света разных цветов — от красного до фиолетового — при переходе из воздуха в среду отклоняются от первоначального направления на разные углы. Согласно (4.2), это означает, что показатель преломления среды зависит от длины волны света. Опыт показывает, что лучи с наиболее короткими длинами волн — фиолетовые — преломляются сильнее всего.

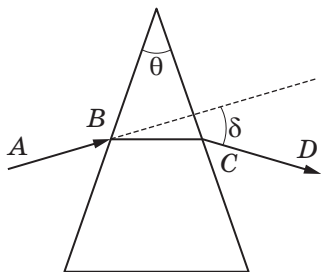


рис. 4.8

Рассмотрим явление дисперсии света на примере, имеющем практическое значение, — при прохождении света через треугольную призму (рис. 4.8). Сечение призмы — равнобедренный треугольник. Луч света AB падает на левую её боковую грань и при переходе через неё отклоняется

вправо на угол, равный разности угла падения и угла преломления. Пройдя через призму, луч падает на правую боковую грань призмы и подобным образом снова отклоняется. Можно показать, что вышедший из неё луч CD направлен по отношению к лучу AB под углом

$$\delta = (n - 1)\theta, \quad (4.4)$$

где θ — угол при вершине призмы, n — показатель преломления стекла, из которого она изготовлена.

Стеклянная призма используется в спектральных приборах, предназначенных для анализа света, излучаемого разными источниками — от светящихся газов в газоразрядной трубке до света далёких звёзд.

Белый свет, исходящий от Солнца или лампы накаливания, содержит лучи всех длин волн и даёт на экране разноцветную полосу из непрерывно переходящих друг в друга цветов радуги (рис. 4.9). Эти цвета: *красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий, фиолетовый*.

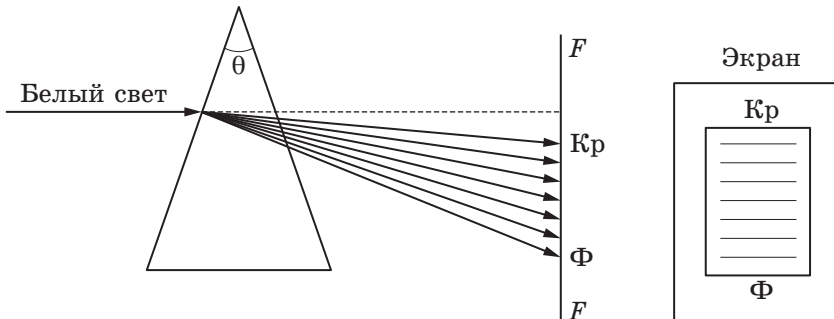


рис. 4.9

4.1.3. Собирающая линза

определения и основные формулы

- **Собирающая линза** — круглое стеклянное тело, ограниченное двумя выпуклыми сферическими поверхностями.
- **Формула линзы:**

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{F}, \quad (4.5)$$

где a — расстояние от предмета до линзы,
 a' — расстояние от линзы до изображения,
 F — фокусное расстояние линзы.

- **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**:

$$[D] = \text{дптр} = \text{м}^{-1}.$$

Подробное объяснение

Линза является основным элементом оптических приборов — микроскопа, телескопа, бинокля, фото- и телекамеры. Сечение линзы плоскостью, проходящей через ось её симметрии, изображено на рис. 4.10, *а*. Точка O в её центре называется *оптическим центром линзы*.

На рис. 4.10, *б* показано условное обозначение линзы на оптических схемах, которым мы будем пользоваться.

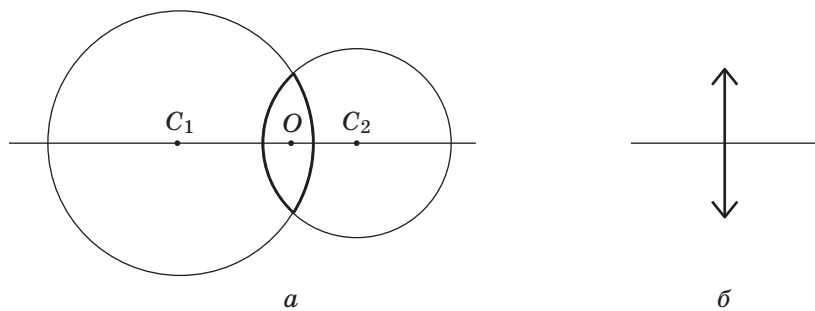


рис. 4.10

Верхняя и нижняя половины сечения линзы идентичны и своей формой напоминают сечение треугольной призмы. Поэтому лучи, идущие параллельно оси симметрии линзы C_1C_2 , будут отклоняться в сторону этой оси (рис. 4.11). Они сходятся в точке, называемой *фокусом линзы* F . Линза имеет два фокуса — слева и справа от неё.

Расстояние от центра линзы до фокуса называется её *фокусным расстоянием*, также обозначаемым буквой F .

Лучи, проходящие через оптический центр линзы, не испытывают преломления. Соответствующие прямые называются *оптическими осями* линзы. Таких осей существует бесконечно много.

Ось, совпадающая с осью симметрии линзы, называется *главной оптической осью*.

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. 4.12).

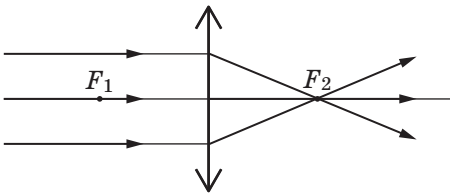


рис. 4.11

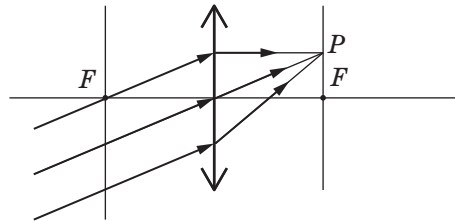


рис. 4.12

Фокусное расстояние линзы зависит от степени кривизны её поверхностей — линза с более выпуклыми поверхностями имеет меньшее фокусное расстояние. Она преломляет лучи сильнее и обладает, согласно (4.6), большей оптической силой. Одна *диоптрия* — оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м:

$$1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}.$$

Оптическая сила системы из двух соприкасающихся линз равна сумме этих величин каждой из них.

Собирающая линза позволяет получить изображение предмета — светящегося или отражающего падающий на него свет. Для построения изображения используются правила, основанные на рассмотренных выше закономерностях прохождения света через линзу. Таких правил два.

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.

Чтобы построить изображение точки, достаточно найти точку пересечения двух лучей, испущенных ею в двух разных направлениях. Протяжённый предмет можно разбить на отдельные точки и, построив изображения каждой из них, найти изображение предмета.

Изображения предмета в собирающей линзе могут быть двух типов — *действительные* и *мнимые*. Действительные изображения образуются в том случае, когда лучи, посланные в двух разных направлениях, сходятся. Этот случай представлен на рис. 4.13.

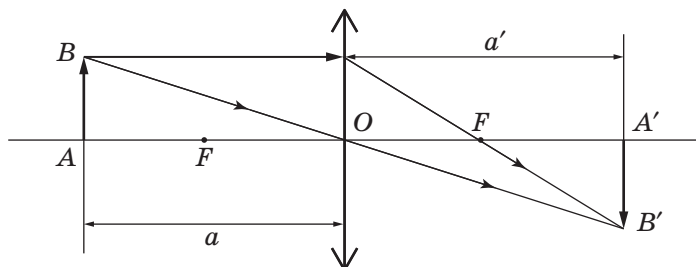


рис. 4.13

Предмет AB в виде стрелки расположен слева от линзы на расстоянии a , превышающем фокусное расстояние F ($a > F$, предмет «за фокусом» линзы). Чтобы найти его изображение $A'B'$, достаточно найти изображение его концов — точек A и B . Изображение точки B лежит на пересечении луча, параллельного оптической оси линзы, и луча, проходящего через её оптический центр, и находится в точке B' .

Оба таких луча, идущих от точки A , совпадают, поэтому для отыскания положения точки A' требуются дополнительные построения. Они приводят к формуле (4.5), связывающей расстояние a от предмета до линзы с расстоянием a' от линзы до изображения и величиной фокусного расстояния F .

Эта формула называется *формулой линзы*. Из неё следует, что отношение расстояний a и a' для любой из точек отрезка AB одинаково, следовательно, изображение нашего предмета — отрезок $A'B'$ — располагается параллельно предмету AB .

Размер изображения может быть как больше, так и меньше размера предмета в зависимости от соотношения между a и a' . Это будет действительное перевёрнутое изображение, которое можно наблюдать на экране, поместив его на расстоянии a' от линзы.

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. 4.14).

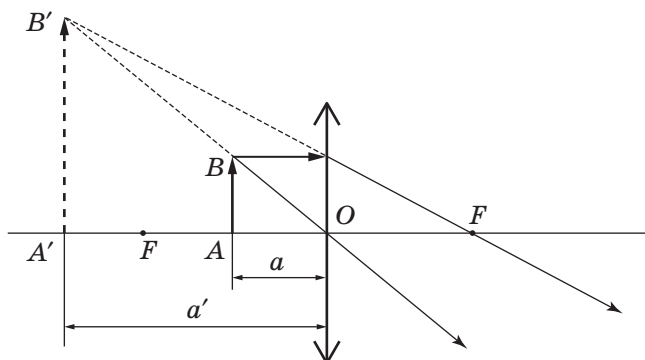


рис. 4.14

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 (4.5) в этом случае приобретает вид:

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{a'} = \frac{1}{F}, \quad (4.8)$$

где расстояние a' от линзы до изображения берётся со знаком «минус» — в направлении против хода луча, — поскольку это мнимое изображение.

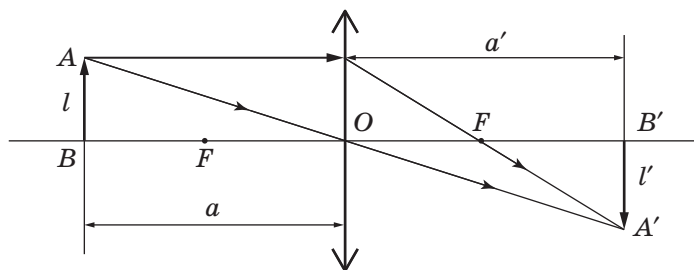
Из формулы (4.8) следует, что и в этом случае изображение $A'B'$ параллельно предмету AB .

Увеличенное мнимое изображение мы наблюдаем, когда рассматриваем предмет через лупу, которую используют, чтобы лучше разглядеть мелкие детали.

Примеры решения задач



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?



► Решение.

Фокусное расстояние линзы, согласно (4.6),

$$F = \frac{1}{D} = 0,1 \text{ м.}$$

Численное значение F показывает, что, по условию задачи, предмет расположен за фокусом, его изображение будет действительным перевернутым, а расстояние до него можно найти по формуле (4.5):

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{F}.$$

Тогда

$$a' = \frac{aF}{a - F}.$$

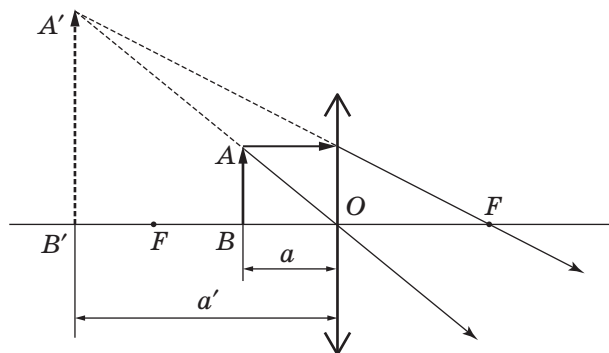
Размер изображения найдём, рассматривая подобные треугольники AOB и $A'O'B'$. Из подобия сторон следует:

$$\frac{l'}{l} = \frac{a'}{a} = 4.$$

► Ответ. $a' = 50$ см, изображение увеличенное действительное, перевернутое.

ЕГЭ

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?



► Решение.

Мнимое изображение в собирающей линзе даёт предмет, расположенный перед фокусом. Оптическую силу линзы

$D = \frac{1}{F}$ найдём из уравнения (4.5), в котором расстояние a'

до мнимого изображения отсчитывается в направлении против хода луча, т. е. со знаком «минус»:

$$D = \frac{1}{a} - \frac{1}{a'}. \quad (1)$$

Из подобия треугольников AOB и $A'OB'$ следует:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{a'}{a} = k,$$

откуда

$$a' = ka.$$

Подставляя в (1), получим:

$$D = \frac{k-1}{ka}.$$

► Ответ. $D = 20$ дптр.

4.1.4. Рассеивающая линза

Определения и основные формулы

- **Рассеивающая линза** — круглое стеклянное тело, ограниченное двумя вогнутыми сферическими поверхностями.
- **Формула линзы** (для рассеивающей линзы):

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{a'} = -\frac{1}{F'}, \quad (4.9)$$

где a — расстояние от предмета до линзы,
 a' — расстояние от линзы до мнимого изображения,
 F' — расстояние от линзы до её мнимого фокуса.

- **Оптическая сила линзы** — величина, обратная её фокусному расстоянию:

$$D = -\frac{1}{F'}. \quad (4.10)$$

Подробное объяснение

Тело рассеивающей линзы ограничено двумя вогнутыми сферическими поверхностями (рис. 4.15, а). Условное её обозначение на оптических схемах показано на рис. 4.15, б.

Отличие рассеивающей линзы от собирающей состоит в том, что лучи, идущие параллельно её оптической оси, отклоняются линзой во внешнюю сторону — рассеиваются (рис. 4.16). Мнимый фокус F' лежит на продолжении этих лучей. При построении изображения предмета в рассеивающей линзе лучи, параллельные её оптической

оси, следует направить так, как будто они выходят из точки F' (рис. 4.17). Лучи, проходящие через её оптический центр, не изменяют своего направления.

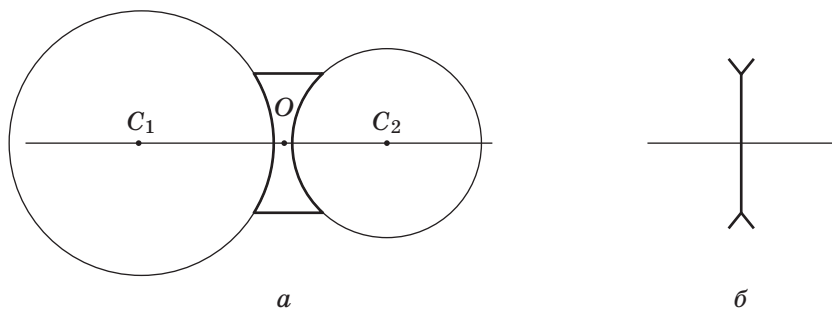


рис. 4.15

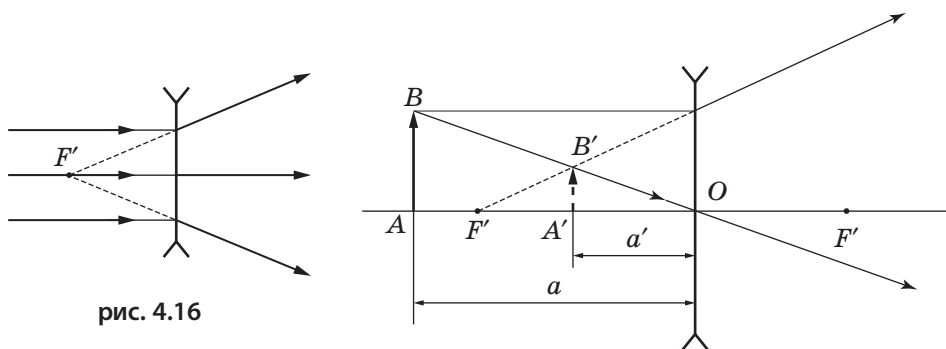


рис. 4.17

Рассеивающая линза всегда даёт мнимое изображение, не зависимо от того, где находится предмет — перед фокусом или за ним. Это изображение уменьшенное и прямое (не перевёрнутое).

Из рис. 4.17 видно, что его размер меньше размера предмета в $\frac{a'}{a}$ раз, где a' — расстояние от линзы до мнимого изображения. Его можно найти из формулы (4.9).

Мнимое изображение предмета, даваемое рассеивающей линзой, доступно наблюдению благодаря тому, что глаз человека, имеющий собирающую линзу в виде хрусталика, делает расходящийся пучок света сходящимся, сфокусированным на светочувствительной оболочке глаза — сетчатке. Оптическая сила рассеивающей линзы отрицательна.

Рассеивающие линзы используются в качестве компонентов объективов и окуляров микроскопов, телескопов и других оптических приборов. Их роль заключается в исправлении дефектов изображения, возникающих в простых линзах.

Примеры решения задач

ОГЭ

Определить оптическую силу рассеивающей линзы, если известно, что предмет, помещённый перед ней на расстоянии $a = 40$ см, даёт мнимое изображение, уменьшенное в $k = 4$ раза.

► Решение. Воспользуемся оптической схемой, изображённой на рис. 4.17. Согласно (4.9) формула для нахождения оптической силы линзы имеет вид

$$-D' = \frac{1}{a} - \frac{1}{a'}. \quad (1)$$

Из подобия треугольников AOB и $A'OB'$ следует:

$$\frac{a}{a'} = \frac{AB}{A'B'} = k.$$

Выражая отсюда a' и подставляя его в (1), получим

$$D' = \frac{k-1}{a}.$$

► Ответ. $D' = -7,5$ дптр.

ЕГЭ

Предмет находится перед рассеивающей линзой на расстоянии $a = mF'$ от неё ($m = 4$). На каком расстоянии от линзы получится мнимое изображение и во сколько раз оно будет меньше самого предмета?

► Решение.

Воспользуемся оптической схемой, представленной на рис. 4.17. Согласно (4.9),

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{a'} = -\frac{1}{F'}. \quad (1)$$

По условию задачи $a = mF'$. Подставляя в (1), найдём

$$a' = \frac{mF'}{m+1}.$$

Из подобия треугольников AOB и $A'OB'$ следует:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{1}{m+1}.$$

► Ответ. $a' = 0,8F'$, меньше в 5 раз.

4.1.5. Глаз как оптическая система

определения и основные формулы

- **Угол зрения** — угол между крайними лучами, попадающими в глаз от рассматриваемого предмета.

Подробное объяснение

Глаз человека представляет собой довольно сложную оптическую систему (рис. 4.18). Глазное яблоко диаметром примерно 2,5 см в передней своей части имеет прозрачную *роговую оболочку*, или *роговицу*. За нею расположена *радужная оболочка*, окрашенная у разных людей в разные цвета и имеющая в середине отверстие — *зрачок*. Радужная оболочка способна деформироваться и менять размер зрачка. Это происходит рефлекторно — без участия сознания. При ярком освещении диаметр зрачка равен 2 мм, а при слабом доходит до 8 мм.

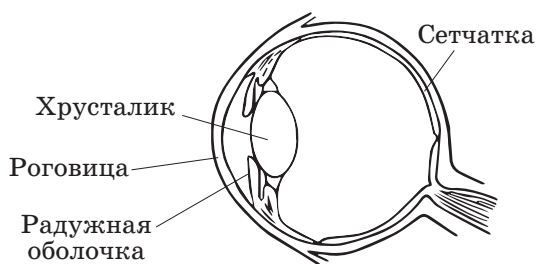


рис. 4.18

Падающие световые лучи сначала преломляются на поверхности роговой оболочки глаза, а затем на двух поверхностях *хрусталика*, напоминающего своей формой линзу. Пройдя сквозь глазную жидкость, наполняющую глаз, лучи собираются на его сетчатой оболочке — *сетчатке*.

Сетчатая оболочка состоит из очень мелких светочувствительных элементов размером меньше 0,01 мм. Каждый элемент является окончанием нерва, по которому световое ощущение передаётся в мозг. На сетчатой оболочке получается действительное перевёрнутое изображение предметов, находящихся перед глазом. Правильное впечатление о них — в неперевернутом виде — создаётся за счёт работы мозга.

При помощи специальных мускулов хрусталик может менять свою кривизну, что позволяет видеть предметы резкими. Эта способность глаза называется *аккомодацией*.

Аккомодация позволяет глазу видеть предметы отчетливо только до некоторого расстояния, ближе которого фокусировка невозможна или может осуществляться на короткое время за счёт большого напряжения его мускулов. Это расстояние, равное примерно 25 см и называемое *расстоянием наилучшего зрения*, с возрастом увеличивается, поскольку хрусталик теряет свою эластичность. Лучи вследствие малой кривизны хрусталика фокусируются за сетчаткой и глаз делается *дальнозорким*. Для исправления этого недостатка служат очки с выпуклыми линзами. Они позволяют получить изображение на самой сетчатой оболочке глаза.

Другой недостаток — *близорукость* — заключается в слишком большой выпуклости хрусталика, так что изображения предметов фокусируются перед сетчаткой. Он исправляется очками с вогнутыми стеклами, отдаляющими действительное изображение, перенося его на сетчатку.

Видимый размер предмета определяется размером его изображения на сетчатке глаза, который определяется *углом зрения* φ (рис. 4.19).

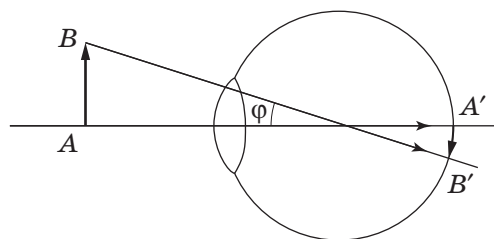


рис. 4.19

Угол зрения зависит от размеров предмета и от его расстояния до глаза — чем ближе предмет, тем угол зрения больше. Приближая предметы до расстояния наилучшего зрения, соответствующего наилучшим условиям наблюдения, мы можем увеличивать их кажущиеся размеры, чтобы видеть более мелкие детали. Однако если предмет настолько мал, что его изображение на сетчатке глаза меньше 0,01 мм, то форму этого предмета уже нельзя будет различить — изображение предмета уложится на одном её светочувствительном элементе и даст ощущение одной точки. Как показывает опыт, угол зрения при этом равен примерно одной минуте, что соответствует отрезку длиной 1 см, находящемуся на расстоянии 34 м от глаза.

Благодаря указанному ограничению человеческий глаз не пригоден ни для рассматривания близких, но очень маленьких предметов,

ни для рассматривания больших, но очень удалённых предметов. И в том и в другом случае глаз необходимо вооружить приборами, увеличивающими угол зрения, под которым виден предмет.

Примеры решения задач



Человек при чтении держит книгу на расстоянии $L = 50$ см. Какой оптической силы очки нужны ему?

- Решение. Используем рис. 4.13 и формулу (4.5). Для дальнорезкого глаза расстояние наилучшего зрения L оказалось больше, чем для нормального глаза ($L_0 = 25$ см). Тогда (4.5) принимает вид

$$D_1 = \frac{1}{L} + \frac{1}{a'}. \quad (1)$$

Линза очков с оптической силой D позволяет скорректировать зрение. В этом случае, согласно (4.7),

$$D_1 + D = \frac{1}{L_0} + \frac{1}{a'}. \quad (2)$$

Вычитая уравнение (1) из уравнения (2), получим

$$D = \frac{L - L_0}{L_0 L}.$$

- Ответ. $D = 2$ дптр.



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?

- Решение.

Для наглядности можно использовать оптическую схему, представленную на рис. 4.13.

Хрусталик глаза представляет собой линзу, фокусное расстояние которой может изменяться под действием мышц, прикреплённых к главному яблоку. Согласно (4.5), при чтении книги резкое изображение на сетчатке глаза возникает при условии $a = L$:

$$D_1 = \frac{1}{L} + \frac{1}{a'}, \quad (1)$$

где L — расстояние наилучшего зрения.

При рассматривании рисунка на стене — при условии

$$D_2 = \frac{1}{a} + \frac{1}{a'}. \quad (2)$$

Вычитая (2) из (1), получим

$$\Delta D = D_1 - D_2 = \frac{a - L}{aL}.$$

► Ответ. Уменьшается на 3,5 дптр.

4.1.6. Оптические приборы

определения и основные формулы

- **Лупа** — собирающая линза, через которую рассматривается предмет, располагаемый между линзой и её фокусом.
- **Увеличение оптического прибора** — отношение длины изображения на сетчатке в случае вооружённого глаза к длине изображения в случае невооруженного глаза.

► **Увеличение лупы:**

$$k = \frac{l'}{l} = \frac{L}{F}, \quad (4.11)$$

где $L = 25$ см — расстояние наилучшего зрения,

l — размер предмета,

l' — размер мнимого изображения,

F — главное фокусное расстояние лупы (в см).

Подробное объяснение

По своему назначению оптические приборы, вооружающие глаз, можно разделить на две большие группы.

1. Приборы, служащие для рассматривания очень мелких предметов (лупа, микроскоп). Эти приборы как бы увеличивают рассматриваемые предметы.
2. Приборы, предназначенные для наблюдения удалённых объектов (зрительная труба, бинокль, телескоп). Они как бы приближают эти объекты.

В каждом случае эти приборы и глаз образуют единую оптическую систему, существенным элементом которой является хрусталик глаза. Вся эта система в целом даёт изображение предмета на сетчатке глаза, и кажущаяся величина предмета оценивается нами по величине этого изображения.

Простейшим прибором для вооружения глаза является *лупа*, рассмотрением которой мы и ограничимся.

В качестве лупы применяются собирающие линзы с фокусным расстоянием от 10 до 100 мм. Лупа помещается перед глазом вблизи

него, а рассматриваемый предмет — на расстоянии, немного меньшем её фокусного расстояния. Построение изображения в лупе приведено на рис. 4.14. В этих условиях она даёт мнимое, прямое, увеличенное изображение.

На рис. 4.20 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.

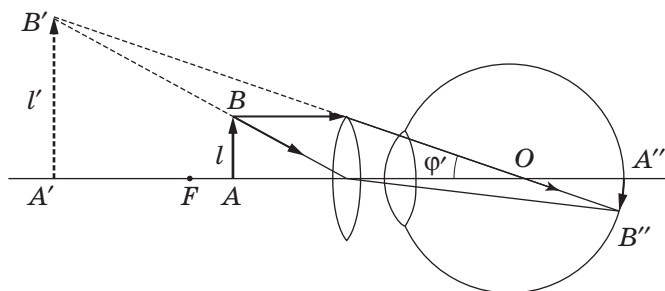


рис. 4.20

Увеличение лупы k равно отношению угла зрения φ' при рассматривании через неё предмета (рис. 4.20) к углу зрения φ для невооруженного глаза, когда предмет расположен на расстоянии наилучшего зрения $L = 25$ см (рис. 4.21):

$$k = \frac{\varphi'}{\varphi} = \frac{l'}{l}. \quad (4.12)$$

Можно показать, что увеличение лупы вычисляется по формуле (4.11).

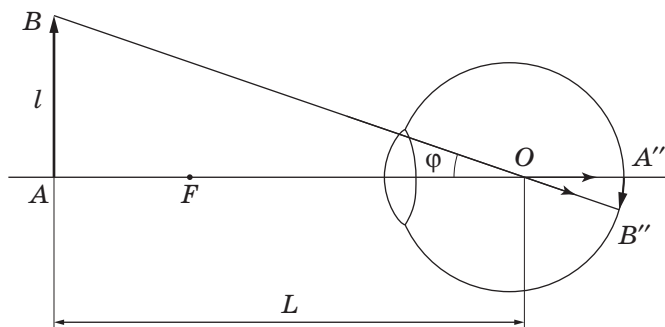


рис. 4.21

При $F = 50$ мм лупа имеет пятикратное увеличение, и оно возрастает с уменьшением фокусного расстояния. Однако лупы с очень малым фокусным расстоянием имеют большую кривизну преломляющей поверхности и могут быть только малого диаметра. Пользоваться ими практически невозможно, поэтому лупы с увеличением более 40 не применяются.

Примеры решения задач



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.

► Решение. Увеличение лупы найдём по формуле (4.11):

$$k = \frac{L}{F},$$

где L — расстояние наилучшего зрения.

► Ответ. $k_1 = 12,5$; $k_2 = 7,5$.

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 от 0,4 до 0,7 мкм.

4.2.1. Интерференция световых волн

Определения и основные формулы

- **Интерференция света** — перераспределение интенсивности света в пространстве вследствие наложения световых волн, приходящих от когерентных источников.

► **Когерентные источники света** — источники, излучающие волны с одинаковыми частотами, амплитудами, направлением плоскости поляризации, разность фаз колебаний которых постоянна во времени.

► **Интенсивность света** — энергия W , переносимая световой волной за единицу времени t через единичную площадку S , перпендикулярную направлению её распространения:

$$I = \frac{W}{St}. \quad (4.13)$$

► **Принцип суперпозиции световых волн:**

$$\vec{E}_{\text{рез}} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2, \quad (4.14)$$

где $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ — векторы напряжённости электрического поля складываемых волн.

Единицы измерения

► Единица измерения интенсивности света — **ватт на квадратный метр**:

$$[I] = \text{Вт}/\text{м}^2.$$

Подробное объяснение

Плоская электромагнитная, или *световая*, волна, распространяющаяся вдоль оси X декартовой системы координат, изображена на рис. 4.22. Она имеет две составляющие — электрическую и магнитную. Вектор напряжённости электрического поля $\vec{E}$ и вектор магнитной индукции $\vec{B}$

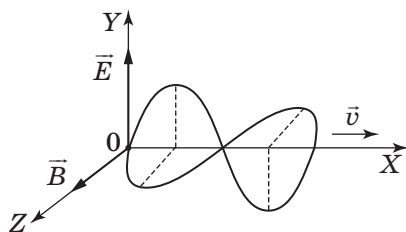


рис. 4.22

перпендикулярны друг другу и направлению распространения волн, так что электромагнитная волна *поперечна*.

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 I в данной точке пропорциональна квадрату амплитуды напряжённости электрического поля световой волны E_0 :

$$I \sim E_0^2. \quad (4.15)$$

Для световых, как и для любых волн, справедлив *принцип суперпозиции*, выражаемый формулой (4.14).

Если две одинаковые волны приходят в данную точку *в одинаковых фазах* (горбы и впадины волн совпадают, рис. 4.23, а), амплитуда созданных ими колебаний вдвое превышает амплитуду колебаний E_0 , порождаемых каждой из волн ($E_{\text{рез}} = 2E_0$), а интенсивность света в этой точке, согласно (4.15), вчетверо выше интенсивности I_0 , создаваемой каждой из волн в отдельности ($I_{\text{рез}} = 4I_0$), т. е. вдвое больше суммы интенсивностей складываемых колебаний.

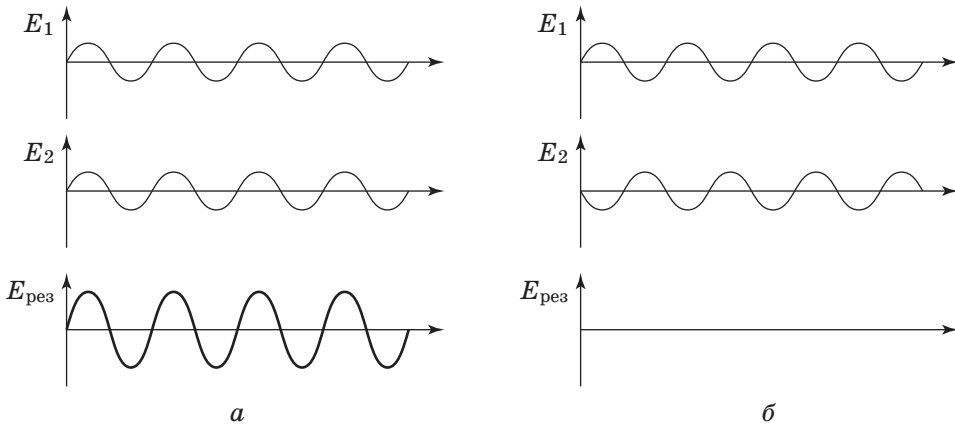


рис. 4.23

Если наложение волн происходит *в противофазах* (горбы одной волны накладываются на впадины второй, рис. 4.23, б), амплитуда результирующих колебаний в этой точке обращается в нуль, 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.

Для возникновения интерференционной картины необходимо, чтобы их источники были *когерентны*. (По латыни *cohaerentia* — «связь».)

Всякий источник света — светящееся тело — состоит из огромного числа центров излучения — атомов или молекул. Каждый атом непрерывно излучает пуг волн в течение времени $\tau \approx 10^{-8}$ с. После этого он «гаснет», а затем излучает очередной пуг волн, по фазе не связанный с предыдущим.

Для того чтобы два источника были когерентны, они должны быть полностью идентичны друг другу. Поскольку такое совпадение

невероятно, нужно два луча, исходящих от одного и того же источника, направить по разным путям, а затем заставить их сойтись. Тогда в точке наблюдения в любой момент времени будут складываться волны, излученные одними и теми же атомами. Нужно только, чтобы время прохождения светом разности этих путей было мало по сравнению с длительностью смены системы излучающих атомов, иначе в этой точке будут складываться волны из разных цугов, которые не когерентны. Поскольку за время τ луч света проходит путь $s = c \cdot \tau \approx 3 \text{ м}$ ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ — скорость света), разность путей δ интерферирующих лучей должна быть значительно меньше ($\delta \ll s$), т. е. не превышать нескольких сантиметров. Существует множество схем, реализующих этот принцип. Ниже мы приведем одну из них.

4.2.2. Интерференция света от двух точечных источников

определения и основные формулы

- **Условие усиления света** при наложении волн от двух когерентных источников:

$$\delta = d_2 - d_1 = m\lambda, \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots), \quad (4.16)$$

где δ — разность путей первого и второго луча,
 λ — длина световой волны.

- **Условие ослабления света:**

$$\delta = d_2 - d_1 = (2m - 1)\frac{\lambda}{2}, \quad (m = \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (4.17)$$

- **Ширина интерференционных полос** — расстояние между соседними максимумами на экране:

$$\Delta x = \frac{D\lambda}{l}, \quad (4.18)$$

где D — расстояние от источников до экрана,
 l — расстояние между источниками.

Единицы измерения

- Путь луча и длина волны измеряются в **метрах**:

$$[d] = [\lambda] = \text{м}.$$

Подробное объяснение

На рис. 4.24 представлена оптическая схема опыта Томаса Юнга, который в 1800 г. впервые выполнил демонстрационный эксперимент по наблюдению интерференции света.

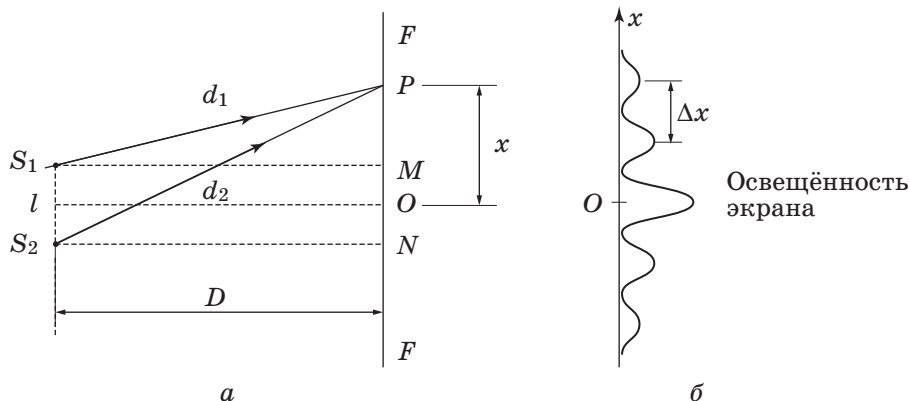


рис. 4.24

Два когерентных точечных источника света S_1 и S_2 (рис. 4.24, а) расположены на расстоянии D от экрана FF и на расстоянии l друг от друга, много меньшем D ($l \ll D$). В некоторую точку P , находящуюся на расстояниях соответственно d_1 и d_2 от этих источников, приходит две волны.

Амплитуда результирующих колебаний в точке P зависит от разности хода лучей $\delta = d_2 - d_1$, принимая максимальное значение в точках, в которых эта разность составляет целое число длин волн (формула (4.16)), (рис. 4.23, а).

В этих точках освещённость экрана (интенсивность падающего света) наибольшая.

Если разность хода равна полуцелому числу длин волн (формула (4.17)), амплитуда результирующих колебаний обращается в нуль (рис. 4.23, б).

Главный максимум освещённости на рис. 4.24 наблюдается в точке O , расположенной на одинаковых расстояниях от источников S_1 и S_2 ($d_1 = d_2$). Перемещаясь вдоль экрана от точки O вверх или вниз, мы придём в такое место, где разность хода лучей $d_2 - d_1$ составит $\frac{\lambda}{2}$. Здесь находится 1-й минимум освещённости ($m = 1$ в формуле (4.17)).

При дальнейшем перемещении разность хода лучей продолжает возрастать. В точке, где $d_2 - d_1 = \lambda$, наблюдается 1-й максимум освещённости ($m = 1$ в формуле (4.16)). Следом идет 2-й минимум освещённости $\left(d_2 - d_1 = \frac{3}{2}\lambda\right)$, 2-й максимум ($d_2 - d_1 = 2\lambda$) и т. д. Удаля-

ясь от центра картины, мы попеременно будем обнаруживать то светлые, то тёмные места. Распределение интенсивности света на экране показано на рис. 4.24, б.

Найдём расстояние Δx между соседними максимумами на этом графике, называемое *шириной интерференционных полос*. Положение m -го максимума относительно точки O можно определить, рассматривая треугольники S_1PM и S_2PN (рис. 4.24, а). По теореме Пифагора

$$d_1^2 = D^2 + PM^2 = D^2 + \left(x - \frac{l}{2}\right)^2,$$

$$d_2^2 = D^2 + PN^2 = D^2 + \left(x + \frac{l}{2}\right)^2.$$

Возьмём разность

$$d_2^2 - d_1^2 = \left(x + \frac{l}{2}\right)^2 - \left(x - \frac{l}{2}\right)^2 = 2lx,$$

или

$$(d_2 + d_1)(d_2 - d_1) = 2lx.$$

Поскольку $x \ll D$, расстояния d_1 и d_2 мало отличаются от D и первый множитель $d_2 + d_1 \cong 2D$. Второй множитель как раз составляет разность хода лучей $\delta = d_2 - d_1$. Тогда, с учетом (4.16),

$\delta = d_2 - d_1 = \frac{lx}{D} = m\lambda$, откуда координата m -го максимума

$$x_m = \frac{D\lambda}{l} m.$$

Расстояние между соседними максимумами

$$\Delta x = x_{m+1} - x_m = \frac{D\lambda}{l}.$$

Если принять $l = 2$ мм, а расстояние между светлыми полосами на экране $\Delta x = 1$ мм, то для средней части спектра видимого света ($\lambda \approx 0,6$ мкм) расстояние от источников до экрана должно составить $D = 3,3$ м. Этим подтверждаются поставленные выше условия $l \ll D$ и $x \ll D$.

Формула (4.18) показывает, что ширина интерференционных полос увеличивается вместе с λ . Если пользоваться красным светом, то полосы оказываются дальше друг от друга, чем когда опыт проводится с лучами зелёными или синими.

Измеряя величины Δx , D и l , из формулы (4.18) можно определить для монохроматического света его длину волны λ :

$$\lambda = \frac{l \cdot \Delta x}{D}. \quad (4.19)$$

Примеры решения задач

ОГЭ

В опыте Юнга расстояние между источниками света $l = 0,5$ 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?

► Решение. Расстояние между максимумами освещённости (см. рис. 4.24) даёт формулой (4.18):

$$\Delta x = \frac{D\lambda}{l},$$

откуда

$$D = \frac{l \cdot \Delta x}{\lambda}.$$

► Ответ. $D = 0,91$ м.

ЕГЭ

Во сколько раз увеличится расстояние Δx 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)?

► Решение. Отношение этих расстояний, согласно (4.18),

$$\frac{\Delta x_2}{\Delta x_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}.$$

► Ответ. $\frac{\Delta x_2}{\Delta x_1} = 1,3$.

4.2.3. Бипризма Френеля

определения и основные формулы

- **Бипризма Френеля** — стеклянная призма, представляющая в сечении равнобедренный треугольник с углом при вершине θ , близким к 180° .
- **Длина волны света**, которую можно измерить с помощью бипризмы Френеля:

$$\lambda = \frac{2a(n-1)\theta \cdot \Delta x}{a+b}, \quad (4.20)$$

где a — расстояние от источника до бипризмы,
 b — расстояние от бипризмы до экрана,
 Δx — расстояние между соседними максимумами на экране,
 n — показатель преломления стекла призмы.

Единицы измерения

- Все линейные величины в формуле (4.20) измеряются в метрах:

$$[a] = [b] = [\Delta x] = [\lambda] = \text{м.}$$

Подробное объяснение

Одна из оптических систем, позволяющих получить два когерентных световых пучка, — *бипризма Френеля*, изображена на рис. 4.25. Точечный источник света S — щель, параллельная рёбрам бипризмы. Бипризма действует как две одинаковые прямоугольные призмы, сложенные катетами. Каждая половина даёт мнимое изображение источника S — соответственно S' и S'' . Чтобы построить изображение источника S' , нужно взять каких-либо два луча 1 и 2, проходящие через верхнюю половину бипризмы. В силу малости угла θ при её основании ($\theta \ll 1$) все лучи, идущие вблизи оси симметрии, отклоняются призмой на одинаковый угол

$$\varphi = (n - 1)\theta, \quad (4.21)$$

где n — показатель преломления стекла, из которого она изготовлена.

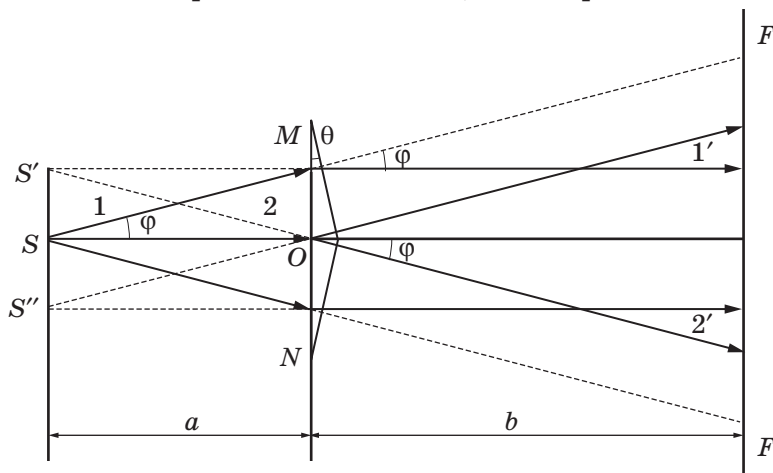


рис. 4.25

Мнимое изображение S' источника будет находиться в точке пересечения прямых $1'$ и $2'$, показывающих ход лучей 1 и 2 после

прохождения ими призмы. Симметрично с ним располагается мнимое изображение источника S'' , возникающее вследствие прохождения света через нижнюю половину бипризмы. Интерференционные полосы наблюдаются в той части экрана FF , куда попадают лучи от обоих мнимых изображений источника — S' и S'' .

Чтобы воспользоваться формулой (4.19) для нахождения длины волны света λ , определим расстояние l между мнимыми источниками. Поскольку мы взяли луч $1'$ параллельным оси симметрии картины, в треугольнике SMO угол MSO равен φ . Тогда $OM = \frac{l}{2} = a \cdot \operatorname{tg} \varphi$. Тангенс угла φ можно заменить его аргументом ($\operatorname{tg} \varphi \approx \varphi$) в силу малости последнего. В результате, с учетом (4.21), имеем

$$l = 2a(n - 1)\theta.$$

Подставляя в (4.19), получим формулу (4.20), которая является рабочей при измерении длин световых волн с помощью бипризмы Френеля.

4.2.4. Применение явления интерференции

определения и основные формулы

► **Длина волны света в веществе:**

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}, \quad (4.22)$$

где λ_0 — длина волны света в вакууме,
 n — показатель преломления вещества.

► **Оптическая длина пути:**

$$l_{\text{опт}} = n \cdot l, \quad (4.23)$$

где l — длина пути света в веществе.

Единицы измерения

► Все линейные величины в формулах (4.22) и (4.23) измеряются в **метрах**:

$$[\lambda] = [l] = \text{м}.$$

Подробное объяснение

Явление интерференции используется для измерения различных физических величин с очень высокой точностью. Рассмотрим один из примеров таких измерений.

Обратимся к случаю интерференции света от двух точечных источников. Поместим на пути одного из лучей перпендикулярно ему плоскопараллельную стеклянную пластинку толщиной d (рис. 4.26, *a*). Заметим, что вся интерференционная картина на экране FF смещается при этом параллельно самой себе вверх на некоторое расстояние. Причина этого будет ясна из дальнейшего изложения. Изменяя расстояние от экрана до источников света, можно добиться, чтобы средняя светлая полоса — максимум нулевого порядка — располагалась в точке P в том месте, где ранее находился максимум m -го порядка (рис. 4.26, *б*). Номер максимума определяется разностью путей d_2 и d_1 лучей, пришедших в точку P от источников S_1 и S_2 . В отсутствие пластинки в вакууме для максимума m -го порядка она составляет m длин волн:

$$d_2 - d_1 = m\lambda. \quad (4.24)$$

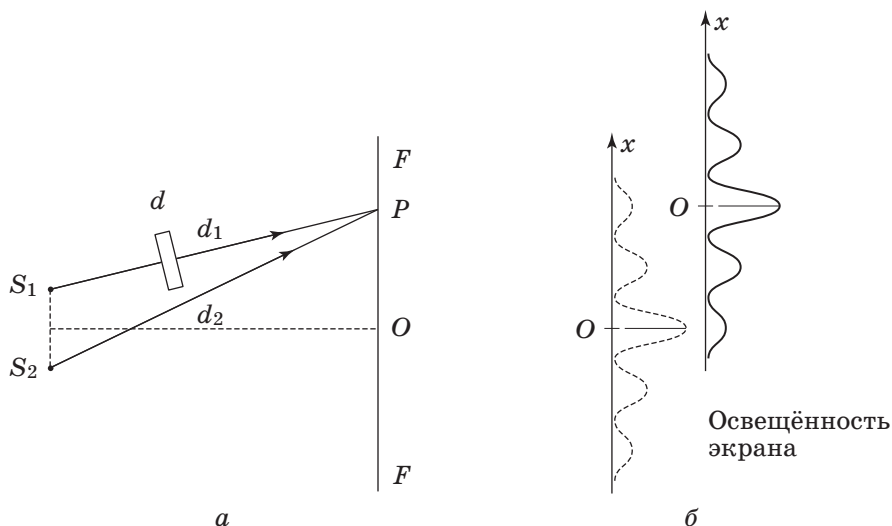


рис. 4.26

В веществе с показателем преломления n скорость света уменьшается в n раз по сравнению с его скоростью в вакууме $\left(v = \frac{c}{n}\right)$, а поскольку частота света остаётся прежней, то, согласно (1.76), в n раз уменьшается и длина его волны:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}.$$

На отрезке пути длиной l в веществе уложится столько волн, сколько их укладывается на отрезке длиной $n \cdot l$ в вакууме. Произведение $n \cdot l$ называется *оптической длиной пути*

$$l_{\text{опт}} = n \cdot l.$$

Оптическая длина пути луча S_1P (рис. 4.26, а) составит $d_1 - d$ в вакууме и nd — в пластинке. Их сумма должна быть равна оптической длине пути луча S_2P , поскольку, по условию, в точку P смещается центральный максимум:

$$(d_1 - d) + nd = d_2.$$

Учитывая (4.24), получим

$$(n - 1)d = m\lambda.$$

Поскольку свет распространяется в воздухе — среде с показателем преломления n' , в этой формуле n нужно заменить на относительный показатель преломления $\frac{n}{n'}$, и она приобретает вид

$$\frac{n - n'}{n'} = \frac{m\lambda}{d}.$$

Пусть толщина пластинки $d = 1$ мм, длина волны света $\lambda = 0,5$ мкм, а смещение интерференционной картины происходит на одну полосу ($m = 1$). Тогда численное значение правой части этого выражения составит 0,0005 и по смещению полос интерференции можно обнаружить отличие показателей преломления пластинки и среды с точностью 0,05 %.

Изготовив пластинку полый и заполняя её прозрачными веществами, можно с высокой точностью измерять разности показателей преломления этих веществ и воздуха. Высокая точность оптических измерений с использованием явления интерференции обусловлена малостью длин световых волн, которые выступают здесь в качестве единицы измерения.

Интерференцию света можно наблюдать и при отражении его от тонких плёнок. Этот вид интерференции, не рассмотренный здесь, находит широкое применение для измерения малых перемещений, определения коэффициентов линейного расширения веществ, контроля качества обработки поверхностей, для так называемого *просветления оптики*, когда для устранения отражения света от поверхностей линз на них наносят тонкий слой из окислов металлов, существенно увеличивающий прозрачность оптических систем.

4.3. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

4.3.1. Принцип Гюйгенса. Метод зон Френеля

определения и основные формулы

- ▮ **Дифракция** — уклонение света от прямолинейного распространения при прохождении световых волн вблизи препятствий.
- ▮ **Фронт волны** — поверхность, отделяющая область пространства, в которой происходят колебания, от остальной части пространства, где колебания ещё не начались.
- ▮ **Принцип Гюйгенса.** Каждая точка фронта волны является источником вторичных сферических волн, огибающая которых (общая касательная) показывает его положение в более поздний момент времени.

Подробное объяснение

Явление дифракции (от латинского слова *diffractus* — преломление), как и явление интерференции, присуще всем волнам — в упругой среде или электромагнитным волнам. Теория дифракции света, родоначальником которой был голландский ученый Христиан Гюйгенс, создана в начале XIX века Огюстом Френелем. Она утвердила представление о волновой природе света, которое оставалось господствующим в науке вплоть до начала XX века.

Распространение колебаний в пространстве сопровождается перемещением фронта волны. Этот процесс изображают в виде последовательности волновых поверхностей, показывающих его положение

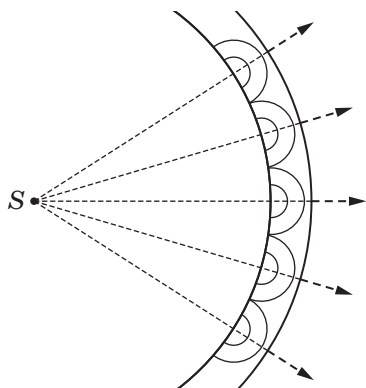


рис. 4.27

через малые промежутки времени. Каждую из этих поверхностей можно построить, используя *принцип Гюйгенса* (рис. 4.27).

Френель в развитие принципа Гюйгенса предложил метод расчёта амплитуды результирующих колебаний, возникающих в точке наблюдения под действием этих вторичных источников, — *метод зон Френеля*.

Пусть S — точечный источник света. Проведём сферическую поверхность

MN с центром в точке S (рис. 4.28). Она является фронтом волны в некоторый момент времени. Расстояние OP от этой поверхности до точки наблюдения P обозначим через R . Проведём теперь вокруг точки P ряд сферических поверхностей радиусами $r_1 = Pm_1$, $r_2 = Pm_2$, $r_3 = Pm_3$, ..., которые вместе с OP составляют арифметическую прогрессию с разностью $\frac{\lambda}{2}$:

$$r_0 = R, \quad r_1 = R + \frac{\lambda}{2}, \quad r_2 = R + 2\frac{\lambda}{2}, \quad \dots, \quad r_k = R + k\frac{\lambda}{2}. \quad (4.25)$$

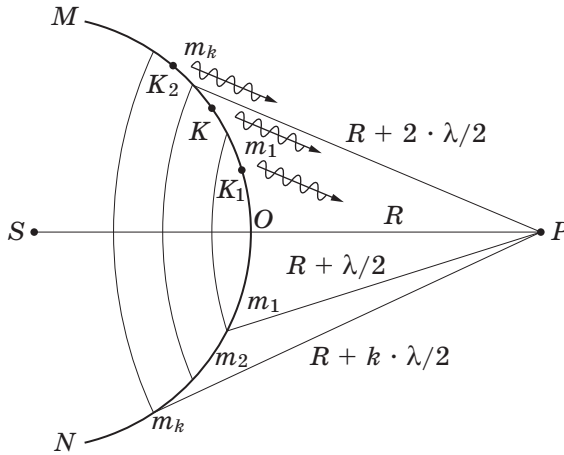


рис. 4.28

Эти поверхности вырезают на волновой поверхности MN кольцевые зоны. Центральный сегмент m_1m_1 является *первой* зоной Френеля.

Можно показать, что площади зон $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots$ тоже составляют арифметическую прогрессию, т. е. каждая из них равна среднему арифметическому площадей двух соседних с нею зон:

$$\sigma_k = \frac{\sigma_{k-1} + \sigma_{k+1}}{2}, \quad (k = 2, 3, 4, \dots).$$

Некоторой точке K в какой-либо из зон можно сопоставить две точки — K_1 и K_2 в двух соседних зонах, расстояния K_1P и K_2P от которых до точки наблюдения P отличаются от расстояния KP на полдлины волны:

$$K_2P - KP = KP - K_1P = \frac{\lambda}{2}.$$

Колебание, идущее от точки K как от вторичного источника, гасится в точке P одним из колебаний — идущих от точки K_1 или от точки K_2 . Следовательно, все колебания, пришедшие из n -й зоны Френеля, гасятся колебаниями, идущими от прилегающих к ней половины $(n - 1)$ -й зоны и половины $(n + 1)$ -й зоны.

Амплитуду колебаний в точке P представим в виде

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots = \frac{A_1}{2} + \left(\frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2} \right) + \left(\frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2} \right) + \dots \approx \frac{A_1}{2}, \quad (4.26)$$

где A_k — амплитуда колебаний, порождённых вторичными источниками k -й зоны (чётные и нечётные зоны создают в точке P колебания противоположных направлений; отсюда — чередование знаков амплитуд).

Каждую из сумм, заключённых в скобки, в силу сказанного, можно считать равной нулю. Согласно (4.26), колебания в точке P можно рассматривать как результат сложения колебаний, порождённых источниками из половины первой зоны Френеля — средней части центрального сегмента, площадь которой очень мала и которая находится на линии, соединяющей источник S с точкой наблюдения P . Мы возвращаемся здесь к представлению о лучах света, использованному в геометрической оптике.

Взаимное уничтожение действия соседних зон происходит только в том случае, когда вся волновая поверхность MN «видна» из точки P . Если же часть этой поверхности закрыта от наблюдателя, находящегося в точке P , имеет место отклонение света от прямолинейного распространения, которое мы и называем дифракцией.

По существу, дифракция сводится к интерференции волн от фиктивных точечных источников, находящихся на фронте волны. Тем не менее введение в рассмотрение таких источников оказалось очень



рис. 4.29

плодотворным, поскольку позволило объяснить опытные факты. Наглядным тому примером служит опыт с «зонной пластинкой» (рис. 4.29). Если на пути света поместить стеклянную пластинку, на которую нанесены непрозрачные кольца, закрывающие, например, нечётные зоны, интенсивность света в точке P не уменьшится, а возрастет. Разность хода лучей, доходящих до неё из любой пары колец, соответствующих

открытым чётным зонам, составляет в этом случае целое число длин волн, вследствие чего складываемые в точке P колебания усиливают друг друга. Такая пластинка действует как своеобразная собирающая линза, для которой точка P является фокусом. Расчёт показывает, что чем меньше λ , тем дальше точка P лежит от пластинки — фокус красных лучей располагается к пластинке ближе, чем фокус фиолетовых. В собирающих линзах имеет место обратное явление.

Принципы, лежащие в основе теории дифракции, используются в *голографии* — прикладной области оптики, получившей практическое воплощение после создания лазеров (см. Приложение 2).

4.3.2. Дифракция света на дифракционной решётке

определения и основные формулы

► **Дифракционная решётка** — совокупность параллельных щелей одинаковой ширины, находящихся на равных расстояниях друг от друга.

► **Условие максимума интенсивности** при дифракции света на дифракционной решётке:

$$d \sin \varphi = m\lambda, \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots), \quad (4.27)$$

где d — период решётки,

λ — длина волны света.

► **Угловая дисперсия D спектрального прибора** — угол $\Delta\varphi$, на который расходятся два луча, отличающиеся длиной волны на единицу:

$$D = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda}. \quad (4.28)$$

► **Разрешающая сила** спектрального прибора — отношение длины волны λ_1 какой-либо спектральной линии к разности длин волн $\Delta\lambda$ между нею и ближайшей к ней линией λ_2 , видимой на экране как раздельная с ней:

$$R = \frac{\lambda_1}{\Delta\lambda} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad (\Delta\lambda \ll \lambda_1, \lambda_2). \quad (4.29)$$

► **Угловая дисперсия дифракционной решётки:**

$$D = \frac{m}{a + b}, \quad (4.30)$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$ — порядок спектра,

$a + b = d$ — период решётки.

► Разрешающая сила дифракционной решётки:

$$R = mN, \quad (4.31)$$

где N — полное число её штрихов.

Единицы измерения

- Период решётки и длина волны света измеряются в **метрах**:

$$[d] = [\lambda] = \text{м.}$$

- Угловая дисперсия измеряется в **радианах на метр**:

$$[D] = \text{рад/м.}$$

Подробное объяснение

На рис. 4.30 изображено 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. Смысл названия «период» заключается в том, что дифракционную решётку можно построить, транслируя совокупность щели и непрозрачной полосы в перпендикулярном к ним направлении вправо и влево вдоль плоскости, в которой они расположены.

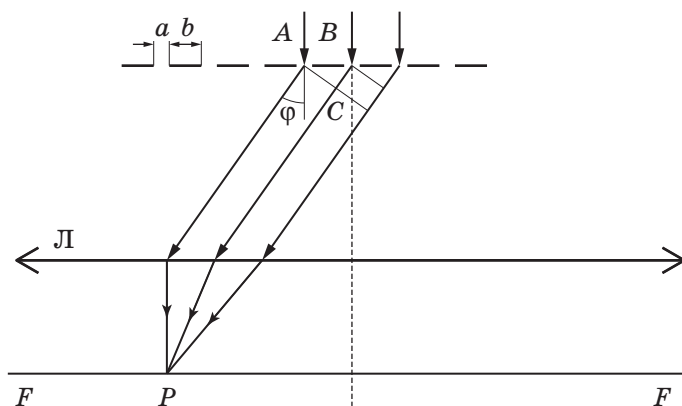


рис. 4.30

На рис. 4.30 показан ход лучей через решётку. Дифракция света наблюдается на каждой из щелей. Параллельные лучи, прошедшие через разные щели и отклонившиеся на угол ϕ , 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 лучей, прошедших через две соседние щели A и B , составляет целое число длин волн:

$$BC = d \sin \varphi = m\lambda.$$

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, а условие максимума интенсивности при дифракции света на дифракционной решётке приобретает вид (4.27).

Эта формула показывает, что разным длинам волн λ соответствуют разные углы φ . Это позволяет использовать дифракционную решётку в качестве *спектрального прибора*.

Спектральный прибор служит для анализа падающего на него света. Если свет содержит дискретный набор длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots$, то соответствующие им спектральные линии располагаются на экране (или в поле зрения окуляра прибора) отдельно друг от друга. Чем меньше различаются длины волн, тем ближе друг к другу спектральные линии.

Два луча, разность длин волн которых $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, расходятся в спектральном приборе на угол $\Delta\varphi$ (рис. 4.31). Этот угол тем больше, чем больше *угловая дисперсия* — одна из характеристик прибора, определяемая формулой (4.28).

Угловая дисперсия численно равна углу $\Delta\varphi$, на который расходятся два луча, различающиеся длиной волны на единицу. В качестве такой единицы на практике обычно используется *1 ангстрем* ($\text{\AA}$):

$$\Delta\lambda = 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м.}$$

Можно показать, что угловая дисперсия дифракционной решётки выражается формулой (4.30).

Дифракционную решётку изготавливают из стеклянной пластинки, на которую тонким алмазным резцом наносят параллельные штрихи, между которыми остаются прозрачные для света полоски. Лучшие решётки имеют ширину до 15 см и содержат около тысячи штрихов на каждый миллиметр её ширины.

Высокой плотности штрихов следует добиваться, поскольку, согласно (4.30), угловая дисперсия дифракционной решётки тем больше, чем меньше её период. Спектральные линии, имеющие

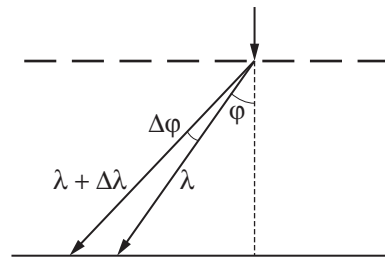


рис. 4.31

близкие значения длин волн, с уменьшением периода d располагаются на экране прибора дальше друг от друга, т. е. условия их наблюдения при этом улучшаются. Угловая дисперсия возрастает также с увеличением порядка спектра m .

Второй характеристикой спектрального прибора является его *разрешающая сила*.

Рассмотрим две спектральные линии, соответствующие двум близким длинам волн λ_1 и $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda$ ($\Delta\lambda \ll \lambda_1, \lambda_2$, рис. 4.32). Ин-

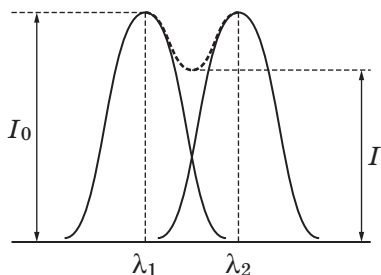


рис. 4.32

тенсивность (или яркость) каждой линии изменяется от нуля по краям линии до некоторого максимального значения I_0 в её середине. Близко расположенные линии могут частично перекрываться своими размытыми частями. На экране они будут видны отдельно, если суммарная интенсивность света I в промежутке между линиями (в центре картины) будет меньше

интенсивности I_0 каждой из линий не менее чем на 20 %. В противном случае они сливаются в одну широкую линию.

Расстояние между максимумами спектральных линий λ_1 и λ_2 на экране спектрального прибора определяется его угловой дисперсией, а острота максимумов — разрешающей силой: чем она больше, тем уже и острее максимумы.

Разрешающая сила дифракционной решётки выражается формулой (4.31). Разрешающую силу дифракционной решётки можно повысить, увеличивая число штрихов N . Это можно сделать только путём увеличения её ширины, если плотность штрихов решётки уже доведена до технически достижимого предела.

Примеры решения задач



Постоянная дифракционной решётки, установленной в спектрометре, $d = 2$ мкм. Под каким углом к оси коллиматора следует установить зрительную трубу для наблюдения спектральной линии, соответствующей длине волны $\lambda = 410$ нм?

► Решение. Согласно (4.27), свет с длиной волны λ , пройдя через дифракционную решётку, отклоняется от своего первоначального направления на углы, удовлетворяющие условию:

$$d \sin \varphi_m = m\lambda,$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$ — порядок спектра.

По таблице обратных тригонометрических функций найдём значения углов для $m = 1, \dots, 4$:

$$\varphi_m = \arcsin \frac{m\lambda}{d}.$$

► Ответ. $\varphi_1 = 11^\circ 50'$, $\varphi_2 = 24^\circ 12'$, $\varphi_3 = 37^\circ 57'$, $\varphi_4 = 55^\circ 04'$.

ОГЭ

Дифракционная решётка содержит $N = 100$ штрихов на $l = 1$ мм длины. Определить длину волны монохроматического света, падающего на решётку нормально, если угол между двумя спектрами первого порядка $\alpha = 8^\circ$.

► Решение.

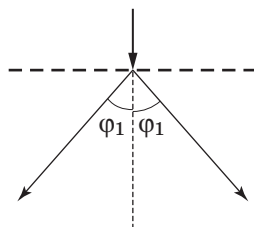
На рисунке показаны лучи, образующие спектр первого порядка. Согласно (4.27), при $m = 1$:

$$d \sin \varphi_1 = \lambda.$$

По условию задачи $\varphi_1 = \frac{\alpha}{2}$, $d = \frac{l}{N}$.

Тогда

$$\lambda = \frac{l}{N} \sin \frac{\alpha}{2}.$$



► Ответ. $\lambda = 0,7$ мкм.

ЕГЭ

Спектры дифракционной решётки второго и третьего порядков в видимой области частично перекрываются. Какой длине волны в спектре третьего порядка соответствует $\lambda = 700$ нм в спектре второго порядка?

► Решение. При дифракции света на дифракционной решётке лучи с большей длиной волны отклоняются на больший угол. Из (4.27) следует, что лучи с разными длинами волн из спектров соседних порядков — m -го и $(m + 1)$ -го — могут идти по одному и тому же направлению. Тогда, приравняв правые части уравнений, записанных для 2-го и 3-го порядков, получим уравнение:

$$2\lambda_2 = 3\lambda_3,$$

где $\lambda_2 = \lambda$ — заданная в условии задачи длина волны во 2-м порядке, λ_3 — искомая длина волны в спектре 3-го порядка. Отсюда

$$\lambda_3 = \frac{2}{3}\lambda.$$

► Ответ. $\lambda_3 = 467$ нм.

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 (слово *relativ* 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

определения и основные формулы

- ▮ **Релятивистская механика** — раздел теории относительности, в котором рассматривается движение материальных тел со скоростями, близкими к скорости света.
- ▮ **Инерциальная система отсчёта** — система отсчёта, относительно которой тело покоится или движется с постоянной скоростью, если сумма приложенных к нему сил равна нулю.
- ▮ **Принцип постоянства скорости света.** В любой инерциальной системе отсчёта скорость света имеет одно и то же значение.
- ▮ **Принцип относительности Эйнштейна.** Все явления природы относительно любой инерциальной системы отсчёта протекают одинаковым образом и описываются одинаковыми законами.

Подробное объяснение

Идейную сторону специальной теории относительности можно понять, обратившись к истокам классической механики.

Рассмотрим две инерциальные системы отсчёта K и K' , одна из которых — система K — «неподвижна», а другая — система K' — движется относительно неё со скоростью V в направлении оси X (рис. 4.33). Координаты какого-либо тела (материальной точки M)

в системах отсчёта K и K' связаны друг с другом формулами *преобразования Галилея* (1.28).

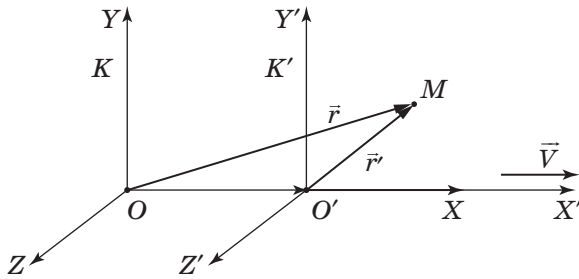


рис. 4.33

Следуя Эйнштейну, свяжем систему отсчёта K с полотном железной дороги, а систему K' — с поездом, идущим по ней с постоянной скоростью V . Пассажир поезда, перемещающийся в том же направлении со скоростью u , по закону сложения скоростей имеет относительно полотна дороги скорость

$$v = u + V. \quad (4.32)$$

Представим теперь, что вдоль полотна дороги идёт луч света, скорость которого известна наблюдателю, стоящему у обочины дороги, и составляет величину $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Пассажир поезда, согласно (4.32), должен обнаружить, что луч света имеет скорость u , меньшую на величину скорости поезда:

$$u = c - V.$$

Несмотря на то, что c гораздо больше V ($c \gg V$), пассажир может измерить эту скорость, подтвердив или опровергнув соотношение (4.32), полученное в классической механике.

В конце XIX века американский физик А. Майкельсон построил специальный интерферометр, с помощью которого можно было обнаружить столь малое изменение скорости света. Опыт, проделанный Майкельсоном, показал, что никакого изменения скорости света в «движущейся» системе отсчёта не наблюдается. Результат этого опыта нашёл в физике выражение в виде *принципа постоянства скорости света*, который явился одним из постулатов специальной теории относительности.

Принцип относительности Галилея утверждает, что *законы механики Ньютона* выполняются в любой инерциальной системе отсчёта. Эйнштейн сформулировал более общий принцип, согласно которому в инерциальных системах выполняются *все законы природы*

и не существует эксперимента, позволяющего, находясь в такой системе, измерить её скорость.

Формулировка этого принципа к началу XX века стала естественной, поскольку развитие созданной незадолго до этого электродинамики показало, что одной механики недостаточно для описания всех физических явлений.

Принцип относительности Эйнштейна и принцип постоянства скорости света лежат в основе специальной теории относительности.

4.4.2. Относительность одновременности и пространственного расстояния

определения и основные формулы

- 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 в движущейся системе отсчёта K' , взятой в направлении её движения.

Подробное объяснение

Обратимся снова к поезду, идущему со скоростью V по железной дороге, и представим себе, что в точках A и B в рельсы ударили две молнии (рис. 4.34).

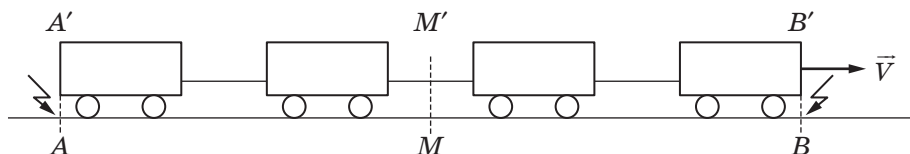


рис. 4.34

Если оба удара произошли одновременно, то в этом можно убедиться, наблюдая их из средней точки M отрезка AB (например, воспользовавшись двумя зеркалами, расположенными в этой точке под углом 90° друг к другу и отражающими лучи из A и B в направлении наблюдателя, который смотрит на них, находясь сбоку от полотна дороги). Будут ли эти события одновременны и с точки зрения наблюдателя, находящегося в поезде? Ответ на этот вопрос отрицательный.

Событиям A и B соответствуют точки A' и B' на рис. 4.34. Пусть M' — средняя точка отрезка $A'B'$ движущегося поезда. Хотя эта точка

в момент удара молний, если наблюдать с полотна дороги, и совпадает с точкой M , она движется со скоростью поезда V вправо. Если бы наблюдатель, находящийся в поезде в точке M' , не имел этой скорости, то он продолжал бы оставаться в точке M . Тогда световые лучи от ударов молний в точках A и B достигли бы его одновременно, т. е. оба эти луча встретились бы в том месте, где он находится. Однако в действительности он движется вместе с поездом навстречу лучу, идущему из точки B' , и по световому лучу, идущему из точки A' . Следовательно, наблюдатель увидит световой луч из B' ранее, чем луч из A' . Для него удар молнии в B' произошёл раньше удара молнии в A' . Мы приходим к важному выводу: события, одновременные относительно полотна железной дороги, не являются одновременными по отношению к поезду и наоборот (относительность одновременности); всякое тело отсчёта (система координат) имеет своё особое время; указание времени имеет смысл лишь тогда, когда указывается тело отсчёта, к которому оно относится.

До появления теории относительности физика молчаливо принимала, что время абсолютно и не зависит от состояния движения тела отсчёта. Но мы только что видели, что это предположение несовместимо с наиболее естественным определением одновременности — если наблюдатель воспринимает два события одновременно, то они произошли одновременно.

Рассмотрим теперь какие-либо две точки движущегося поезда, например середины первого и двадцатого вагонов, и выясним, каково расстояние между этими точками. Для измерения расстояния необходимо тело отсчёта, относительно которого измеряется расстояние. Если за тело отсчёта принять сам поезд, то расстояние можно найти, откладывая масштаб (линейку) вдоль пола вагона от одной отмеченной точки до другой. Число, показывающее, сколько раз отложен масштаб, и есть искомое расстояние.

Чтобы измерить расстояние между соответствующими точками на полотне железной дороги, мы должны использовать следующий приём. Пусть A' и B' — две точки движущегося поезда, расстояние между которыми требуется определить. Сначала нужно каким-либо образом отметить точки A и B полотна железной дороги, с которыми совпадают точки поезда A' и B' в определённый момент времени t (при наблюдении с полотна дороги), а затем воспользоваться масштабной линейкой, как мы это делали в поезде. Отметить эти точки на рельсах можно, например, с помощью гипотетических молний, одновременно ударяющих в точках A и B по часам неподвижного наблюдателя, стоящего у полотна дороги. Результат этого

последнего измерения не совпадёт с результатом первого. Следовательно, при измерении с полотна железной дороги длина поезда окажется иной, чем при измерении в самом поезде. Это обстоятельство является следствием рассмотренной выше относительности одновременности.

4.4.3. Преобразование Лоренца

Определения и основные формулы

► Формулы преобразования Лоренца:

$$\begin{aligned}x' &= \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}}, \\y' &= y, \\z' &= z, \\t' &= \frac{t - \left(\frac{V}{c^2}\right)x}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}},\end{aligned}\tag{4.33}$$

где x, y, z, t — координаты тела и время в системе отсчёта K ,
 x', y', z', t' — координаты тела и время в системе отсчёта K' ,
 V — скорость системы отсчёта K' относительно системы отсчёта K ,
 c — скорость света.

Единицы измерения

► Координаты измеряются в метрах:

$$[x] = [x'] = \text{м}.$$

► Скорость измеряется в метрах в секунду:

$$[V] = [c] = \text{м/с}.$$

Подробное объяснение

В рамках представлений классической механики принцип постоянства скорости света и принцип относительности противоречат друг другу. Возникает вопрос: какие изменения надо ввести в формулы преобразования Галилея, чтобы устранить это кажущееся противоречие. Выше мы ознакомились с понятиями места и времени

какого-либо события относительно поезда и относительно полотна дороги. Как найти место и время события относительно поезда, если известны место и время этого события относительно полотна железной дороги? В точной формулировке задача сводится к следующему: каковы значения координат и времени x', y', z', t' события относительно системы отсчёта K' , если заданы значения координат и времени x, y, z, t этого события относительно системы отсчёта K ? Эта задача для приведённого на рис. 4.33 пространственного расположения систем координат решается уравнениями (4.33).

Они называются *преобразованием Лоренца*. Преобразование Галилея (1.28) выводится из преобразования Лоренца, если в последнем скорость света устремить к бесконечности ($c \rightarrow \infty$).

Справедливость закона распространения света в пустоте для систем отсчёта K и K' при преобразовании Лоренца легко видеть из следующего примера. Пусть вдоль оси X посылается световой сигнал, который распространяется согласно уравнению

$$x = ct,$$

т. е. со скоростью c . Согласно уравнениям преобразования Лоренца, это соотношение между x и t обуславливает соотношение между x' и t' . В самом деле, если в первое и четвёртое уравнения (4.33) подставить ct вместо x , будем иметь

$$x' = \frac{(c - V)t}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}}, \quad t' = \frac{\left(1 - \frac{V}{c}\right)t}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}},$$

откуда, умножив второе из уравнений на c , получим

$$x' = ct'.$$

Это уравнение описывает распространение света, когда оно отнесено к системе отсчёта K' . Таким образом, скорость света равна c и относительно системы K' . Аналогичный результат может быть получен и для световых лучей, распространяющихся в любом другом направлении, поскольку уравнения преобразования Лоренца выведены в предположении именно этого результата.

4.4.4. Закон сложения скоростей. Опыт Физо

определения и основные формулы

► Закон сложения скоростей в классической механике:

$$v = u + V, \quad (4.34)$$

где v — скорость тела относительно системы отсчёта K ,
 u — скорость тела относительно системы отсчёта K' ,
 V — скорость системы отсчёта K' относительно системы отсчёта K .

► **Закон сложения скоростей в релятивистской механике:**

$$v = \frac{u + V}{1 + \frac{uV}{c^2}}. \quad (4.35)$$

Единицы измерения

► Скорости тел измеряются в **метрах в секунду**:

$$[v] = [u] = [V] = \text{м/с}.$$

Подробное объяснение

В классической механике закон сложения скоростей гласит, что если пассажир поезда, движущегося со скоростью V , перемещается в направлении его движения со скоростью u , то скорость пассажира v относительно полотна дороги, согласно (4.34), будет равна сумме этих скоростей.

Очевидно, это уравнение должно быть приведено в теории относительности к такому виду, чтобы оно удовлетворяло обоим принципам, положенным в её основу. Воспользовавшись формулами преобразования Лоренца (4.33), можно получить *закон сложения скоростей* в релятивистской механике. Он имеет вид (4.35).

Этот закон удовлетворяет постулатам теории относительности. Скорость света, равная c относительно движущегося вагона, измеренная наблюдателем, находящимся на платформе, тоже оказывается равной c :

$$v = \frac{c + V}{1 + \frac{cV}{c^2}} = c.$$

Следовательно, в любой инерциальной системе отсчёта скорость света имеет одно и то же значение.

Проверка уравнения (4.35) была осуществлена в эксперименте, поставленном Арманом Физо. Этот эксперимент решает следующий вопрос. В покоящейся жидкости свет распространяется с определённой скоростью u .

С какой скоростью свет распространяется в жидкости, если она течёт в трубе в том же направлении со скоростью V (рис. 4.35)?

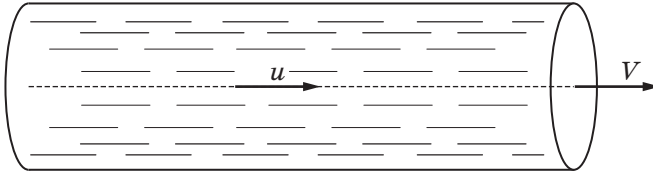


рис. 4.35

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. Труба играет при этом роль полотна железной дороги, т. е. системы отсчёта K , жидкость — роль вагона, т. е. системы отсчёта K' , луч света — роль человека, движущегося вдоль вагона. Таким образом, скорость света относительно трубы выразится либо уравнением (4.34), либо уравнением (4.35), в зависимости от того, соответствует ли действительности преобразование Галилея или преобразование Лоренца.

Эксперимент решает вопрос в пользу уравнения (4.35), полученного в теории относительности. Влияние скорости течения жидкости V на распространение света, согласно последним измерениям, выражается этим уравнением с погрешностью, меньшей 1 %.

Примеры решения задач



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 произойдёт столкновение?

► Решение.

Систему отсчёта свяжем с первой частицей. Тогда скорость сближения частиц V будет равна сумме скоростей частиц. В релятивистском случае, согласно (4.35),

$$V = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_2 v_1}{c^2}} = \frac{2v}{1 + \frac{v^2}{c^2}}. \quad \begin{array}{cc} \text{O} \xrightarrow{v_1} & \xleftarrow{v_2} \text{O} \end{array}$$

Расстояние l частицы преодолеют за время

$$t = \frac{l}{V}.$$

► Ответ. $t = 38$ нс.

ЕГЭ

На ракете, летящей со скоростью $V = 0,9 \cdot c$, установлен ускоритель, сообщаящий частицам скорости $u = 0,8 \cdot c$ относительно ракеты (по направлению её движения). Найти скорость v частиц в системе отсчёта, связанной с неподвижными звёздами. Решить задачу для случая, когда частицы движутся в противоположную сторону.

► Решение. Воспользуемся законом сложения скоростей в релятивистской механике (4.35). Тогда

$$v_1 = \frac{u + V}{1 + \frac{u \cdot V}{c^2}} = 0,99 \cdot c,$$

где c — скорость света.

Если частицы движутся в направлении, обратном направлению движения ракеты, скорость u нужно взять с противоположным знаком:

$$v_2 = \frac{V - u}{1 - \frac{u \cdot V}{c^2}} = 0,36 \cdot c.$$

► Ответ. $v_1 = 2,96 \cdot 10^8$ м/с, $v_2 = 1,07 \cdot 10^8$ м/с.

4.4.5. Масса и энергия в специальной теории относительности

определения и основные формулы

► **Энергия частицы**, движущейся со скоростью v :

$$W = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}, \quad (4.36)$$

где m — масса частицы,
 c — скорость света.

► **Энергия покоящегося тела** массой m (формула Эйнштейна):

$$W = mc^2. \quad (4.37)$$

► **Энергия, выделяемая при распаде ядер атомов радиоактивных элементов:**

$$\Delta W = \Delta m \cdot c^2, \quad (4.38)$$

где Δm — **дефект массы** — разность между массой исходного ядра и массой ядер продуктов деления.

Единицы измерения

- Масса измеряется в **килограммах**:

$$[m] = \text{кг.}$$

- Энергия измеряется в **джоулях**:

$$[W] = \text{Дж.}$$

- Скорость измеряется в **метрах в секунду**:

$$[v] = [c] = \text{м/с.}$$

Подробное объяснение

Классическая механика, применимость которой на протяжении нескольких веков, прошедших после её создания, не вызывала сомнений, нуждается в модификации, чтобы соответствовать требованиям теории относительности. Эта модификация касается законов быстрых движений, когда скорости тел приближаются к скорости света. Такими телами являются электроны или ионы, ускоренные на 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.

Мы будем здесь говорить об энергии и массе тел. Согласно релятивистской механике энергия свободной частицы массой m , движущейся со скоростью v , уже не равна $\frac{mv^2}{2}$, а даётся выражением (4.36), в котором масса частицы m определяется в системе отсчёта, относительно которой она покоится. В релятивистской механике её называют *массой покоя*.

Это выражение становится бесконечным, когда скорость частицы v приближается к скорости света c . Следовательно, скорость любого тела будет оставаться меньшей скорости света, как бы велика ни была энергия, затраченная на его ускорение.

В классической физике существовало два фундаментальных закона сохранения — *закон сохранения энергии* и *закон сохранения массы*. Оба эти закона считались независимыми друг от друга. Теория относительности объединила их в один закон.

Пусть тело массой m , движущееся со скоростью v , получает в форме излучения энергию W_0 без изменения своей скорости. Энергия тела, согласно теории относительности, возрастает при этом на величину

$$\frac{W_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}},$$

а его полная энергия, с учетом (4.36), будет

$$W = \frac{\left(m + \frac{W_0}{c^2}\right)c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}.$$

Наше тело обладает теперь такой же энергией, как и тело, движущееся со скоростью v и имеющее массу $m + \frac{W_0}{c^2}$. Можно сказать, что если тело получает энергию W_0 , то его инертная масса возрастает на $\frac{W_0}{c^2}$, — *инертная масса тела не является постоянной, а изменяется с энергией тела.*

Инертная масса системы тел может рассматриваться как мера энергии этой системы. Закон сохранения массы совпадает с законом сохранения энергии и выполняется потому, что система не получает и не отдает энергию.

Раскрывая скобки в последнем выражении, получаем

$$W = \frac{mc^2 + W_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}},$$

откуда следует, что до получения порции энергии W_0 (в системе отсчёта, относительно которой тело покоится, т. е. при $v = 0$) покоящееся тело массой m обладает энергией

$$W = mc^2.$$

Эта формула носит название *формулы Эйнштейна*. Из неё следует, что «исчезновение» массы должно сопровождаться «выделением» энергии в количестве, равном произведению массы на квадрат скорости света. Таким образом, вещество может превращаться в энергию.

Пример исчезновения массы — аннигиляция электрона и позитрона. Позитрон — это электрон с положительным зарядом. При столкновении они аннигилируют друг с другом, превращаясь в два рентгеновских фотона.

В силу того, что скорость света $c = 3 \cdot 10^8$ 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 Δm , называемую *дефектом массы*, а выделяемая энергия дается уравнением (4.38).

Подобное уменьшение массы наблюдается и в ядерных реакциях синтеза. Так, масса ядра гелия, образовавшегося при слиянии двух ядер атомов тяжёлого водорода, меньше суммы масс ядер исходных атомов. Верно и обратное утверждение — кинетическая энергия может превращаться в массу. При столкновении быстрой частицы с ядром атома или протоном часть её кинетической энергии переходит в энергию (массу) покоя новых частиц, которые при этом рождаются.

Формула (4.38) служит рабочей формулой при расчётах энергии ядерных реакций, осуществляемых в настоящее время в лабораториях ученых и в промышленных установках — на атомных электростанциях.

Сравнивая формулы (4.36) и (4.37), можно заключить, что с увеличением скорости тела его масса возрастает по закону

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}, \quad (4.39)$$

где через m_0 обозначена масса тела, покоящегося в данной системе отсчета.

Эта формула используется при проектировании ускорителей заряженных частиц, о которых речь шла в 3.3.5.

Примеры решения задач



Найти скорость электрона v , если его полная энергия в $n = 10$ раз больше энергии покоя $W = nW_0$.

► Решение. Согласно (4.36) полная энергия частицы, движущейся по скоростью v ,

$$W = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (1)$$

Энергия покоящейся частицы, согласно (4.37),

$$W_0 = mc^2. \quad (2)$$

По условию задачи

$$W = nW_0. \quad (3)$$

Подставляя (1) и (2) в (3), получим после преобразований

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{n^2},$$

откуда

$$v = c \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)^{\frac{1}{2}} \approx c \left(1 - \frac{1}{2n^2} \right).$$

► Ответ. $v = 2,985 \cdot 10^8$ м/с.



При делении ядра урана ^{235}U освобождается энергия $W = 200$ МэВ. Найти уменьшение массы вещества Δm , происходящее при делении 1 киломоля урана.

► Решение. Воспользовавшись формулой (4.38), найдём

$$\Delta m_0 = \frac{\Delta W}{c^2},$$

где, по условию задачи, $\Delta W = W$.

Уменьшение массы 1 киломоля урана

$$\Delta m = N_A \cdot \Delta m_0 = \frac{N_A \cdot W}{c^2},$$

где $N_A = 6 \cdot 10^{26}$ 1/кмоль — постоянная Авогадро.

При подстановке численных значений учтём, что

$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

► Ответ. $\Delta m = 0,217$ кг/кмоль.



Солнце ежеминутно излучает энергию $W_0 = 6,5 \cdot 10^{21}$ кВт·ч. Считая излучение Солнца постоянным, найти, за какое время Δt масса его $M_0 = 1,97 \cdot 10^{30}$ уменьшится в $n = 2$ раза?

► Решение. Уменьшение массы Солнца происходит благодаря превращению её в энергию излучения ΔW . Согласно (4.38),

$$\Delta m = \frac{\Delta W}{c^2}. \quad (1)$$

Уменьшение массы

$$\Delta m = M_0 - M, \quad (2)$$

где, по условию задачи, оставшаяся масса Солнца

$$M = \frac{M_0}{n}. \quad (3)$$

Из (1), с учётом (2) и (3), получим

$$\Delta W = \frac{M_0(n-1)}{n} \cdot c^2. \quad (4)$$

Мощность излучения Солнца, по условию задачи,

$$P = \frac{W_0}{\tau},$$

где $\tau = 60$ с.

Искомый промежуток времени Δt найдём, разделив излучённую энергию (4) на мощность:

$$\Delta t = \frac{\Delta W}{P} = \frac{M_0 c^2 (n-1)}{n W_0} \tau.$$

► Ответ. $\Delta t = 7,2 \cdot 10^{12}$ лет.

4.4.6. Закон сохранения импульса и энергии

определения и основные формулы

► **Кинетическая энергия** частицы в теории относительности:

$$K = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - 1 \right) m c^2, \quad (4.40)$$

где m — масса частицы,

v — её скорость.

► **Импульс** частицы:

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}. \quad (4.41)$$

► **Закон сохранения импульса-энергии:**

$$W^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4, \quad (4.42)$$

где W — энергия частицы,

p — её импульс,

c — скорость света.

Единицы измерения

- Масса измеряется в **килограммах**:

$$[m] = \text{кг}.$$

- Скорость измеряется в **метрах в секунду**:

$$[v] = \text{м/с}.$$

- Единица измерения импульса:

$$[p] = \text{кг} \cdot \text{м/с}.$$

- Энергия измеряется в **джоулях**:

$$[K] = [W] = \text{Дж}.$$

Подробное объяснение

В теории относительности определение кинетической энергии совпадает с классическим: кинетическая энергия — это энергия, обусловленная движением частицы. Ее можно найти, вычитая из полной энергии (4.36) энергию покоя (4.37), что приводит к формуле (4.40).

Воспользуемся соотношением $(1 - x)^\alpha \approx 1 - \alpha x$, справедливым при $x \ll 1$. В нашем случае $x = \left(\frac{v}{c}\right)^2$, $\alpha = -\frac{1}{2}$. В пределе малых скоростей ($v \ll c$) получим из (4.40) формулу кинетической энергии частицы в классической механике:

$$K = \frac{mv^2}{2}.$$

Выражение для импульса частицы в теории относительности тоже отличается от классического выражения $p_{\text{кл}} = mv$ и имеет вид (4.41).

В классической механике закон сохранения импульса утверждает, что сумма импульсов N материальных точек, составляющих замкнутую систему, остаётся постоянной при любых взаимодействиях между ними:

$$\sum_{i=1}^N p_{i\text{ кл}} = \text{const.} \quad (4.43)$$

Это уравнение выполняется в любой инерциальной системе отсчёта и удовлетворяет преобразованию Галилея. В релятивистской механике переход от одной инерциальной системы отсчёта к другой осуществляется с помощью преобразования Лоренца. В этом случае сохраняющейся величиной будет сумма

$$\sum_{i=1}^N p_i + \sum_{i=1}^N \frac{W_i}{c} = \text{const}, \quad (4.44)$$

где p_i и W_i — соответственно релятивистские импульс и энергия, определённые уравнениями (4.41) и (4.36).

Таким образом, в теории относительности законы сохранения импульса и энергии перестают быть независимыми и объединяются в единый закон *сохранения импульса-энергии*, выражаемый уравнением (4.44).

Для отдельной частицы массой m это уравнение можно преобразовать к другому виду. Разделив (4.41) на (4.36), получим $\frac{p}{W} = \frac{v}{c^2}$, откуда

$$v = \frac{pc^2}{W}. \quad (4.45)$$

Возводя в квадрат обе части уравнения (4.36), имеем $W^2 - W^2 \frac{v^2}{c^2} = m^2 c^4$. Подставив сюда v из (4.45), получим уравнение (4.42), связывающее W , p и m .

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 лёгкого 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 энергий 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.

В XX веке утвердился новый взгляд, признающий двойственную природу света — волновую и корпускулярную. Впоследствии оказалось, что и вещество, представленное в виде микрочастиц, таких как электроны, протоны, альфа-частицы, может проявлять волновые свойства. Их поведение не подчиняется законам классической механики, а описывается другой механикой — *квантовой*. Над её созданием работали в первой четверти XX века учёные разных стран. Квантовая механика — теория микромира — послужила фундаментом важнейших достижений науки и техники, которые в корне изменили нашу жизнь. Это овладение энергией атома, создание телевидения, новых материалов, лазеров, компьютеров, современных навигационных систем и систем связи и многое другое, с чем

имеет дело современный человек. История развития науки богата событиями и очень интересна.

Основные понятия

Квантовая физика — раздел физики, в котором рассматривается поведение микрочастиц.

Микрочастицы в квантовой физике — частицы, координаты и импульсы которых не могут быть точно определены.

Дискретность физических величин — характерное свойство квантовой физики. Координата, импульс и энергия частицы, которые в классической механике могут принимать непрерывный ряд значений, заменяются квантовыми числами, характеризующими состояние квантовомеханической системы.

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. Третье явление — *фотоэффект* — подробно рассмотрено в настоящем разделе.

5.1.1. Фотоэлектрический эффект

определения и основные формулы

- **Фотоэлектрический эффект** — вырывание электронов с поверхности твёрдых тел под действием света.
- **Фотон** — частица света, существующая только в движении, скорость которого равна скорости света.
- **Энергия фотона:**

$$W_{\text{ф}} = h\nu, \quad (5.1)$$

где ν — частота света, представляемого этим фотоном,

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с — постоянная Планка.

- **Уравнение Эйнштейна** для фотоэффекта:

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}, \quad (5.2)$$

где A — работа выхода электрона из вещества,

m — масса электрона,

$v_{\max}$ — его скорость.

- **Работа выхода** — минимальная энергия, необходимая для извлечения электрона из вещества.

- **Красная граница фотоэффекта** — минимальная частота света, ниже которой фотоэффект не наблюдается:

$$\nu_{\min} = \frac{A}{h}. \quad (5.3)$$

- **Задерживающее напряжение** U_3 — напряжение обратного знака, которое нужно приложить к аноду, чтобы прекратить фототок.

- **Скорость фотоэлектронов:**

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2eU_3}{m}}, \quad (5.4)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона.

Единицы измерения

- Энергия фотона и работа выхода измеряются в **джоулях**:

$$[W_{\phi}] = [A] = \text{Дж.}$$

- Частота фотона измеряется в **герцах**:

$$[\nu] = \text{Гц.}$$

- Масса электрона измеряется в **килограммах**:

$$[m] = \text{кг.}$$

- Задерживающее напряжение измеряется в **вольтах**:

$$[U_3] = \text{В.}$$

Подробное объяснение

Фотоэлектрический эффект (фотоэффект) был открыт в 1887 г. немецким физиком Генрихом Герцем. Фотоэффект изучали итальянский физик А. Риги, немецкие — В. Гальвакс и Ф. Ленард, русский физик А. Г. Столетов.

Схема экспериментальной установки, которую они использовали, 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 ν и интенсивность света I можно изменять с помощью светофильтров и диафрагмы, расположенных на его пути.

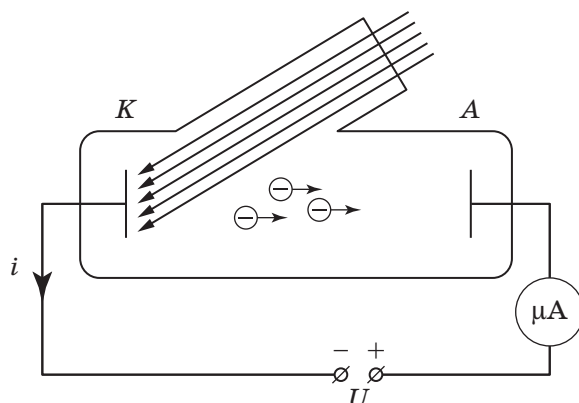


рис. 5.1

Опыт показывает, что 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 (рис. 5.2).

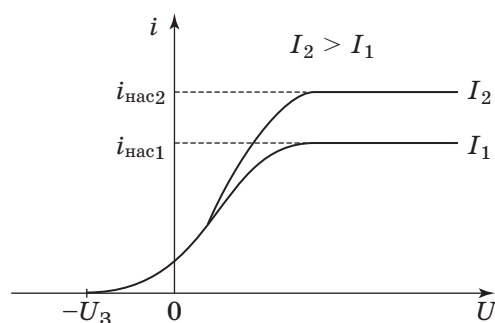


рис. 5.2

При освещённом катоде ток течёт и при отсутствии ускоряющего напряжения U . Его можно свести к нулю, если на положительный электрод — анод — подать напряжение обратной

полярности — *задерживающее напряжение* U_3 . Воспользовавшись тем, что кинетическая энергия электрона, покидающего катод, расходуется на совершение работы eU_3 по преодолению кулоновской силы, задерживающей его движение, можно записать:

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_3, \quad (5.5)$$

откуда можно найти скорость фотоэлектронов (5.4).

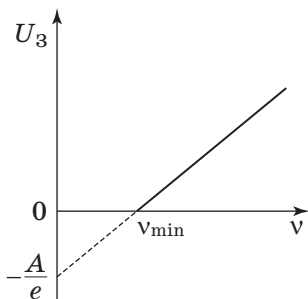


рис. 5.3

Задерживающее напряжение зависит от частоты падающего света. График этой зависимости изображается прямой линией, проходящей через точку с абсциссой $\nu_{\min}$ (рис. 5.3). При меньших частотах ($\nu < \nu_{\min}$) фототок прекращается даже при отсутствии между электродами задерживающего напряжения.

Проведённые опыты позволили установить следующие 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 ν , превышающих некоторую минимальную частоту $\nu_{\min}$, называемую *красной границей фотоэффекта*:

$$\nu > \nu_{\min}.$$

Закономерности фотоэффекта невозможно объяснить, используя волновые представления о природе света. В частности, поскольку энергия электромагнитной волны (интенсивность света I) пропорциональна квадрату её амплитуды $I \sim E_{\max}^2$, увеличение амплитуды должно было бы привести к увеличению скорости фотоэлектронов, чего в действительности не наблюдается. Аналогично нельзя объяснить безынерционность фотоэффекта и существование для него красной границы.

Теория фотоэффекта была создана в 1905 г. А. Эйнштейном. Она основана на предположении, что пучок света, вызывающий

фотоэффект, представляет собой поток частиц — *квантов света*, или *фотонов*, — каждый из которых, согласно М. Планку, несёт энергию, выражаемую формулой (5.1).

При падении фотонов на поверхность твёрдого тела они взаимодействуют с электронами, входящими в состав его атомов. Этот процесс описывается уравнением (5.2). Энергия фотона расходуется на совершение работы выхода электрона и сообщение ему кинетической энергии.

Теория Эйнштейна позволяет объяснить все наблюдаемые закономерности фотоэффекта. Согласно ей, увеличение интенсивности падающего света равносильно увеличению числа фотонов в пучке, а следовательно, и числа выбитых электронов. При этом ток насыщения пропорционален интенсивности света, а энергия каждого электрона остаётся неизменной и может возрасти только с увеличением частоты света.

Из уравнения (5.2) следует и существование красной границы фотоэффекта — минимальной частоты света, при которой кинетическая энергия покидающих тело электронов обращается в нуль. Тогда $h\nu_{\min} = A$, откуда следует уравнение (5.3).

Фотоны, имеющие меньшую частоту $\nu < \nu_{\min}$, уже не смогут выбить ни одного электрона, сколь велико ни было бы их число, т. е. интенсивность падающего света.

Уравнение (5.2) с учётом (5.5) можно записать в виде, показывающем линейную зависимость задерживающего напряжения от ν (рис. 5.3):

$$h\nu = A + eU_s, \quad (5.6)$$

откуда

$$U_s = \frac{h}{e} \nu - \frac{A}{e}.$$

Это уравнение позволяет найти работу выхода электрона. Экстраполируя график зависимости U_s от ν до пересечения его с осью ординат, получим в этой точке величину отношения $\frac{A}{e}$.

Фотоэффект демонстрирует корпускулярные свойства света, подтверждая гипотезу о световых квантах, выдвинутую М. Планком для объяснения законов теплового излучения.

Примеры решения задач



Красная граница фотоэффекта для ртути $\lambda_{\max} = 275$ нм. Найти работу выхода A электрона и максимальную скорость $v_{\max}$

электронов, вырывааемых из ртути светом с длиной волны $\lambda = 180$ нм.

► Решение. Воспользуемся уравнением Эйнштейна для фотоэффекта (5.2):

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}. \quad (1)$$

Работа выхода электрона связана с красной границей фотоэффекта соотношением (5.3):

$$A = h\nu_{\min} = \frac{hc}{\lambda_{\max}}, \quad (2)$$

поскольку, согласно (3.67),

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \quad (3)$$

где c — скорость света.

Подставляя (2) в (1) и учитывая (3), найдём после преобразований

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2hc}{m} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\max}} \right)}. \quad (4)$$

► Ответ. $A = 4,51$ эВ; $v_{\max} = 9 \cdot 10^5$ м/с.

ОГЭ

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 $U_{\text{з1}} = 6,6$ В, а вырывающиеся светом, частота которого $\nu_2 = 4,6 \cdot 10^{15}$ Гц, — напряжением $U_{\text{з2}} = 16,5$ В.

► Решение. Запишем уравнение (5.6) для указанных в условии задачи частот:

$$h\nu_1 = A + eU_{\text{з1}}, \quad (1)$$

$$h\nu_2 = A + eU_{\text{з2}}. \quad (2)$$

Вычитая почленно уравнение (1) из уравнения (2), найдём

$$h = \frac{e(U_{\text{з2}} - U_{\text{з1}})}{\nu_2 - \nu_1}.$$

► Ответ. $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

ЕГЭ

Никелевый фотокатод освещается светом с длиной волны $\lambda = 200$ нм. Покидающие его электроны попадают в однородное магнитное поле с индукцией $B = 10^{-4}$ Тл, двигаясь

перпендикулярно его силовым линиям. Каков максимальный радиус окружности R , по которой они движутся? Красная граница фотоэффекта для никеля $\lambda_{\max} = 248$ нм.

- Решение. В однородном магнитном поле, согласно (3.48), электрон движется по окружности радиусом

$$R = \frac{mv}{eB}. \quad (1)$$

Подставляя в (1) формулу (4), полученную в задаче 1 (стр. 280), найдём:

$$R = \frac{1}{eB} \sqrt{2m \cdot hc \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\max}} \right)},$$

e и m — заряд и масса электрона.

- Ответ. $R = 3,7$ см.

5.1.2. Опыт Боте. Фотоны

определения и основные формулы

- **Рентгеновское излучение** — электромагнитное излучение с длинами волн от 0,01 до 0,1 нм.
- **Рентгеновская флуоресценция** — испускание вторичного рентгеновского излучения телом, предварительно подверженным действию рентгеновских лучей.

Единицы измерения

- Длина волны рентгеновского излучения измеряется в **нанометрах**:

$$[\lambda] = \text{нм}, 1 \text{ нм}.$$

Подробное объяснение

Рассмотренные выше явления свидетельствуют о том, что свет проявляет двойственную природу: волновую — при распространении в пространстве и корпускулярную — при взаимодействии с веществом. Можно, однако, считать, что и при распространении свет представляет собой совокупность отдельных фотонов. Это было показано в 1924 г. немецким физиком Гансом Боте в опыте по *рентгеновской флуоресценции* (см. Приложение 3).

Схема опыта приведена на рис. 5.4. Пучок рентгеновских лучей A направляется на тонкую металлическую пластинку B , в результате чего она сама становится их источником, испуская вторичные рентгеновские фотоны. Слева и справа расположены счётчики Гейгера C , способные фиксировать их количество.

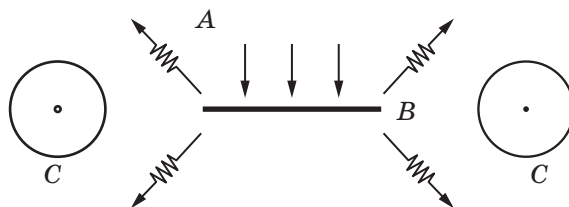


рис. 5.4

Счётчик Гейгера представляет собой наполненный газом при небольшом давлении цилиндр C , по оси которого проходит нить DF — тонкая металлическая проволока (рис. 5.5). Между нитью и цилиндром с помощью источника тока создаётся электрическое поле такой напряжённости, при которой в газе может возникнуть электрический ток, т. е. начаться самостоятельный разряд. Ток возникает, если в пространстве между электродами появляются свободные заряды — электроны и положительные ионы, которые образуются в результате ионизации молекул газа под действием рентгеновского излучения. В электрическом поле они движутся ускоренно и за время между двумя последовательными соударениями с молекулами газа приобретают энергию, достаточную для их ионизации. При столкновении ионов с молекулами появляются новые ионы и электроны, которые участвуют в новых актах ионизации молекул. Ток в цепи I резко возрастает, в результате чего увеличивается и напряжение $U_R = IR$ на включенном в цепь резисторе R . Поскольку сумма напряжений на резисторе U_R и счётчике Гейгера $U_{\text{сч}}$ равна ЭДС источника

$$\mathcal{E} = U_{\text{сч}} + U_R,$$

возрастание U_R ведёт к уменьшению напряжения $U_{\text{сч}}$ между нитью и цилиндром счётчика. При этом самостоятельный разряд прекращается и счётчик готов к приёму следующего рентгеновского фотона.

Скачок напряжения на сопротивлении R фиксируется с помощью самописца на движущейся бумажной ленте. Таким образом, счётчик позволяет подсчитать число попавших в него рентгеновских фотонов.

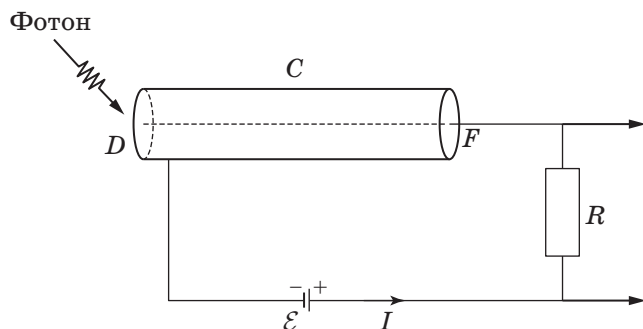


рис. 5.5

Если предположить, что вторичное рентгеновское излучение, исходящее из металлической пластинки B (рис. 5.4), представляет собой сферическую волну, то отметки от правого и левого счётчиков должны появляться на бумажной ленте одновременно — в момент прихода к ним фронта волны. Однако опыт показал, что эти отметки возникали в разные моменты времени и не были согласованы друг с другом. Такой результат можно было объяснить тем, что каждый из счётчиков фиксировал отдельные фотоны, испускаемые вторичным источником в произвольных направлениях. Их и имел в виду А. Эйнштейн, рассматривая фотоэффект.

Фотон — необычная частица: он существует только в движении — со скоростью света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — и не обладает массой покоя. Фотон может рождаться и исчезать, когда вещество излучает или поглощает свет. Это свойство — рождение и исчезновение — характерно для большинства известных в физике элементарных частиц (мезонов, гиперонов и других) и ставит частицу фотон на одно из мест в их ряду.

Примеры решения задач



Полагая среднюю длину волны излучения лампочки накаливания $\lambda = 1,2$ мкм, найти число фотонов N , испускаемых ежесекундно лампочкой мощностью $P = 200$ Вт.

► Решение. За время t испускаемые телом фотоны уносят энергию

$$W = NW_{\text{ф}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{ф}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ — энергия фотона.

Мощность излучения

$$P = \frac{W}{t}. \quad (2)$$

Подставляя (1) в (2), найдём

$$N = \frac{P\lambda \cdot t}{hc}.$$

► Ответ. $N = 1,2 \cdot 10^{21}$.

ОГЭ

С какой скоростью v должен двигаться электрон, чтобы его кинетическая энергия K была равна энергии фотона, которому соответствует длина волны $\lambda = 500$ нм?

► Решение. Энергия фотона, согласно (5.1),

$$W_{\text{ф}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1)$$

где c — скорость света.

Кинетическая энергия электрона, согласно (1.37),

$$K = \frac{m_e v^2}{2}, \quad (2)$$

где m_e — масса электрона.

Приравнявая правые части (1) и (2), найдём

$$v = \sqrt{\frac{2hc}{\lambda \cdot m_e}}.$$

► Ответ. $v = 9,3 \cdot 10^5$ м/с.

ЕГЭ

Под каким напряжением работает рентгеновская трубка, если самые короткие лучи в рентгеновском спектре этой трубки имеют частоту $\nu_{\text{max}} = 10^{19}$ Гц?

► Решение. Механизм возникновения рентгеновских лучей описан в Приложении 3. Электроны, прошедшие ускоряющее напряжение U , отдают свою энергию фотонам, испускаемым с поверхности металла, на которой электроны испытывают торможение. Тогда

$$W_{\text{ф}} = eU, \quad (1)$$

где e — заряд электрона.

Отсюда найдём связь U с частотой фотонов, максимальное значение которой ν_{max} :

$$U = \frac{h\nu_{\text{max}}}{e}.$$

► Ответ. $U = 41$ кВ.

5.1.3. Давление света с корпускулярной точки зрения

определения и основные формулы

- **Давление** — сила F , действующая на единичную площадку S перпендикулярно ей:

$$p = \frac{F}{S}. \quad (5.7)$$

- **Коэффициент отражения света** — отношение числа фотонов $N_{\text{отр}}$, отражённых от поверхности, к числу падающих на неё фотонов N :

$$\rho = \frac{N_{\text{отр}}}{N}.$$

- **Импульс фотона:**

$$p_{\text{ф}} = \frac{W_{\text{ф}}}{c} = \frac{h}{\lambda}, \quad (5.8)$$

где λ — длина волны света,
 c — скорость света.

- **Давление света:**

$$p = w(1 + \rho), \quad (5.9)$$

$w = \frac{W}{V}$ — объёмная плотность энергии электромагнитного излучения.

Единицы измерения

- Давление измеряется в **паскалях**:

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

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

$$[w] = \text{Дж} / \text{м}^3.$$

Подробное объяснение

Одно из экспериментальных подтверждений наличия у фотонов импульса — существование светового давления, рассмотренного нами с точки зрения волновой теории в 3.5.4. С корпускулярной точки зрения давление света на поверхность какого-либо тела, выражаемое формулой (5.7), обусловлено соударением с ней фотонов, которые передают ей свой импульс.

По второму закону Ньютона, сила, действующая на тело,

$$F = \frac{\Delta p_{\Phi}}{\Delta t}, \quad (5.10)$$

где p_{Φ} — импульс фотона.

Часть падающих фотонов поглощается телом, а остальные, подобно упругим шарикам, — отражаются от него зеркально. При нормальном падении каждый отражённый фотон передаёт телу импульс $2p_{\Phi} = 2\frac{h}{\lambda}$, поскольку импульс фотона при отражении изменяется на $-p_{\Phi}$, т. е. $\Delta p_{\Phi} = p_{\Phi} - (-p_{\Phi}) = 2p_{\Phi}$. Каждый поглощённый фотон передаёт этому телу импульс $p_{\Phi} = \frac{h}{\lambda}$ и для него $\Delta p_{\Phi} = p_{\Phi}$.

Поскольку расстояние, пройденное фотоном за время Δt , равно $c\Delta t$, площадке S передадут свой импульс N фотонов, заключённых в объёме $V = c\Delta t \cdot S$ (рис. 5.6). Тогда для отражённых и поглощённых фотонов имеем:

$$\Delta p_{\Phi} = 2N\rho p_{\Phi} + N(1 - \rho)p_{\Phi} = N\frac{h}{\lambda}(1 + \rho),$$

где ρ — коэффициент отражения.

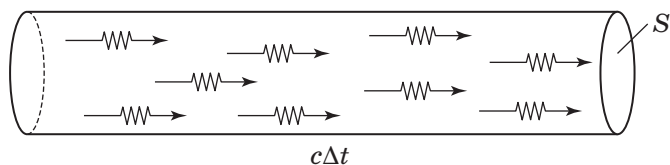


рис. 5.6

Подставляя это выражение в (5.10) и (5.7), получим

$$p = \frac{Nh}{\lambda \Delta t \cdot S}(1 + \rho).$$

Умножим числитель и знаменатель дроби на частоту света ν и учтём, что энергия фотонов $W_{\Phi} = N \cdot h\nu$, а произведение $\lambda \nu_{\text{ин}} = c$. Тогда мы приходим к формуле (5.9), совпадающей с полученной Д. Максвеллом формулой (3.68), согласие которой с экспериментом установлено в опытах П. Н. Лебедева.

Рассмотренные здесь и в разделе «Оптика» явления показывают, что 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	
	Волны	Частицы
Примеры	Интерференция, дифракция	Фотоэффект, эффект Комптона, тормозное рентгеновское излучение
Энергия	$W = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2}$	$W_\Phi = h\nu$
Импульс	$p = \frac{W}{c}$	$p_\Phi = \frac{h\nu}{c}$

Примеры решения задач

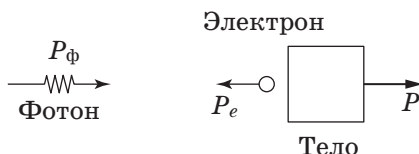


Кванты света с энергией $W_\Phi = 4,9$ эВ вырывают фотоэлектроны из металла с работой выхода $A = 4,5$ эВ. Найти максимальный импульс $p_{\max}$, передаваемый поверхности металла при вылете каждого электрона.

► Решение. Импульс фотона, согласно (5.8),

$$p_\Phi = \frac{W_\Phi}{c}.$$

Столкновение фотона с телом схематически показано на рисунке.



Согласно (1.47), импульс тела после поглощения фотона

$$p_1 = p_\Phi.$$

Электрон, покидающий тело, сообщает ему импульс

$$p_2 = p_e = mv,$$

в результате чего тело приобретает импульс, равный их сумме:

$$p = p_1 + p_2 = \frac{W_\Phi}{c} + mv. \quad (1)$$

Скорость электрона найдём из уравнения (5.2):

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2}{m}(W_{\Phi} - A)}.$$

Подставляя в (1), получим

$$p_{\max} = \frac{1}{c} W_{\Phi} + \sqrt{2m(W_{\Phi} - A)}.$$

► Ответ. $p_{\max} = 3,43 \cdot 10^{-25} \text{ кг} \cdot (\text{м/с})$.



Во сколько раз отличается давление света, производимое на идеально белую поверхность, от давления на идеально чёрную при прочих равных условиях?

► Решение. Давление света, согласно (5.9),

$$p = w(1 + \rho).$$

Поскольку коэффициент отражения от белой поверхности $\rho = 1$, а от чёрной $\rho = 0$, отношение давлений, производимых падающим на них светом,

$$\frac{p_{\text{б}}}{p_{\text{ч}}} = 1 + \rho.$$

► Ответ. На белую поверхность давление в 2 раза больше.

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. Естественнее 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 α -частиц веществом

определения и основные формулы

- ▮ **Атом** — мельчайшая частица вещества, входящая в состав молекул.
- ▮ **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 бóльшую.
- ▮ **Нейтрон** — частица, аналогичная протону, не имеющая заряда.
- ▮ **Альфа-частица (α -частица)** — ядро атома гелия — частица, состоящая из двух протонов и двух нейтронов.

Подробное объяснение

Представление об атоме как мельчайшей частице вещества сформировалось в науке ещё в XVIII веке и основывалось на достижениях в области химии. Строение же атома долгое время оставалось загадкой. В 1897 г. Дж. Дж. Томсон открыл существование электрона, входящего в его состав, и позднее предложил модель атома в виде «пудинга с изюмом», роль изюма в которой играли электроны.

Модель атома Томсона требовала экспериментальной проверки, которая была осуществлена сотрудниками Э. Резерфорда Х. Гейгером и Э. Марсденом. Они поместили тонкую металлическую фольгу на пути узкого пучка α -частиц, источником которых служил радиоактивный препарат (рис. 5.7).

Экран FF был покрыт слоем сернистого цинка, фосфоресцирующего под действием падающих на него заряженных частиц. Каждая частица при попадании на экран давала

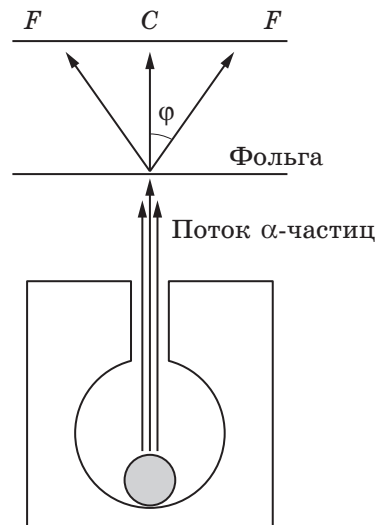


рис. 5.7

вспышку света. Интенсивность пучка α -частиц была столь малой, что можно было визуально наблюдать отдельные вспышки, отмечая места их возникновения относительно средней точки S , куда первоначально направлялся пучок. Оказалось, что некоторые из частиц отклоняются от прямолинейного пути на значительный угол ϕ 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

определения и основные формулы

- ▮ **Спектр излучения** — совокупность лучей света разных длин волн, зависящих от свойств источника.
- ▮ **Линейчатый спектр** — спектр, состоящий из отдельных линий.
- ▮ **Формула Бальмера** для частот линий спектра атома водорода:

$$\nu_{ik} = R \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (5.11)$$

где ν_{ik} — частоты, излучаемые атомом,
 i, k — целые числа ($k > i$),
 R — постоянная Ридберга.

- ▮ **Спектральная серия** — совокупность линий, объединяющихся в группы, сходные друг с другом по своему строению.

Единицы измерения

► Частота измеряется в **герцах**:

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

Подробное объяснение

Стеклянная трубочка с впаянными в неё электродами, заполненная каким-либо газом при низком давлении (рис. 5.8), испускает свет, если между электродами создать разность потенциалов, достаточную для возникновения *самостоятельного разряда*, когда газ ионизуется и проводит электрический ток. Излучение трубочки наблюдают с помощью спектрального прибора, разлагающего пучок света на отдельные лучи разных длин волн, в совокупности образующих *спектр излучения* этого газа. Излучение, которое даёт какой-либо металл, можно наблюдать, создав *электрическую дугу* — газовый разряд между изготовленными из этого металла электродами, поддерживаемый благодаря высокой температуре, развивающейся в пространстве между ними, если электроды сначала привести в контакт друг с другом, а затем немного развести.

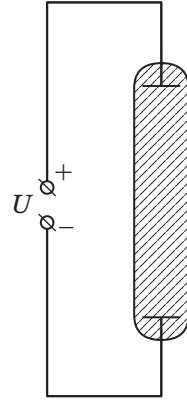


рис. 5.8

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. 5.9). Частоты линий спектра водорода ν_{ik} описываются формулой (5.11), предложенной Бальмером.

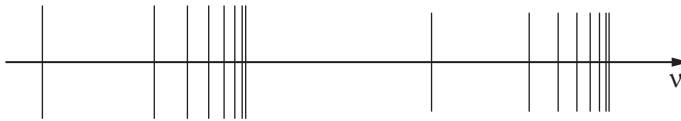


рис. 5.9

Совокупность линий, образующих первую серию — *серию Лаймана*, — соответствует числам $i = 1, k = 2, 3, 4, \dots$ и расположена в ультрафиолетовой области спектра. Далее идут:

- | | |
|-----------------------------|-------------------------|
| $i = 2, k = 3, 4, 5, \dots$ | <i>серия Бальмера,</i> |
| $i = 3, k = 4, 5, 6, \dots$ | <i>серия Пашена,</i> |
| $i = 4, k = 5, 6, 7, \dots$ | <i>серия Брэккетта,</i> |
| $i = 5, k = 6, 7, 8, \dots$ | <i>серия Pfунда.</i> |

Видимый глазом человека диапазон частот занимает серия Бальмера, остальные три серии принадлежат инфракрасной части спектра.

Столь простой формулы, как (5.11), 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 учёного, которому удалось языком цифр описать замечательную закономерность, которую природа как бы специально подарила человеку, осветив ему путь дальнейших исследований.

Примеры решения задач



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?

► Решение. Формула Бальмера (5.11) позволяет вычислить частоты линий спектра атома водорода:

$$\nu_{ik} = R \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{k^2} \right). \quad (1)$$

Длина волны излучения, согласно (3.67),

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

где c — скорость света.

Подставляя (1) в (2), найдём λ . Первая из указанных в условии задачи линий спектра соответствует значениям $i = 2$, $k = 3$:

$$\lambda_{23} = \frac{36c}{5R}.$$

Вторая — значениям $i = 1$, $k = 2$:

$$\lambda_{12} = \frac{4c}{3R}.$$

► Ответ. $\lambda_{23} = 5,4\lambda_{12}$.

5.2.3. Теория Бора для водородоподобного атома

определения и основные формулы

- ▮ **Водородоподобный атом** — атом, лишённый всех электронов, кроме одного.
- ▮ **Стационарные состояния** — состояния атома, в которых он не излучает и не поглощает энергию.
- ▮ **Энергия фотона**, излучаемого атомом при переходе его из одного стационарного состояния в другое:

$$h\nu_{ik} = W_i - W_k, \quad (5.12)$$

где W_i и W_k — энергия электрона в i -м и k -м состояниях атома ($i, k = 1, 2, 3, \dots$),

ν_{ik} — частота спектральной линии, соответствующей переходу $i \rightarrow k$,

h — постоянная Планка.

- ▮ **Момент импульса электрона:**

$$L = p \cdot r, \quad (5.13)$$

$p = m_e v$ — его импульс электрона (m_e — его масса),

r — радиус окружности, по которой он движется.

- ▮ **Радиус орбиты электрона:**

$$r_n = \frac{h^2}{4\pi^2 Z e^2 m_e k_0} \cdot n^2. \quad (5.14)$$

- ▮ **Скорость электрона на орбите:**

$$v_n = k_0 \frac{2\pi Z e^2}{h} \cdot \frac{1}{n}. \quad (5.15)$$

- ▮ **Полная энергия электрона в стационарном состоянии, характеризуемом квантовым числом n :**

$$W_n = -k_0^2 \frac{2\pi^2 Z^2 e^4 m_e}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (5.16)$$

- ▮ **Постоянная Ридберга:**

$$R = k_0^2 \frac{2\pi^2 Z^2 e^4 m_e}{h^3}. \quad (5.17)$$

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

e — заряд электрона,

Z — порядковый номер элемента в таблице Менделеева.

Единицы измерения

- Энергия электрона измеряется в джоулях:

$$[W] = \text{Дж.}$$

- Единица измерения момента импульса — джоуль-секунда:

$$[L] = \text{Дж} \cdot \text{с.}$$

Подробное объяснение

Модель атома, предложенная Резерфордом, оказала существенное влияние на дальнейшее развитие физики микромира, поскольку легла в основу теории Бора для водородоподобного атома. Согласно этой модели, 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 такой 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. *Водородоподобными* атомами могут служить ионы гелия He^+ , лития Li^{++} , бериллия Be^{+++} , ... (рис. 5.10).

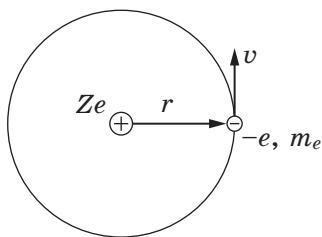


рис. 5.10

В теории Бора электрон двигался вокруг ядра по круговой орбите подобно планете, обращающейся вокруг Солнца. Взаимодействие электрона с ядром описывалось *законом Кулона*, что следовало из опытов Гейгера и Марсдена и соответствовало представлениям классической физики. Однако, согласно этим представлениям, электрон, движущийся с ускорением,

— в нашем случае центростремительным, — должен излучать электромагнитную волну и, отдав ей свою энергию, упасть на ядро. Опыт же свидетельствует об обратном — атомы большинства веществ очень устойчивы и самопроизвольно не разрушаются. Чтобы примирить оба эти положения, Бор выдвинул два постулата, формулировка которых как бы предвосхищает результаты его теории, являясь в то же время следствием проделанных им математических выкладок:

- атом может длительное время находиться в определённых *стационарных состояниях*, в которых он не излучает и не поглощает энергию. Энергия атома в этих состояниях принимает дискретный ряд значений $W_1, W_2, W_3, \dots$;

- при переходе из стационарного состояния с энергией W_i в состояние с энергией W_k атом излучает или поглощает фотон, энергия которого $W_{\phi} = h\nu_{ik}$ связана с ними соотношением (5.12). Это соотношение называется *правилом частот Бора*.

Исходным в теории Бора служит уравнение для полной энергии электрона, движущегося в поле ядра, — суммы его кинетической и потенциальной энергии:

$$W = K + U = \frac{m_e v^2}{2} - k_0 \frac{Ze^2}{r}, \quad (5.18)$$

где r и v — радиус орбиты электрона и его скорость, m_e — масса электрона; $k_0 = 9 \cdot 10^9$ Н·м²/Кл² — коэффициент пропорциональности в законе Кулона. Потенциальная энергия U нормирована так, что при удалении электрона «на бесконечность» она стремится к нулю (рис. 5.11).

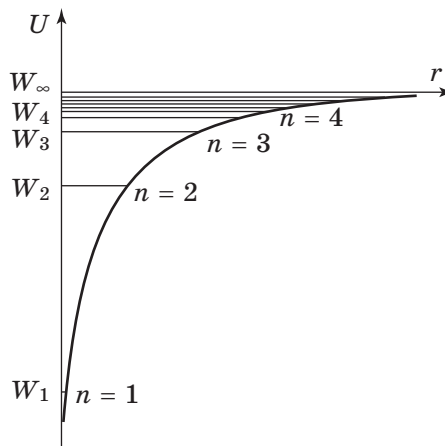


рис. 5.11

Для нахождения r и v Бор использовал систему двух уравнений:

$$\frac{m_e v^2}{r} = k_0 \frac{Ze^2}{r^2}, \quad (5.19, a)$$

$$m_e v \cdot r = n \frac{h}{2\pi}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (5.19, б)$$

Первое из них исходит из предположения, что центростремительная сила, действующая на электрон, есть сила Кулона. Второе — придаёт моменту импульса электрона $L = m_e v \cdot r$ ряд значений, крат-

ных $\frac{h}{2\pi}$.

Выразив v из уравнения (5.19, б) и подставив его в (5.19, а), получим для радиуса орбиты электрона выражение (5.14), после чего найдём его скорость на этой орбите (5.15).

Подставляя эти выражения в (5.18), найдём значения полной энергии электрона в стационарных состояниях (5.16), отмеченные на рис. 5.11 горизонтальными прямыми.

Формула (5.12) после деления на h и подстановки туда (5.16) приобретает вид, аналогичный формуле Бальмера (5.11) для частот света, излучаемого атомом:

$$\nu_{ik} = k_0^2 \frac{2\pi^2 Z^2 e^4 m_e}{h^3} \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{k^2} \right).$$

Сравнение их показывает, что *постоянная Ридберга R* выражается через фундаментальные постоянные — заряд и массу электрона и постоянную Планка — согласно (5.17).

Численное её значение $R = 3,289842 \cdot 10^{15}$ Гц совпадает с экспериментальным значением $R_{\text{эксп}}$ с относительной погрешностью

$$\frac{|R - R_{\text{эксп}}|}{R} = 4,6 \cdot 10^{-6}.$$

На рис. 5.12 приведена схема уровней энергии электрона в атоме водорода (5.16). Переходы электрона со всех более высоких уровней на первый уровень соответствуют



рис. 5.12

серии Лаймана, на второй уровень — серии Бальмера и т. д. Верхний уровень, отмеченный на этом рисунке пунктиром, электрон занимает в том случае, когда он покидает атом и становится свободным (при $n \rightarrow \infty$). Разность энергий этого уровня и нижнего равна энергии ионизации атома:

$$W_{\text{ион}} = W_{\infty} - W_1. \quad (5.20)$$

Для водорода она равна 13,6 эВ.

В основном состоянии атома (при $n = 1$) радиус орбиты электрона

$$r_1 = 0,53 \text{ \AA}.$$

Единица измерения длины $\text{\AA}$ — *ангстрем* — удобна в атомных масштабах и широко используется в физике микромира ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$). Так, размер атомов составляет несколько

ангстрем. Того же порядка и расстояния между атомами в кристаллах.

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 (5.12) квантовая механика использует как свой рабочий инструмент.

Примеры решения задач

ОГЭ

При переходе электрона атома водорода с одной орбиты на другую, более близкую к ядру, энергия атома уменьшается на $\Delta W = 1,892$ эВ. При этом атом водорода излучает квант света. Определить длину волны излучения.

- Решение. Согласно (5.12) энергия фотона, излучённого атомом при переходе его из одного стационарного состояния в другое,

$$W_{\text{ф}} = \Delta W. \quad (1)$$

Согласно (5.1),

$$W_{\text{ф}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}. \quad (2)$$

Приравнивая правые части (1) и (2), найдём

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta W}.$$

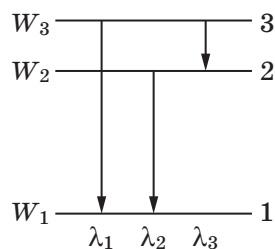
- Ответ. $\lambda = 6,6 \cdot 10^{-7}$ м.

ЕГЭ

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.

► Решение.

Схема переходов электрона между уровнями энергии в атоме водорода представлена на рис. 5.12. Чтобы наблюдать три линии в спектре излучения, нужно электроны перевести с 1-го на 2-й и 3-й уровни. Тогда возможны переходы 3–1, 2–1, 3–2, при которых, согласно (5.11) и (3.67), излучаются длины волн



$$\lambda_1 = \frac{c}{\left(1 - \frac{1}{9}\right)R}, \quad \lambda_2 = \frac{c}{\left(1 - \frac{1}{4}\right)R}, \quad \lambda_3 = \frac{c}{\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{9}\right)R}.$$

Для возбуждения атомов водорода в этом случае требуется иметь пучок электронов с энергией $W = W_3 - W_1$. Согласно (5.16) и (5.17):

$$W = R \cdot h \left(1 - \frac{1}{9}\right).$$

► Ответ. $W = 12,1$ эВ, $\lambda_1 = 102$ нм, $\lambda_2 = 121$ нм, $\lambda_3 = 655$ нм.

5.3. КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ СВОЙСТВ МИКРОЧАСТИЦ

Рассмотренные нами 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 экспериментах.

В настоящем разделе мы выясним содержание понятия микрочастицы и сформулируем принцип Паули, позволяющий объяснить поведение электронов в атомах и твёрдых телах.

5.3.1. Гипотеза де Бройля

Определения и основные формулы

► Длина волны де Бройля частицы:

$$\lambda_B = \frac{h}{p}, \quad (5.21)$$

где $p = mv$ — импульс частицы, h — постоянная Планка.

Единицы измерения

► Длина волны де Бройля измеряется в **ангстремах**:

$$[\lambda_B] = \text{\AA}, (1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{ м}).$$

Подробное объяснение

В 1923 г. французский физик Луи де Бройль выдвинул смелую гипотезу, согласно которой движущаяся материальная частица может рассматриваться как волна, имеющая длину, выражаемую уравнением (5.21). Она называется *длиной волны де Бройля*.

Формула (5.21) аналогична формуле (5.8), связывающей импульс фотона p_ϕ с его энергией W_ϕ :

$$p_\phi = \frac{W_\phi}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (5.22)$$

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. 5.13). В этом де Бройль увидел подтверждение правильности своей гипотезы.

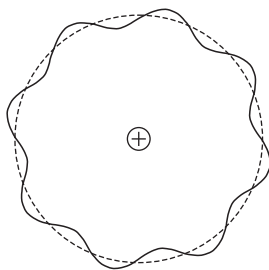


рис. 5.13

Длина волны де Бройля электрона в атоме соизмерима с размером атома и составляет несколько ангстрем. Таков же порядок величины длин волн рентгеновских лучей ($\lambda_p \approx 0,1 \dots 1 \text{ \AA}$).

Оценим величину λ_B частицы, микроскопической в обыденном понимании этого слова. Пусть это будет пылинка массой $m = 0,01 \text{ мг}$, движущаяся со скоростью $v = 100 \text{ м/с}$ (например, в потоке газа, вырывающегося из баллона высокого давления). Для неё длина волны де Бройля

$$\lambda_B = \frac{h}{mv} = 6,6 \cdot 10^{-18} \text{ \AA}.$$

Столь малое её численное значение свидетельствует, что 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.

Примеры решения задач



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?

► Решение. Согласно (5.21),

$$\lambda_{Be} = \frac{h}{m_e v_e}. \quad (1)$$

Скорость электрона v_e , ускоренного напряжением U , найдём из уравнения

$$\frac{m_e v_e^2}{2} = eU, \quad (2)$$

где e — заряд электрона, m_e — его масса.

Тогда, решая (1) и (2) совместно, найдём

$$\lambda_{Be} = \frac{h}{\sqrt{2em_e U}}.$$

Для протона, масса которого m_p ,

$$\lambda_{Bp} = \frac{h}{\sqrt{2em_p U}} = \sqrt{\frac{m_e}{m_p}} \lambda_{Be}.$$

► Ответ. $\lambda_{Be} = 0,12$ нм, $\lambda_{Bp} = 0,003$ нм.



Вычислить кинетическую энергию молекулы кислорода, если её длина волны де Бройля $\lambda_B = 100$ пм.

► Решение. Согласно (1.37), кинетическая энергия молекулы

$$K = \frac{m_0 v^2}{2}, \quad (1)$$

где $m_0 = \frac{M}{N_A}$ — масса молекулы (M — молярная масса,

N_A — постоянная Авогадро).

Скорость молекулы v найдём из (5.21):

$$v = \frac{h}{m_0 \lambda_B}.$$

Подставляя в (1), получим:

$$K = \frac{N_A \cdot h^2}{2M \cdot \lambda_B^2}.$$

► Ответ. $K = 2,6 \cdot 10^{-3}$ эВ.

5.3.2. Опыты Дэвиссона и Джермера по обоснованию корпускулярно-волнового дуализма свойств микрочастиц

определения и основные формулы

- ▶ **Корпускулярно-волновой дуализм** свойств микрочастиц — двойственная природа материальных частиц, проявляющаяся в том, что движущуюся частицу можно рассматривать как волну де Бройля.
- ▶ **Микрочастицы** — частицы, длина волны де Бройля которых соизмерима с размерами атома.
- ▶ **Явление дифракции электронов** — отражение пучка электронов от поверхности кристалла, показывающее сходство его с пучком рентгеновских лучей.
- ▶ **Условие максимумов** интенсивности рентгеновских лучей при отражении их от кристалла:

$$2d \sin \theta_k = k\lambda, \quad (k = 1, 2, 3, \dots), \quad (5.23)$$

где d — расстояние между кристаллографическими плоскостями,

θ — угол скольжения между лучом и поверхностью кристалла,

λ — длина волны.

Единицы измерения

- ▶ Расстояние d и длина волны рентгеновских лучей измеряются в **ангстремах**:

$$[d] = [\lambda] = \text{\AA}, \quad (1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{ м}).$$

Подробное объяснение

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.

Схема экспериментальной установки, использованной Дэвиссоном и Джермером, приведена на рис. 5.14. Узкий пучок электронов,

испускаемых находящейся в вакуумной камере раскалённой вольфрамовой нитью (катодом K), направлялся на поверхность монокристалла никеля M под углом θ к его поверхности, а отражённая часть этого пучка попадала в приёмник — металлический цилиндр, служащий анодом A , соединённый с положительным полюсом источника тока. Сила тока в цепи i зависела от количества электронов, попавших в приёмник, и могла изменяться в зависимости от угла θ и ускоряющего напряжения U . Полагая, что пучок электронов имеет длину волны де Бройля λ_B , максимумы отражения следовало ожидать при выполнении условия (5.23), полученного при изучении отражения рентгеновских лучей. Оно связывает угол скольжения θ с длиной волны λ и расстоянием d между кристаллографическими плоскостями никеля (рис. 5.15). В уравнении (5.23) k — целое число, нумерующее дискретный ряд значений углов θ_k , при которых интенсивность отражённого пучка лучей максимальна.

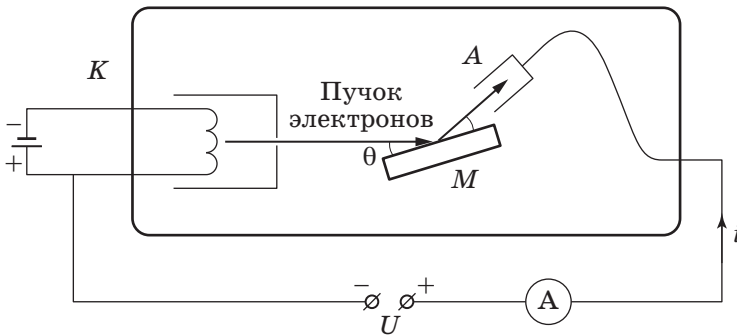


рис. 5.14

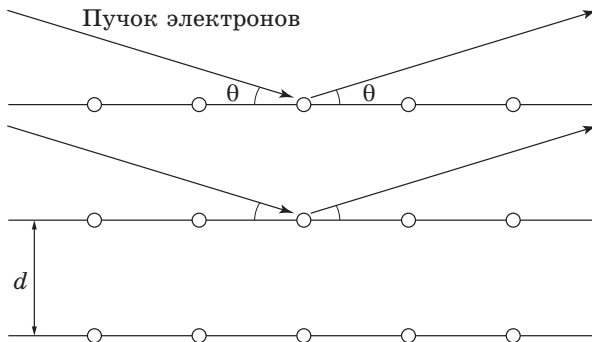


рис. 5.15

В случае волн де Бройля условие (5.23) удобнее проверить, оставив неизменным угол θ и изменяя зависящую от скорости электронов

длину волны λ_B путём регулировки приложенного к трубке напряжения U . В самом деле, скорость электрона можно найти, приравняв его кинетическую энергию к работе кулоновских сил, действующих на него в электрическом поле:

$$\frac{m_e v^2}{2} = eU,$$

откуда $v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}$ и $\lambda_B = \frac{h}{\sqrt{2em_e U}}$.

Подставив это выражение в (5.23), получим соотношение

$$\sqrt{U_k} = B \cdot k, \quad (5.24)$$

где через B обозначена постоянная для данного угла θ величина

$$B = \frac{d}{h} \sqrt{8em_e} \sin \theta.$$

Из (5.24) следует, что максимумы интенсивности отражённого от кристалла пучка электронов — силы тока в цепи i — должны быть расположены на графике зависимости $i = f(\sqrt{U})$ на одинаковых расстояниях друг от друга:

$$\sqrt{U_{k+1}} - \sqrt{U_k} = B, \quad (5.25)$$

где $\sqrt{U_k}$ — абсцисса k -го максимума.

На рис. 5.16 приведён график этой зависимости, полученной экспериментально. Он подтверждает выведенную здесь закономерность в расположении максимумов, поскольку расстояния между ними соответствуют условию (5.25):

$$a_1 \approx a_2 \approx a_3 \approx \dots \approx B.$$

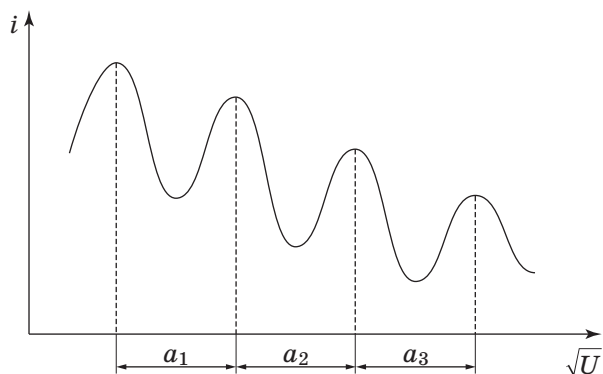


рис. 5.16

Опыты Дэвиссона и Джермера явились экспериментальным доказательством существования волн вещества. Длина волны электронов, ускоренных напряжением $U = 10\,000$ В, лежит в области длин волн жёстких рентгеновских лучей ($\lambda_B = 0,01$ нм). Поэтому пучки таких электронов можно использовать при изучении структуры различных материалов. Преимущество электронной методики состоит в том, что она позволяет получить гораздо бóльшие интенсивности, чем могут дать рентгеновские лучи, и существенно сократить время, затрачиваемое на эти исследования.

Ещё одним преимуществом использования электронных пучков является возможность легко изменять их длину волны, варьируя ускоряющее напряжение U . Третье и наиболее важное преимущество обязано их способности отклоняться под действием электрических и магнитных полей. С их помощью электронный пучок можно легко фокусировать, что позволяет конструировать различные электронные линзы и *электронные микроскопы*. Благодаря малости длины волны их разрешающая способность гораздо выше, чем у оптических приборов, и это позволяет получить увеличение в сотни тысяч раз, т. е. наблюдать такие недоступные оптическим приборам объекты, как крупные органические молекулы.

Целям исследования структуры вещества служат и пучки нейтронов, возможности которых при расшифровке строения молекул оказываются зачастую выше, чем у электронных пучков.

Явление дифракции пучка электронов, экспериментально доказавшее их волновую природу, было независимо от Дэвиссона и Джермера открыто английским физиком Дж. П. Томсоном.

5.3.3. Соотношения неопределённостей Гейзенберга

определения и основные формулы

► Соотношения неопределённостей Гейзенберга:

$$\begin{aligned}\Delta x \cdot \Delta p_x &\geq h, \\ \Delta y \cdot \Delta p_y &\geq h, \\ \Delta z \cdot \Delta p_z &\geq h,\end{aligned}\tag{5.26}$$

где Δx , Δy , Δz — погрешности измерения координат микрочастицы,

Δp_x , Δp_y , Δp_z — погрешности измерения компонент её импульса,

h — постоянная Планка.

Единицы измерения

- Линейные величины измеряются в **метрах**:

$$[\Delta x] = [\Delta y] = [\Delta z] = \text{м.}$$

- Проекции импульса измеряются в **килограмм-метрах в секунду**:

$$[\Delta p_x] = [\Delta p_y] = [\Delta p_z] = \text{кг}\cdot\text{м/с.}$$

Подробное объяснение

Двойственная природа материи присуща как свету, так и веществу. Она накладывает определённые ограничения на способ математического описания поведения частиц вещества, которые мы до сих пор называли микрочастицами. Мелкие материальные частицы, состоящие из огромного количества атомов или молекул, как было показано выше, не проявляют волновых свойств. Частицы же, входящие в состав атомов, — электроны, протоны или нейтроны, как и сами атомы, — не могут рассматриваться лишь с точки зрения корпускулярной теории, 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 Δx , Δy , Δz и погрешностями измерения компонент её импульса Δp_x , Δp_y , Δp_z , представленные неравенствами (5.26).

Согласно им, постоянная Планка определяет 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 неопределённее положение частицы в пространстве.

Для определения координат и импульса электрона следует использовать фотон с длиной волны λ . При этом чем меньше λ , 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. Эта трудность — принципиальная.

В теории Бора длина волны де Бройля электрона в атоме по порядку величины совпадает с размером атома, т. е.

$$\Delta x \approx \lambda_B = \frac{h}{m_e v}, \quad (5.27)$$

а компонента его скорости вдоль оси X заключена в пределах $0 < v_x < v$. Поэтому можно считать $\Delta v_x \approx v$ и тогда, с учетом (5.27),

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx h.$$

Эта оценка позволяет дать приведённое выше определение микрочастицы — её длина волны де Бройля соизмерима с размером атома.

Микрочастицы нельзя рассматривать как обычные частицы. В частности, нельзя указать точно их местоположение в пространстве. Они не подчиняются законам классической механики и для своего описания требуют нового подхода. Раздел физики, занимающийся поведением микрочастиц, имеет название квантовой (или волновой) механики.

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.

5.3.4. Спин электрона. Принцип Паули

определения и основные формулы

- **Спин** — собственный момент импульса электрона:

$$L_s = s\hbar, \quad (5.28)$$

где s — спиновое квантовое число,

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \text{ — квантовая постоянная.}$$

- **Бозоны** — частицы с целым значением спина:

$$s = 0, 1, 2, \dots$$

- **Фермионы** — частицы с полуцелым значением спина:

$$s = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$$

- **Принцип Паули.** В любой квантовомеханической системе (атом, кристаллический образец металла или полупроводника) характеристики движения двух или нескольких электронов не могут полностью совпадать.

Единицы измерения

- Собственный момент импульса электрона измеряется в джоуль-секундах:

$$[L_s] = \text{Дж} \cdot \text{с}.$$

Подробное объяснение

В 1925 г. Уленбек и Гаудсмит выдвинули гипотезу, согласно которой электрон, помимо поступательных, имеет ещё и вращательную степень свободы: подобно твёрдому телу, он обладает *моментом импульса* (см. 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.

Величина собственного момента импульса электрона (5.28) была измерена в опытах Штерна и Герлаха — для него $L_s = \frac{1}{2} \hbar$. Впоследствии было установлено, что элементарные частицы могут иметь и целочисленное значение спина ($s = 0, 1, 2, \dots$). Такие частицы называются *бозонами*. Частицы с полуцелым значением спина $\left(s = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots\right)$ — *фермионами*. К первым относятся, в частности, фотоны, ко вторым — электроны, протоны, нейтроны.

Бозоны получили своё название в честь одного из создателей соответствующей теории для таких частиц — индийского физика Шаттандраната Бозе. (Квантовая статистика частиц с целым значением спина носит название *статистики Бозе – Эйнштейна*). Фермионы названы по имени итальянского физика Энрико Ферми, создавшего наряду с Полем Дираком статистическую теорию частиц с полуцелым спином.

Свойства бозонов и фермионов принципиально отличны 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*.

Применительно к атому это означает, что на первой бортовой орбите могут находиться только два электрона с противоположными спинами (направлениями вращения), на второй орбите — восемь электронов, на третьей — восемнадцать, ... (Теория многоэлектронного атома, разработанная в квантовой механике, выходит за рамки школьного курса физики.)

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.

5.4. ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СВЕТА

Излучение электромагнитных волн, в частности видимого света, веществом происходит при участии заряженных частиц. Согласно классической электродинамике Максвелла, волны испускаются зарядами, движущимися ускоренно. В квантовой механике процесс испускания фотонов атомами или молекулами обусловлен переходом их электронов с верхних энергетических уровней на более низкие. Разнообразие спектров излучения веществ свидетельствует о большом числе способов такого перехода. 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*.

В настоящем разделе мы рассмотрим свойства вынужденного излучения света и принцип работы лазера.

5.4.1. Спонтанное и вынужденное излучение света

определения и основные формулы

- **Двухуровневая система** — модель вещества, молекулы которого могут пребывать только на двух энергетических уровнях — W_i и W_k .

- ▶ **Основное состояние** — состояние молекулы, когда она находится на нижнем уровне, на котором её энергия имеет наименьшее возможное значение.
- ▶ **Возбуждённое состояние** — состояние молекулы, когда она, 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 энергетического уровня на нижний.
- ▶ **Вынужденный переход** — переход молекулы с одного энергетического уровня на другой, происходящий под влиянием фотонов, энергия которых равна разности энергий молекулы на этих уровнях:

$$h\nu = W_i - W_k. \quad (5.29)$$

- ▶ **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 ν и заключённого в единице объёма:

$$u(\nu, T) = \frac{\Delta W}{\Delta V \cdot \Delta \nu}, \quad (5.30)$$

где T — температура вещества, взаимодействующего с излучением.

Единицы измерения

- ▶ Спектральная плотность излучения измеряется в джоуль-секундах на кубический метр:

$$[u(\nu, T)] = \text{Дж} \cdot \text{с} / \text{м}^3.$$

Подробное объяснение

Рассмотрим модельную квантовомеханическую систему — вещество, молекулы которого могут пребывать только на двух уровнях с энергиями W_i и W_k . В состоянии равновесия i -й уровень занимают в среднем N_i молекул, а k -й уровень — N_k молекул (рис. 5.17). Имеется в виду *динамическое равновесие*, когда происходят переходы молекул с нижнего уровня на верхний и одновременно с верхнего уровня на нижний — и скорости этих процессов одинаковы. Переход

молекулы на другой уровень означает изменение её энергии, а не перемещение в пространстве.

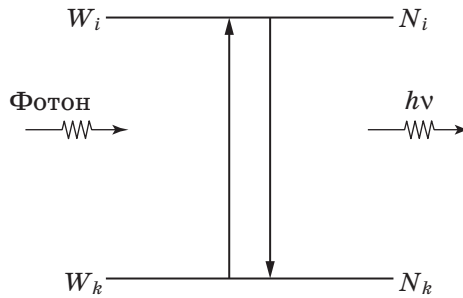


рис. 5.17

Молекулы вещества, имеющего температуру T , взаимодействуют с излучением. Число переходов молекул за единицу времени из основного состояния в возбуждённое — с уровня k на уровень i — пропорционально населённости исходного — k -го уровня — и объёмной плотности энергии электромагнитного излучения $u(\nu, T)$, поскольку такие переходы происходят при поглощении фотонов частотой ν , определяемой равенством (5.29):

$$Z_{ki}^{\text{вын}} = B_{ki} N_k u(\nu, T). \quad (5.31)$$

Число спонтанных переходов с уровня i на уровень k пропорционально числу молекул на уровне i :

$$Z_{ik}^{\text{сп}} = A_{ik} N_i, \quad (5.32)$$

а число таких переходов, происходящих вынужденно, зависит ещё и от количества фотонов, провоцирующих эти переходы, т. е. от $u(\nu, T)$, и выражается формулой, аналогичной (5.31):

$$Z_{ik}^{\text{вын}} = B_{ik} N_i u(\nu, T). \quad (5.33)$$

В состоянии динамического равновесия населённости обоих уровней остаются неизменными, поэтому можно записать:

$$Z_{ik}^{\text{сп}} + Z_{ik}^{\text{вын}} = Z_{ki}^{\text{вын}}. \quad (5.34)$$

Подробный вывод, определяющий, в частности, коэффициенты пропорциональности в формулах (5.31)–(5.33), выходит за рамки школьного курса физики. Он был проделан А. Эйнштейном и привёл его к формуле Планка для функции $u(\nu, T)$, которая хорошо описывает эксперимент. Поскольку этот вывод предполагает наличие *вынужденных* переходов молекул из возбуждённого состояния в основное, т. е. выполнение условия (5.34), гипотеза о существовании таких переходов нашла своё блестящее подтверждение.

5.4.2. Инверсная населенность уровней. Отрицательное поглощение света

определения и основные формулы

► Закон Бугера:

$$I = I_0 e^{-\alpha d}, \quad (5.35)$$

где I — интенсивность света, прошедшего слой вещества толщиной d ,

I_0 — интенсивность падающего света,

α — коэффициент поглощения.

► Инверсная населённость уровней — число молекул, находящихся на верхнем энергетическом уровне, превышает число молекул на нижнем.

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**:

$$[\alpha] = \text{м}^{-1}.$$

Подробное объяснение

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 I , прошедшего через слой вещества толщиной d , описывается *законом Бугера* (5.35).

Для усиления света необходимо создать *инверсную населённость уровней*, когда число молекул, находящихся на верхнем энергетическом уровне, больше числа молекул на нижнем. Падающий свет, если его частота удовлетворяет условию (5.29), вызывает индуцированный переход молекул на нижний уровень и появление дополнительного количества фотонов той же частоты.

Индукцированное излучение обладает следующими свойствами:

- 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.

Таким образом, пучок света, возникающий в результате вынужденного излучения, представляет собой совокупность *когерентных* волн.

Состояние вещества с инверсной населённостью уровней является *метастабильным* и легко разрушается под действием хотя бы одного фотона соответствующей частоты — индуцированные фотоны вызывают излучение новых фотонов, число которых по мере распространения света в веществе возрастает. Наблюдается «отрицательное поглощение» света — интенсивность света, прошедшего через слой такого вещества, превышает интенсивность падающего света (рис. 5.18). В формуле (5.35) коэффициент поглощения α становится отрицательным:

$$I = I_0 e^{|\alpha|d}. \quad (5.36)$$

Идею использования инверсной населённости уровней для усиления света выдвинул в 1939 г. советский физик В. А. Фабрикант.

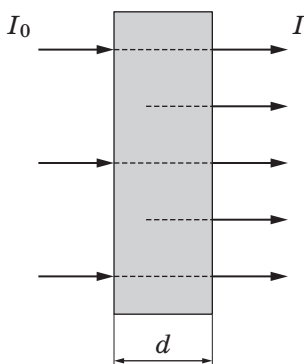


рис. 5.18

5.4.3. Трёхуровневая схема. Лазер на рубине

Определения и основные формулы

- ▮ **Лазер** — оптический квантовый генератор.
- ▮ **Составные части лазера:**
 - источник энергии;
 - рабочее тело;
 - резонатор.

- Связь ширины уровня энергии ΔW с временем пребывания на нём электрона τ :

$$\Delta W \cdot \tau > h, \quad (5.37)$$

где h — постоянная Планка.

- **Свойства излучения лазера:**

- строгая монохроматичность ($\Delta\lambda \approx 0,01$ нм);
- высокая когерентность;
- большая интенсивность и малая расходимость пучка.

Подробное объяснение

Слово *лазер* происходит от первых букв английского предложения *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* — *усиление света с помощью индуцированного излучения*. Проблема создания оптических квантовых генераторов света — лазеров — заключалась в поиске веществ, способных находиться в состоянии с инверсной населённостью энергетических уровней. Такие вещества были найдены благодаря анализу спектров излучения различных веществ.

Первым был *лазер на рубине*, построенный в 1960 г. Т. Мейманом в США. Незадолго до этого подобные устройства, работающие в диапазоне радиоволн и называемые *мазерами*, были созданы советскими физиками А. М. Басовым и Н. Г. Прохоровым и, независимо от них, американцем Ч. Таунсом, за что все трое были удостоены Нобелевской премии.

Кристалл рубина представляет собой прозрачный минерал красного цвета, в быту относящийся к драгоценным камням. Химически — это окись алюминия Al_2O_3 , в которой часть атомов алюминия заменена атомами хрома, концентрация которых составляет 0,03...0,05 %. Хром в рубине присутствует в виде ионов Cr^{+++} , участвующих в генерации света лазером. Их энергетические уровни изображены на рис. 5.19. 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. С этого уровня электрон без излучения фотона переходит на более низкий уровень 2, передав часть своей энергии окружающим атомам. Переход с уровня 2 на уровень 1 является *запрещённым* — эти переходы имеют малую вероятность, и яркость соответствующей спектральной линии очень мала. Поэтому время жизни электрона на уровне 2 гораздо больше и составляет приблизительно 10^{-3} с.

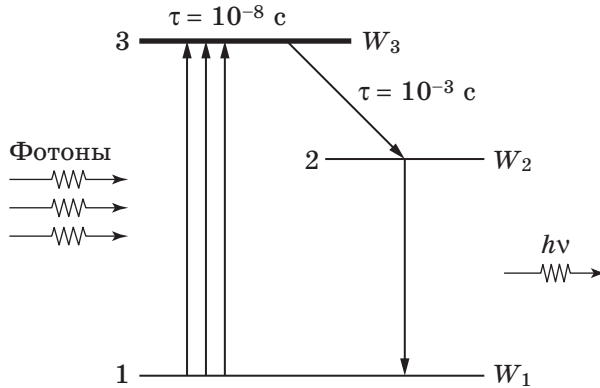


рис. 5.19

Электроны накапливаются на нём, создавая инверсную населённость по отношению к уровню 1. Ширина уровня 2, согласно (5.37), намного меньше ширины уровня 3, в силу чего фотоны, испускаемые при переходах с него на уровень 1, имеют строго определённую частоту.

Принципиальная схема лазера на рубине приведена на рис. 5.20.

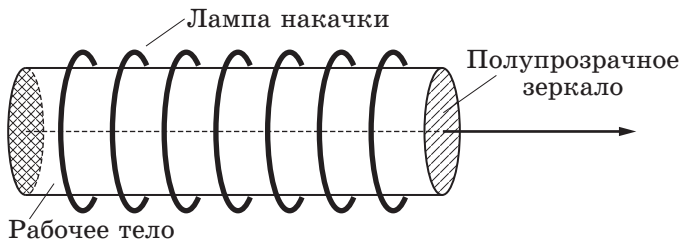


рис. 5.20

Источник энергии — *лампа накачки* — переводит электроны из основного состояния в возбуждённое («оптическая накачка»).

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.

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 (рис. 5.19) доля фотонов, поглощаемых рабочим телом при переходах на него с основного уровня, достаточно

велика, т. к. их энергия, отсчитанная от уровня 1, лежит в интервале $\Delta W = W_{3\max} - W_{3\min}$.

Резонатор служит для усиления света за счёт вынужденного излучения фотонов рубином, находящимся в состоянии с инверсной населенностью уровней.

Среди фотонов, спонтанно испускаемых возбужденными 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.

Угловая ширина генерируемого лазером светового пучка столь мала, что, используя телескопическую фокусировку, можно получить на Луне пятно света диаметром всего в 3 км (расстояние от Земли до Луны примерно 380 тыс. км). Большая мощность и узость пучка позволяют при фокусировке с помощью линзы добиться плотности потока энергии, в 1000 раз превышающей таковую при фокусировке солнечного света. Поэтому лучи лазера используются для сварки металлов, обработки твёрдых тел, записи информации на диски в компьютерах, в медицине при проведении хирургических операций, в геодезии, оптических линиях связи, спектроскопии. Область применения лазеров весьма обширна.

Кроме рубинового лазера существует много других разновидностей этих приборов — газовые, полупроводниковые, лазеры на красителях с перестраиваемой частотой, мощные рентгеновские лазеры, используемые в военном деле, так называемые эксимерные лазеры, дающие пучки света в ультрафиолетовом диапазоне, и другие.

Во многих областях науки и техники лазеры совершили настоящую революцию, позволив осуществить проекты, о которых можно было только мечтать.

5.5. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ 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.

В настоящем разделе мы рассмотрим с точки зрения зонной теории электропроводность металлов и полупроводников и принципы, лежащие в основе их практического применения.

5.5.1. Элементы зонной теории электропроводности твёрдых тел

определения и основные формулы

- ▮ **Электронная оболочка атома** — совокупность электронов, orbiting around its nucleus.
- ▮ **Твердое тело** — упорядоченное расположение в пространстве атомов, образующих кристаллическую решетку.
- ▮ **Период кристаллической решетки** — расстояние между соседними атомами, из которых она образована.
- ▮ **Квантовомеханическая система** — атом, молекула или твёрдое тело, объединяющие в себе ядра атомов и электроны.
- ▮ **Принцип Паули**. Характеристики движения электронов твёрдого тела не могут полностью совпадать.
- ▮ **Энергетическая зона** — совокупность подуровней энергии, образованных в результате расщепления энергетических уровней атомов при объединении их в кристалл.
- ▮ **Валентная зона** — последняя из зон, в которой есть электроны, заполняющие её частично или полностью.

- ▶ **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.
- ▶ **Проводники** — вещества, валентная зона которых заполнена только наполовину или перекрывается с зоной проводимости.
- ▶ **Полупроводники** — вещества, имеющие узкую запрещённую зону.
- ▶ **Диэлектрики** — вещества с широкой запрещённой зоной.

Единицы измерения

- ▶ Ширина запрещённой зоны измеряется в **электронвольтах**:
 $[\Delta W] = \text{эВ}, (1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}).$

Подробное объяснение

Электроны в атоме занимают дискретные энергетические уровни, определяемые природой атома. Качественно картина их расположения представлена на рис. 5.21, где они обозначены горизонтальными линиями. Кривые изображают потенциальную энергию электрона в кулоновском поле ядра, имеющего заряд Ze :

$$U = -k_0 \frac{Ze^2}{r},$$

где Z — порядковый номер атома в таблице Менделеева.

Твёрдое тело характеризуется упорядоченным расположением атомов, образующих его кристаллическую решётку. Расстояние a между атомами решётки (рис. 5.22) зависит от природы вещества. При объединении атомов в кристалл их электронные оболочки пространственно перекрываются. В силу принципа Паули, это приводит к расщеплению каждого из уровней на множество подуровней, которые образуют полосы, или *энергетические зоны* (рис. 5.23). Уровни энергии расходятся независимо от того, заняты они электронами или свободны. Число подуровней в зоне порядка числа атомов в кристалле, а расстояние

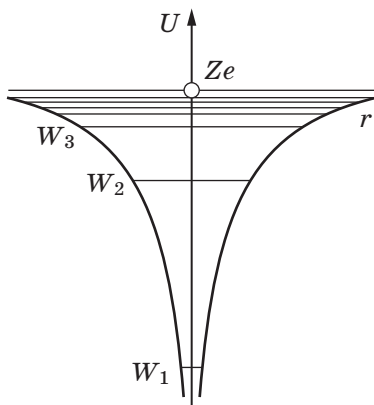


рис. 5.21

между ними $\approx 10^{-15}$ эВ, т. е. энергия электронов в пределах каждой зоны изменяется *квазинепрерывно*.

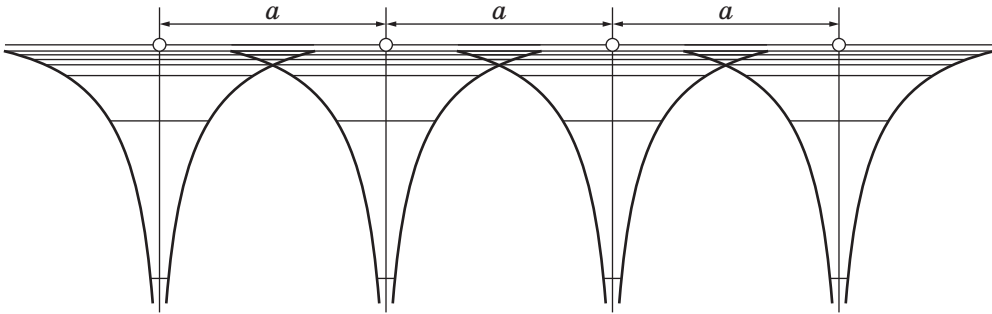


рис. 5.22

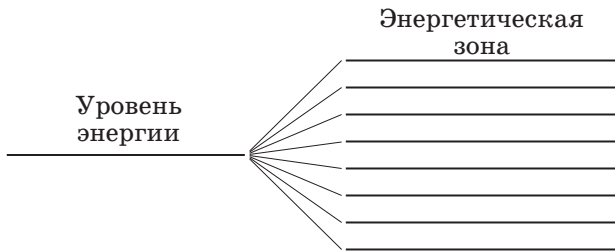


рис. 5.23

В одних веществах расстояния между атомами таковы, что перекрывающиеся верхние уровни содержат электроны, в других — образуемые из них верхние зоны оказываются пустыми. Последняя из зон, в которой есть электроны, называется *валентной зоной (ВЗ)*, поскольку внешние электроны атома определяют валентность вещества. Следующая за ней зона носит название *зоны проводимости (ЗП)*. Эти зоны разделены промежутком шириной ΔW , в котором отсутствуют разрешённые уровни энергии, — *запрещённой зоной (ЗЗ)*. В зависимости от заполненности валентной зоны и ширины запрещённой зоны вещества делятся на *проводники, полупроводники и диэлектрики* (рис. 5.24).

Проводники, к которым относятся все металлы, запрещённой зоны не имеют в том смысле, что у них валентная зона заполнена электронами только наполовину и выступает в роли зоны проводимости (у одновалентных металлов), либо эта зона перекрывается с валентной зоной, что имеет место у металлов бóльшей валентности

(рис. 5.25). В обоих случаях в верхней зоне наряду с заполненными имеются и свободные уровни энергии.

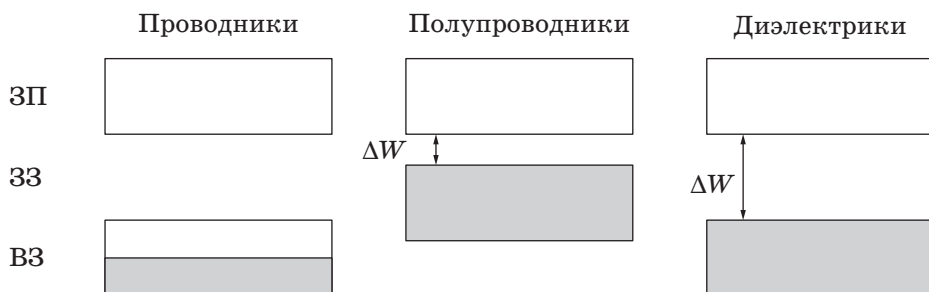


рис. 5.24

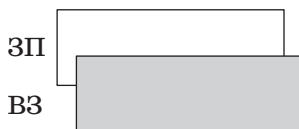


рис. 5.25

Вещества, имеющие узкую запрещённую зону, называются *полупроводниками*. Так, у германия $\Delta W = 0,67$ эВ, кремния — $\Delta W = 1,12$ эВ. Если ширина запрещённой зоны достаточно велика (например, у углерода с $\Delta W = 5,47$ эВ), вещество является *диэлектриком*.

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 — газа свободных 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 $v_{др}$, что приводит к увеличению их энергии. Поскольку дрейфовая скорость ($\approx 10^{-5}$ 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.

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.

5.5.2. Электропроводность полупроводников

определения и основные формулы

- ▮ **Полупроводники** — вещества, электропроводность которых с ростом температуры возрастает:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}, \quad (5.38)$$

где σ_0 — электропроводность при $T \rightarrow \infty$,

ΔW — ширина запрещённой зоны,

k — постоянная Больцмана.

- ▮ **Собственная электропроводность** — электропроводность чистых полупроводников.
- ▮ **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.
- ▮ **Полупроводник n -типа** — полупроводник, имеющий электронную примесную проводимость.
- ▮ **Полупроводник p -типа** — полупроводник с дырочной примесной проводимостью.

- **Основные носители тока** — электроны в зоне проводимости или дырки — в валентной зоне, — возникающие при внесении примеси.

Единицы измерения

- Электропроводность измеряется в **сименсах на метр**:

$$[\sigma] = \text{См/м}, (\text{См} = \text{Ом}^{-1}).$$

Подробное объяснение

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*. Рассмотрим оба эти случая.

Зависимость электропроводности полупроводников от температуры имеет вид (5.38). Логарифмируя это выражение, получим

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{\Delta W}{2k} \cdot \frac{1}{T}.$$

Графиком зависимости $\ln \sigma$ от $\frac{1}{T}$ служит прямая, расположенная к оси абсцисс под углом α , тангенс которого равен отношению $\frac{\Delta W}{2k}$ (рис. 5.26). Откладывая по осям координат соответствующие величины, можно убедиться в соответствии теории и опытных данных и найти ширину запрещённой зоны полупроводника ΔW .

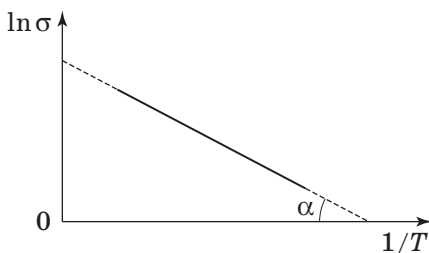


рис. 5.26

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.

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.

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. 5.27). В запрещённой зоне появляются *примесные уровни* энергии, расположенные у «дна» зоны проводимости (рис. 5.28).

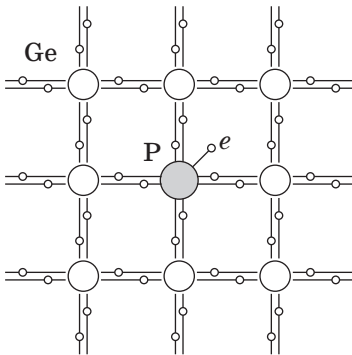


рис. 5.27

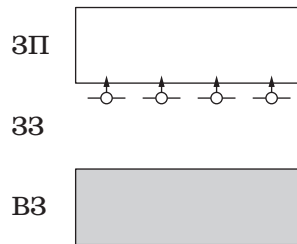


рис. 5.28

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 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).

При добавлении к чистому полупроводнику атомов 3-валентного вещества, например атомов бора (*B*), для образования связей с соседними атомами полупроводника им будет не хватать одного электрона, который они забирают у одного из соседних атомов. Вблизи него образуется вакансия электрона — дырка, которая может перемещаться по всему объёму полупроводника (рис. 5.29).

Примесные уровни в запрещённой зоне располагаются вблизи «потолка» валентной зоны (рис. 5.30). 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).

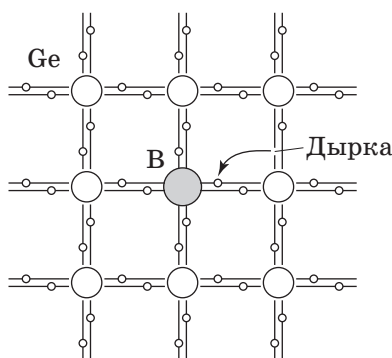


рис. 5.29

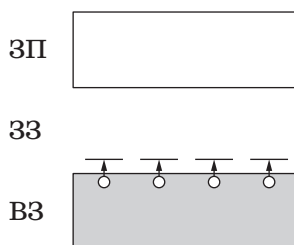


рис. 5.30

Электропроводность полупроводников, обусловленная наличием примеси, играет при комнатной температуре главную роль.

5.5.3. Принцип работы полупроводникового выпрямителя

определения и основные формулы

- **Выпрямитель** — устройство, преобразующее переменный ток в постоянный.

- **Полупроводниковый диод** — выпрямитель, рабочим элементом которого служит контакт двух полупроводников с разными типами проводимости.
- **Пропускной режим включения диода** — такое включение диода, когда положительный полюс источника тока соединён с полупроводником *p*-типа, отрицательный полюс — с полупроводником *n*-типа.
- **Запирающий режим** — включение диода в цепь, когда положительный полюс источника тока подключён к полупроводнику *n*-типа, отрицательный — к полупроводнику *p*-типа.
- **Прямой ток** — ток в цепи при пропускном режиме включения диода.
- **Обратный ток** — ток, текущий через диод в запирающем режиме его включения.
- **Коэффициент выпрямления** выпрямителя — отношение прямого тока к обратному, взятых при одном и том же напряжении:

$$k = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{обр}}} . \quad (5.39)$$

Единицы измерения

- Сила тока измеряется в **амперах**:
 $[I] = \text{А}.$

Подробное объяснение

В качестве выпрямителя до открытия полупроводников использовалась вакуумная электронная лампа с двумя электродами — *вакуумный диод* (рис. 5.31). 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. 5.32). Пульсирующий ток можно сгладить с помощью фильтров из конденсаторов и катушек индуктивности и получить ток, постоянный по величине.

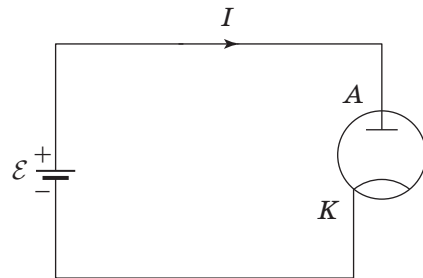


рис. 5.31

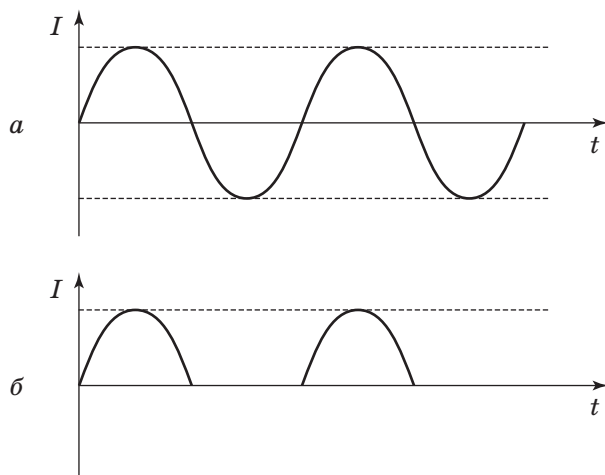


рис. 5.32

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.

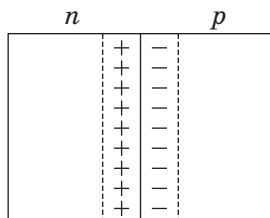


рис. 5.33

Если полупроводники *n*- и *p*-типов привести в контакт друг с другом, то на границе возникает двойной электрический слой (рис. 5.33). 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. Электрическое поле, возникающее на границе полупроводников, направлено от *n*- к *p*-полупроводнику. Оно препятствует дальнейшему переходу электронов в указанном направлении, а приграничные области обоих полупроводников оказываются лишёнными своих носителей тока.

Соединим наш составной полупроводник с источником тока, подключив положительный полюс источника к *n*-полупроводнику, а отрицательный полюс — к *p*-полупроводнику (рис. 5.34, а). Созданное источником электрическое поле заставит электроны двигаться влево, а дырки — вправо. Приграничная область, обеднённая носителями тока, расширится, и сопротивление её возрастет. Указанный режим подключения источника тока называется *запирающим*.

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. 5.34, б).

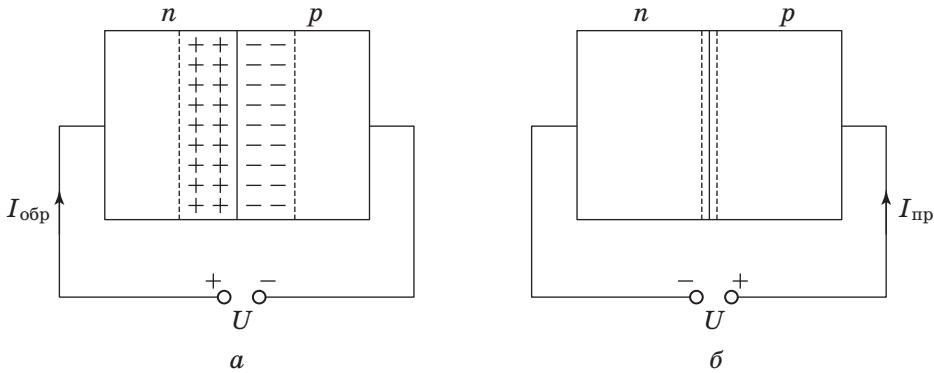


рис. 5.34

Зависимость силы тока, протекающего через полупроводниковый диод, от приложенного напряжения — его *вольтамперная характеристика* — приведена на рис. 5.35. Отношение прямого тока к обратному, взятых при одном и том же напряжении, согласно (5.39), называется *коэффициентом выпрямления*. 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.

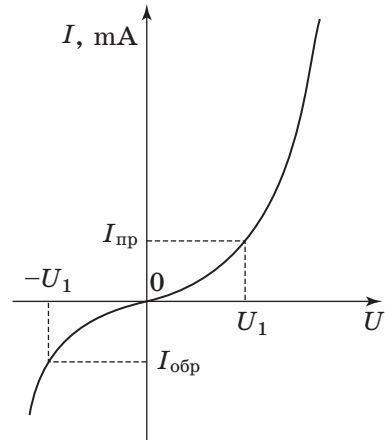


рис. 5.35

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.

В настоящем разделе мы рассмотрим основные свойства ядер атомов и принципы, лежащие в основе их практического применения.

5.6.1. Заряд, масса и размер ядер атомов

определения и основные формулы

- ▮ **Ядро атома** — центр атома, в котором находятся протоны и нейтроны, называемые **нуклонами**, связанные друг с другом ядерными силами.
- ▮ **Протон** — ядро атома водорода — элементарная частица, существующая в ядрах атомов, имеющая положительный заряд, равный заряду электрона, и массу, в 1840 раз бóльшую.
- ▮ **Нейтрон** — частица, не имеющая заряда, аналогичная протону.
- ▮ **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.
- ▮ **Массовое число A** — число нуклонов в ядре.
- ▮ **Изотопы** — ядра с одинаковыми Z , но разными A , т. е. с разным числом нейтронов:

$$N = A - Z.$$

- ▮ **Радиус ядра атома:**

$$R_{\text{я}} = 1,3 \cdot 10^{-15} A^{\frac{1}{3}} \text{ м.} \quad (5.40)$$

Подробное объяснение

Ядро атома открыто в 1911 г. Э. Резерфордом. Оно состоит из протонов и нейтронов и несёт положительный заряд, численно равный суммарному заряду электронов, обращающихся вокруг ядра, число которых равно числу протонов.

Число протонов в ядре Z определяет его *заряд* (в единицах заряда протона e) и атомный номер элемента в периодической системе элементов Менделеева. Ядро атома характеризуется *массой* M и *массовым числом* A , равным числу нуклонов в ядре.

Размер ядра по порядку величины в 10^5 раз меньше размера атома. Считая ядро сферическим, его радиус можно найти по формуле (5.40), из которой следует, что объём ядра пропорционален числу содержащихся в нём нуклонов, а плотность ядра приблизительно одинакова для всех ядер.

Протоны и нейтроны связаны друг с другом силами, называемыми *ядерными*, имеющими малый радиус действия, сравнимый с размером ядра ($\sim 10^{-15}$ м). Ядерные силы намного превосходят силы кулоновского отталкивания протонов и служат залогом стабильности ядер большинства атомов.

Ядра атомов обозначают тем же символом, что и соответствующий химический элемент, указывая слева от него сверху число нуклонов A , а внизу — число протонов Z . Так, например, изотопы урана имеют обозначение ${}^{238}_{92}\text{U}$ и ${}^{235}_{92}\text{U}$. Часто, однако, значение Z не приводится, поскольку оно однозначно определяется химическим символом элемента, и тогда пишут ${}^{238}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$.

Примеры решения задач



Сколько протонов и нейтронов содержится в ядре изотопа урана ${}^{235}_{92}\text{U}$?

- ▶ Решение. Поскольку массовое число $A = N + Z = 235$, а зарядовое число $Z = 92$, число нейтронов в ядре $N = A - Z = 143$.
- ▶ Ответ. $Z = 92$, $N = 143$.

5.6.2. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада

определения и основные формулы

- ▶ **Радиоактивность** — распад ядер атомов с образованием элементов, расположенных в таблице Менделеева ближе к её началу.

- ▶ **Закон радиоактивного распада:**

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (5.41)$$

где N — число атомов радиоактивного элемента, имеющих в наличии в момент времени t ,

N_0 — число таких атомов в момент времени $t = 0$,

λ — постоянная распада.

- ▶ **Постоянная распада** — вероятность распада атома за одну секунду.
- ▶ **Период полураспада T** — промежуток времени, в течение которого распадается половина начального количества атомов.
- ▶ **Связь периода полураспада с постоянной распада:**

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{0,693}{T}. \quad (5.42)$$

- ▶ **Активность радиоактивного препарата** — число распадов атомов, происходящих в нём за единицу времени:

$$a = \lambda N, \quad (5.43)$$

$$a = a_0 e^{-\frac{t \ln 2}{T}}, \quad (5.44)$$

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 — **обратная секунда**:

$$[\lambda] = \frac{1}{\text{с}}.$$

- ▶ Единица измерения активности — **беккерель**:

$$[a] = \text{Бк} = \frac{1}{\text{с}}.$$

Внесистемная единица активности — **кюри**:

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}.$$

Подробное объяснение

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:

α -лучи — поток ядер атома гелия,

β -лучи, представляющие собой поток электронов или позитронов,

γ -лучи — электромагнитное излучение с длинами волн, меньшими рентгеновских.

Суть явления радиоактивности заключается в распаде ядер атомов с образованием элементов, расположенных в таблице Менделеева ближе к её началу. Образовавшиеся вещества тоже могут быть радиоактивными и испытывать радиоактивные превращения. В природе существуют три ряда превращений, родоначальниками которых являются ^{238}U (ряд урана), ^{232}Th (ряд тория) и ^{235}U (ряд актиноурана). Конечными продуктами во всех трёх случаях являются изотопы свинца — соответственно ^{206}Pb , ^{208}Pb и ^{207}Pb .

Впоследствии были найдены природные изотопы других элементов, также испытывающие распад. Радиоактивные изотопы могут быть получены и искусственным путём — бомбардировкой веществ α -частицами или нейтронами. Независимо от своего происхождения все радиоактивные ядра подчиняются *закону радиоактивного распада* (5.41).

Постоянная распада λ имеет для каждого вещества своё численное значение. Обратная величина $\tau = \frac{1}{\lambda}$ называется *средним временем жизни* радиоактивного атома.

Уравнение (5.41) показывает, что количество не распавшихся атомов убывает со временем экспоненциально.

Вместо постоянной распада λ обычно используется более наглядная величина — *период полураспада* T — промежуток времени, в течение которого распадается половина начального количества атомов. Связь между ними даётся формулой (5.42).

Закон радиоактивного распада приобретает вид:

$$N = N_0 e^{-\frac{t \ln 2}{T}}. \quad (5.45)$$

Периоды полураспада известных в настоящее время радиоактивных ядер сильно разнятся, принимая значения от $3 \cdot 10^{-7}$ с до $5 \cdot 10^{15}$ лет.

Какой-либо радиоактивный препарат, содержащий делящееся вещество, обладает *активностью*, под которой понимается число распадов атомов, происходящих в нём за единицу времени. Активность препарата равна произведению постоянной распада λ на число содержащихся в нём не распавшихся атомов N .

Умножив обе части (5.41) на λ и учитывая (5.42), получим уравнение (5.44), показывающее зависимость активности от времени.

Убывание активности препарата со временем происходит тем быстрее, чем меньше период полураспада составляющего его радиоактивного элемента. Наиболее опасными для человека являются короткоживущие изотопы с малым периодом полураспада, но действие их непродолжительно.

Активность радиоактивного препарата составляет 1 Бк, если в нём за 1 с происходит распад 1 атома.

Внесистемная единица активности — *кюри* (Ки) — равна активности такого препарата, в котором происходит $3,7 \cdot 10^{10}$ актов распада в секунду:

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}.$$

Приблизительно такую активность имеет 1 г изотопа радия ${}_{88}^{226}\text{Ra}$.

Примеры решения задач



Некоторый радиоактивный препарат имеет постоянную распада $\lambda = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$. Через сколько времени t распадётся 75 % первоначального количества атомов?

► Решение. Согласно (5.41)

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (1)$$

По условию число нераспавшихся атомов в момент времени t

$$N = 0,25 N_0.$$

Подставляя в (1), найдём после сокращения N_0 и логарифмирования

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln 0,25.$$

► Ответ. $t = 960$ ч.



Найти постоянную распада радона λ , если число его атомов уменьшается за сутки на 18,2%. Каков период полураспада T радона?

► Решение. Задача решается аналогично предыдущей. Число нераспавшихся атомов радона спустя время $t = 1$ сут.:

$$N = 0,818N_0.$$

Подставляя в (5.41), найдём

$$\lambda = -\frac{1}{t} \cdot \ln 0,818.$$

Период полураспада радона, согласно (5.42),

$$T = \frac{1}{\lambda} \ln 2.$$

► Ответ. $\lambda = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$, $T = 83$ ч.



Найти массу полония $^{210}_{84}\text{Po}$, активность которого $a = 3,7 \cdot 10^{10}$ Бк. Период полураспада полония $T = 138$ сут.

► Решение. Согласно (5.43) и (5.42), активность радиоактивного препарата

$$a = \lambda \cdot N = \frac{\ln 2}{T} N, \quad (1)$$

где N — число его атомов.

Масса вещества

$$m = N \cdot m_0, \quad (2)$$

где $m_0 = \frac{M}{N_A}$ — масса атома (M — молярная масса, N_A — постоянная Авогадро).

Выражая N из (2) и подставляя в (1), найдём после несложных алгебраических преобразований

$$m = \frac{aM \cdot T}{N_A \cdot \ln 2}.$$

► Ответ. $m = 0,22$ мг.

5.6.3. Энергия связи ядер

определения и основные формулы

- **Дефект массы** — уменьшение суммарной массы нуклонов при образовании из них ядра атома:

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - M, \quad (5.46)$$

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:

$$W_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2, \quad (5.47)$$

где c — скорость света.

Единицы измерения

- Масса ядра измеряется в **атомных единицах массы**:

$$[m] = \text{а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

- Энергия связи ядра измеряется в **мегаэлектронвольтах**:

$$[W_{\text{св}}] = \text{МэВ.}$$

- Скорость света измеряется в **метрах в секунду**:

$$[c] = \text{м/с.}$$

Подробное объяснение

В то время как заряд атомного ядра равен сумме зарядов входящих в него 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 $W = mc^2$ (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*, выражаемую формулой (5.46).

Сравнивая массу ядра с суммой масс содержащихся в нём протонов и нейтронов, можно определить его энергию связи. Оказалось, что энергия связи ядер примерно пропорциональна числу содержащихся в них нуклонов.

Удельная энергия связи — энергия, приходящаяся на один нуклон $\frac{W_{\text{св}}}{A}$, — для средних и тяжёлых ядер, начиная с $A = 25$ –30, равна 7–8 МэВ/нуклон. Для сравнения укажем, что энергия связи валентных электронов в атомах в 10^6 раз меньше — порядка 10 эВ.

На рис. 5.36 изображён 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.

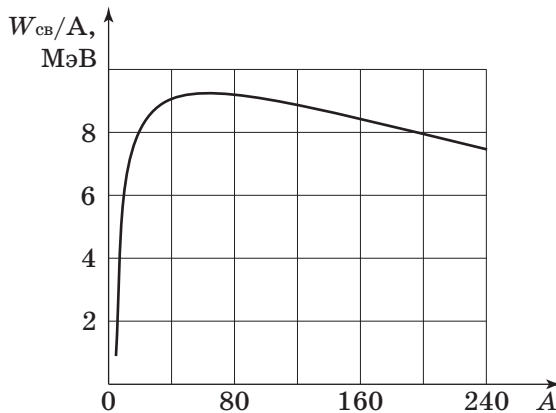


рис. 5.36

5.6.4. Получение ядерной энергии. Цепная ядерная реакция

определения и основные формулы

- **Ядерные реакции** — процессы, в которых участвуют частицы, взаимодействующие друг с другом с помощью ядерных сил.
- **Цепная ядерная реакция** — реакция деления ядер урана, происходящая под действием нейтронов, когда осколки деления испускают новые нейтроны, вызывающие деление новых ядер урана.

- **Коэффициент размножения нейтронов** — отношение среднего числа нейтронов, образовавшихся в n -м поколении цепной реакции, к среднему числу нейтронов в предыдущем поколении:

$$k = \frac{N_n}{N_{n-1}}. \quad (5.48)$$

- **Критическая масса** — минимальная масса делящегося вещества, необходимая для начала цепной реакции.

Подробное объяснение

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.

За годы исследования атомных ядер были найдены искусственные способы осуществления ядерных реакций — путём бомбардировки ядер α -частицами, протонами, нейтронами, γ -квантами. Это позволило получить множество не встречающихся в природе радиоактивных изотопов. Эксперименты такого рода с использованием нейтронов привели к открытию *цепной ядерной реакции*, нашедшей практическое применение.

В 1938 г. немецкие учёные О. Ганн и Ф. Штрассман обнаружили, что при облучении нейтронами атомов урана они делятся на две части. «Осколками» деления были элементы из середины таблицы Менделеева — барий и лантан. Осколки порождали два или три свободных нейтрона на каждый акт деления ядра изотопа ^{235}U (рис. 5.37). Эти нейтроны могли поглощаться ядрами других атомов урана, приводя к их делению. Реакция поддерживала сама себя «по цепочке» — от атома к атому — отчего и получила название цепной. Поскольку при делении одного ядра урана выделяется энергия примерно 200 МэВ, осуществление управляемой цепной реакции решает проблему использования огромной энергии, заложенной природой в атомных ядрах.

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.

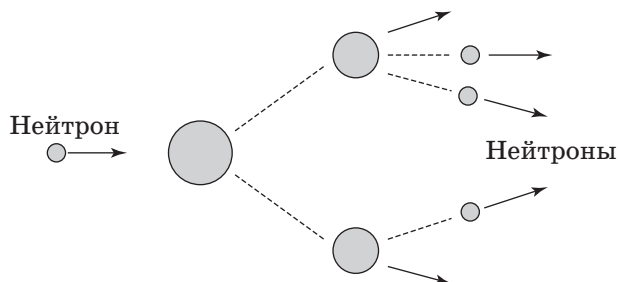


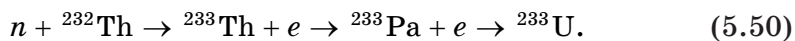
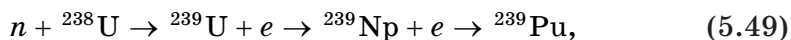
рис. 5.37

Значение коэффициента размножения нейтронов (5.48) определяет ход цепной реакции. Если $k < 1$, цепная реакция будет затухать. При $k > 1$ реакция идёт с нарастанием мощности, выделяющейся в виде тепла, и приводит к взрыву, поскольку время жизни одного поколения нейтронов очень мало и составляет от 10^{-8} до 10^{-4} с.

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/см³).

Режим реакции называется *критическим*, если $k = 1$, и *надкритическим* при $k > 1$.

Цепная реакция деления осуществима на изотопах урана ^{235}U и ^{233}U и на изотопе плутония ^{239}Pu . Первый из них встречается в природе, а два других можно изготовить в промышленных масштабах с помощью реакций под действием нейтронов:



Указанные здесь промежуточные вещества — нептуний Np и протактиний Pa — имеют малые периоды полураспада и распадаются с испусканием электронов.

Надкритический режим осуществляется при взрыве атомной бомбы. В качестве взрывчатого вещества в ней берется уран-235 или плутоний-239. Общая его масса, превышающая критическую, разделена в бомбе на две или несколько частей, масса каждой из которых

меньше критической (1 на рис. 5.38). 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 успевают прореагировать только часть ядерного заряда.

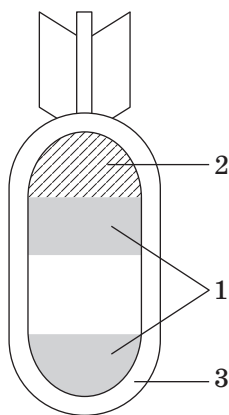


рис. 5.38

При взрыве освобождается огромная энергия, а температура в его эпицентре превышает миллионы градусов. Взрыв атомной бомбы эквивалентен взрыву десятков тысяч тонн обычного взрывчатого вещества — тротила. Опасность атомного взрыва усугубляется тем, что кроме разрушений и пожаров он оставляет много радиоактивных остатков на месте взрыва и в атмосфере. Эти остатки возникают как в виде радиоактивных продуктов деления ядер, так и в виде наведённой активности ядер окружающей среды, поглотивших нейтроны, выделяющиеся при взрыве в огромном количестве.

5.6.5. Ядерные реакторы

определения и основные формулы

- ▮ **Ядерный реактор** — агрегат, в котором осуществляется контролируемая цепная реакция деления ядер урана для производства тепловой энергии.
- ▮ **Горючее вещество** — природный уран, обогащённый изотопом ^{235}U .
- ▮ **Замедлитель** — графит или тяжёлая вода D_2O , частично поглощающие кинетическую энергию нейтронов.
- ▮ **Поглотитель нейтронов** — бор или кадмий, предназначенные для быстрой остановки цепной реакции.
- ▮ **Теплоноситель** — тяжёлая вода или металлический натрий, служащие 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_1H).

Подробное объяснение

Управляемая цепная реакция осуществляется в ядерных реакторах. В качестве делящегося вещества в них используется природный уран или уран, обогащённый изотопом ^{235}U или торием ^{233}Th . В природном уране содержится 99,3 % изотопа ^{238}U и 0,7 % изотопа ^{235}U . Вторичные нейтроны, образовавшиеся в результате деления его ядер, имеют энергию $W \approx 1$ МэВ и относятся к разряду *быстрых* нейтронов. *Медленными* (или тепловыми) являются нейтроны, энергия которых соответствует температуре окружающей среды ($W = 0,025$ эВ при $T = 300$ К). Изотоп урана-235 делится под действием как быстрых, так и медленных нейтронов, изотоп урана-238 — под действием только быстрых. Однако гораздо чаще ядра этого изотопа поглощают нейтроны без деления и превращаются в изотоп плутония-239 согласно реакции (5.49).

В ядерных реакторах, предназначенных для получения тепловой энергии, нейтроны, образовавшиеся в процессе деления ядер урана, нужно замедлить до тепловых скоростей, прежде чем они вступят во взаимодействие с новыми атомами урана. Для этого используют *замедлитель* — вещество, которому они отдают большую часть своей энергии. Наиболее подходящими для этой роли являются ядра, масса которых соизмерима с массой нейтрона, поскольку по законам механики в этом случае обмен энергией происходит наиболее эффективно. В идеале — это ядра атомов водорода. Однако они сильно поглощают нейтроны, превращаясь в ядра изотопа тяжёлого водорода — дейтерия D , состоящие из протона и нейтрона. Поэтому в качестве замедлителя используется тяжёлая вода D_2O , служащая одновременно и теплоносителем, предназначенным для отвода выделяющегося в процессе реакции тепла. В ядерных реакторах, построенных в СССР, используется графит — углерод ^{12}C , тщательно очищенный от примесей, поглощающих нейтроны.

Горючее вещество ядерного реактора — уран — изготавливается в виде цилиндрических стержней — тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), — которые располагаются в его теле на некотором расстоянии друг от друга (рис. 5.39). Между ними находится замедлитель. 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, а также шарики из этих материалов, используются для быстрого прекращения реакции в случае аварии.

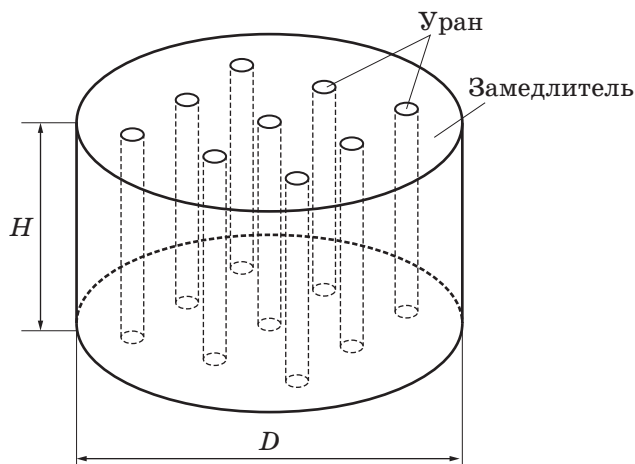


рис. 5.39

Реактор не работает, когда стержни — поглотители нейтронов — достаточно глубоко вдвинуты в его тело. Для начала работы стержни нужно выдвинуть, чтобы обеспечить возрастание потока нейтронов. Тепловые нейтроны имеют скорость 2–3 км/с. С момента образования и до момента поглощения каждого нейтрона проходит время $\sim 10^{-3}$ с. При возрастании числа нейтронов в следующем поколении всего на 0,5 % и времени жизни одного поколения 10^{-3} с мощность реактора за 1 с возрастает в $(1,005)^{1000} \approx 150$ раз, поэтому никакая регулировка здесь неосуществима. Однако природа дала человеку счастливую возможность избежать этого. Часть нейтронов (около 0,7 %), испускаемых осколками деления, появляются не мгновенно, а спустя время от 0,1 до 10 с. Это позволяет производить плавную регулировку скорости цепной реакции и обеспечивать безопасность ядерного реактора.

Теплоноситель, используемый в реакторе для отвода тепла, циркулирует в его теле по трубам, а затем в теплообменнике нагревает воду, которая, превращаясь в пар, вращает лопасти паровой турбины, соединённой с генератором, вырабатывающим электроэнергию. В качестве теплоносителя вместо тяжёлой воды часто используют расплавленный металлический натрий или его смесь с калием.

Промышленные ядерные реакторы атомных электростанций работают на природном уране, как правило, обогащённом изотопом ^{235}U до концентрации 5 %. Изотоп ^{238}U , составляющий основную массу природного урана, в процессе работы реактора превращается в плутоний-239, который по своим радиоактивным свойствам аналогичен урану-235. Ядерные реакторы на быстрых нейтронах, называемые реакторами-размножителями, работают без замедлителя. Выделение плутония из продуктов реакции сравнительно несложная задача, поскольку производится химическим путём. В результате весь добываемый уран может использоваться для производства электрической энергии, стоимость которой оказывается ниже стоимости энергии, вырабатываемой на тепловых станциях. Атомные станции экологически более безопасны, так как гораздо меньше загрязняют окружающую среду, но они несут большую угрозу жизни в случае аварии. Об этом можно судить по последствиям Чернобыльской катастрофы, произошедшей в 1986 г.

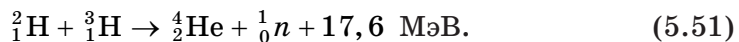
5.6.6. Термоядерные реакции. Проблема управляемого термоядерного синтеза

определения и основные формулы

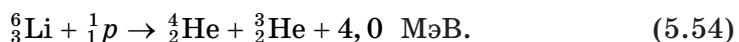
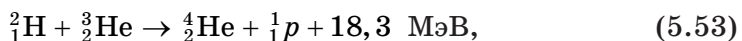
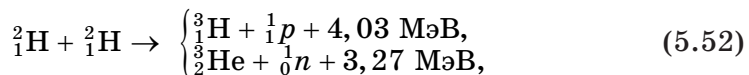
- **Термоядерные реакции** (реакции синтеза) — ядерные реакции, в которых лёгкие ядра путём их слияния превращаются в более тяжёлые.

объяснение и примеры решения задач

Реакции синтеза широко распространены в природе — в недрах Солнца и звёзд изотопы водорода ^2_1H и ^3_1H (дейтерий и тритий) «сгорают» с образованием атомов гелия ^4_2He . 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):



Существует много других *эндотермических* ядерных реакций синтеза (происходящих с выделением тепла), например:



Все они осуществляются по одному принципу — соединение ядер происходит под действием ядерных сил, которые проявляют себя на коротких расстояниях $r_{\min} \sim 10^{-15}$ 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 возможно 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 $r_{\min}$:

$$\frac{mv^2}{2} = Ze \cdot k_0 \frac{Ze}{r_{\min}},$$

где k_0 — коэффициент пропорциональности в законе Кулона.

По закону равнораспределения энергии по степеням свободы молекул

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3kT}{2},$$

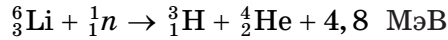
(k — постоянная Больцмана). Тогда температура, при которой возможно осуществление реакции:

$$T = k_0 \frac{2Z^2 e^2}{3k \cdot r_{\min}}.$$

Для изотопов водорода (реакция (5.20)) она составляет примерно 150 млн градусов. В силу этого ядерные реакции синтеза называются *термоядерными реакциями*. Столь высокие температуры наблюдаются в недрах звёзд. В земных условиях термоядерная реакция впервые была осуществлена при испытании водородной бомбы в 1953 г. в СССР. В качестве «запала» использовался взрыв атомной бомбы, при котором также развивается высокая температура. Мощность водородной бомбы принципиально ничем не ограничена. Достигнутая мощность составила 100 мегатонн в тротиловом эквиваленте. (Для сравнения укажем, что мощность атомных бомб, использованных США против Японии в городах Хиросима и Нагасаки в 1945 г., составляла по 20 килотонн каждая.)

Осуществление управляемой термоядерной реакции является проблемой, над которой уже более полувека работают учёные разных стран мира. Привлекательность её связана с тем, что запасы тяжёлого водорода — дейтерия — в воде мирового океана практически неисчерпаемы. Он входит в состав молекул тяжёлой воды D_2O

или ДНО, концентрация которой составляет 0,015 %. Тяжёлый водород — тритий ${}^3_1\text{H}$ — имеет период полураспада $T = 12,3$ года и поэтому в природе не встречается. Однако он может быть получен искусственно в реакции



путём облучения изотопа лития ${}^6_3\text{Li}$ нейтронами ядерного реактора. Запасов лития на Земле хватит на сотни тысяч лет. Кроме того, продукты ядерных реакций синтеза не радиоактивны.

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 (~ 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 в этой области успехи, осуществить управляемую термоядерную реакцию, имеющую промышленное значение, человечеству пока не удалось.

Приложения

1. Векторные величины в физике

Физические величины, характеризуемые не только численным значением, но и направлением в пространстве, называются *векторами*.

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

$$\vec{a} + \vec{b} = \vec{c}. \quad (\text{П.1.1})$$

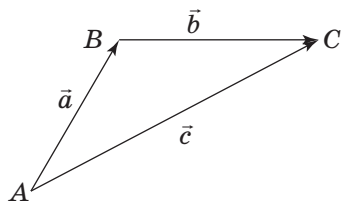


рис. П.1.1

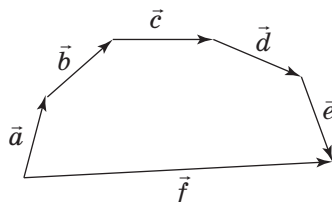


рис. П.1.2

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 $\vec{b}$.

Векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ называются *слагаемыми* векторами, вектор $\vec{c}$ — *геометрической суммой*, или *резльтирующим* 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).

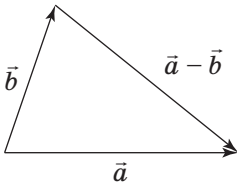


рис. П.1.3

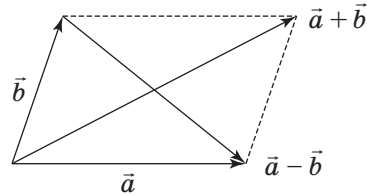


рис. П.1.4

Помимо сложения и вычитания, векторы можно умножать на *скаляр*, т. е. величину, характеризуемую только своим численным значением.

Умножив вектор $\vec{a}$ на число α , получим вектор $\vec{b}$, параллельный исходному, но имеющий длину, в α 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 $\vec{a}$.

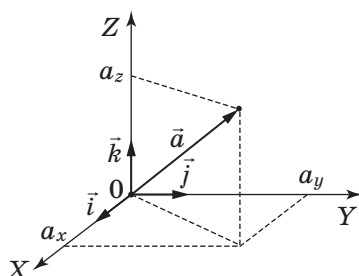


рис. П.1.5

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

$$a_x = b_x, \quad a_y = b_y, \quad a_z = b_z.$$

Проекция геометрической суммы нескольких векторов равна алгебраической сумме проекций слагаемых векторов: если $\vec{a} = \vec{b} + \vec{c}$, то

$$a_x = b_x + c_x, \quad a_y = b_y + c_y, \quad a_z = b_z + c_z. \quad (\text{П.1.4})$$

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 г. 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 A — и, складываясь с не рассеянным пучком, создаёт на фотопластинке интерференционную картину. После проявления мы обнаружим на ней светлые и тёмные 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 A' (рис. П.2.1, б).

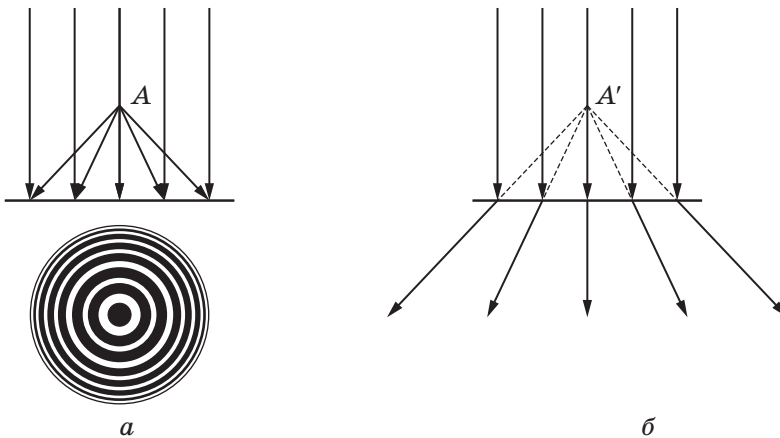


рис. П.2.1

Совокупность большого числа точек, принадлежащих какому-либо предмету, имеющему пространственную протяжённость, даёт при записи голограммы накладывающиеся 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.

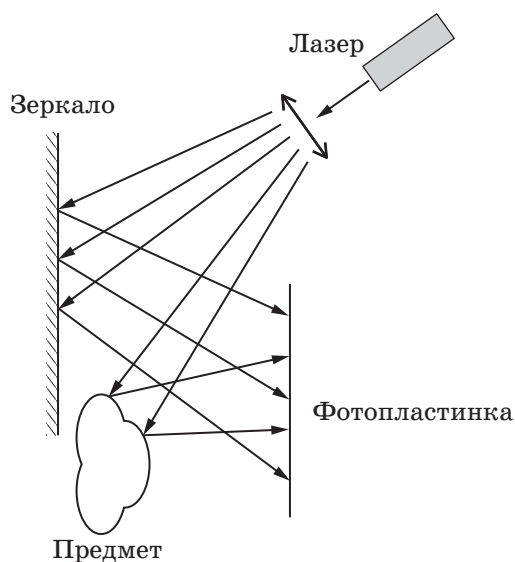


рис. П.2.2

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.

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.

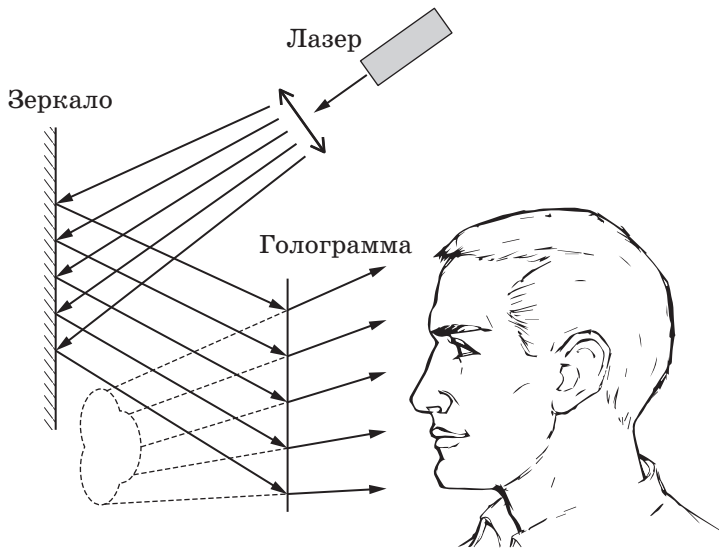


рис. П.2.3

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.

3. Тормозное рентгеновское излучение

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*. Природа его долгое время была неясна, пока в 1912 г. Макс Лауэ не обнаружил дифракцию рентгеновских лучей на поверхности кристаллов. Стало ясно, что это электромагнитное излучение с весьма короткими длинами волн λ , заключёнными в интервале от 0,01 до 1 нм.

Источником рентгеновского излучения служит рентгеновская трубка, представляющая собой откачанный стеклянный сосуд. 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 (в данном случае ускорение отрицательно), излучают электромагнитные волны. Поэтому в результате торможения электронов возникают рентгеновские лучи. Кривые зависимости их интенсивности I от длины волны λ при разных значениях ускоряющего напряжения U приведены на рис. П.3.2. 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.

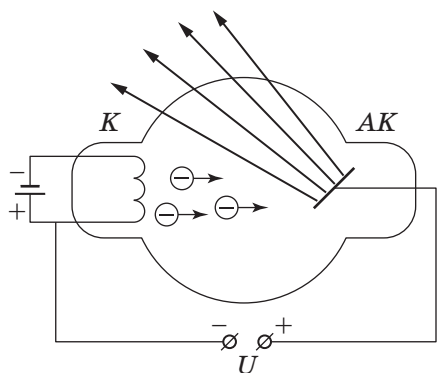


рис. П.3.1

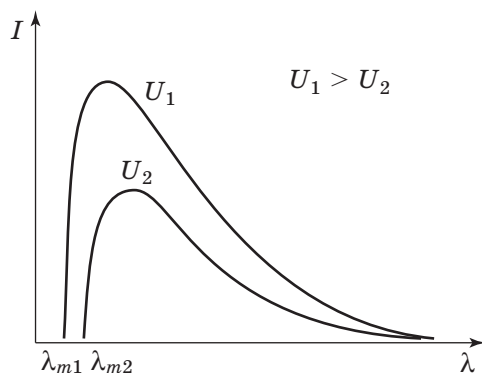


рис. П.3.2

Испускание рентгеновских лучей можно рассматривать как процесс, обратный фотоэффекту. Представим себе, что мы сняли на киноплёнку процесс выбивания электронов фотонами и при просмотре пустили плёнку в обратном направлении. Вначале мы увидим электроны, приближающиеся к поверхности катода, а в конце — испущенные с неё фотоны. Тогда можно воспользоваться уравнением (5.6), в котором U_s будет играть роль *ускоряющего напряжения* U . Поскольку величина его составляет десятки киловольт, $eU_s \gg A$ и работой выхода A в этом уравнении можно пренебречь. В результате будем иметь

$$h\nu_{\max} = eU.$$

Смысл полученного уравнения состоит в том, что энергия eU , которую приобрел электрон, пройдя разность потенциалов U , передаётся излучаемому при его торможении фотону, энергия которого

$h\nu_{\max}$. Выразив частоту рентгеновских лучей через их длину волны, получим

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{\nu_{\max}} = \frac{ch}{eU}. \quad (\text{П.3.1})$$

Экспериментально установлено, что произведение минимальной длины волны рентгеновских лучей $\lambda_{\min}$ на ускоряющее напряжение остаётся постоянным при любом U :

$$\lambda_{\min}U = \text{const}. \quad (\text{П.3.2})$$

Сравнивая (П.3.1) и (П.3.2), получим $\lambda_{\min}U = \frac{ch}{e}$, откуда, изменив на опыте U и $\lambda_{\min}$, можно найти численное значение постоянной Планка:

$$h = \frac{eU \cdot \lambda_{\min}}{c}.$$

Этот способ определения постоянной Планка считается одним из самых точных из всех известных.

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 среднего школьного возраста
орта мектеп жасындағы балаларға арналған

СПРАВОЧНИК ШКОЛЬНИКА. ВСЕ ТЕМЫ ОГЭ И ЕГЭ: 5—11 КЛАССЫ

Попов Анатолий Васильевич

ФИЗИКА

(орыс тілінде)

Ответственный редактор **А. Жилинская**

Ведущий редактор **Т. Судакова**

Научный редактор **М. Фёдоров**

Художественный редактор **И. Лапин**

В оформлении обложки использована иллюстрация:

Elina Li / Shutterstock.com

Используется по лицензии от Shutterstock.com

ООО «Издательство «Эксмо»

123308, Москва, ул. Зорге, д. 1. Тел. 8 (495) 411-68-86.

Home page: www.eksmo.ru E-mail: info@eksmo.ru

Өндіруші: «ЭКМО» АҚБ Баспасы, 123308, Мәскеу, Ресей, Зорге көшесі, 1 үй.

Тел. 8 (495) 411-68-86.

Home page: www.eksmo.ru E-mail: info@eksmo.ru.

Тауар белгісі: «Эксмо»

Қазақстан Республикасында дистрибьютор және өнім бойынша
арыз-талаптарды қабылдаушының

өкілі «РДЦ-Алматы» ЖШС, Алматы қ., Домбровский көш., 3-а, литер Б, офис 1.

Тел.: 8 (727) 2 51 59 89, 90, 91, 92, факс: 8 (727) 251 58 12 вн. 107; E-mail: RDC-Almaty@eksmo.kz

Өнімнің жарамдылық мерзімі шектелмеген.

Сертификация туралы ақпарат сайтта: www.eksmo.ru/certification

Оптовая торговля книгами «Эксмо»:

ООО «ТД «Эксмо», 142700, Московская обл., Ленинский р-н, г. Видное,

Белокаменное ш., д. 1, многоканальный тел. 411-50-74.

E-mail: reception@eksmo-sale.ru

По вопросам приобретения книг «Эксмо» зарубежными оптовыми

покупателями обращаться в отдел зарубежных продаж ТД «Эксмо»

E-mail: international@eksmo-sale.ru

International Sales: International wholesale customers should contact

Foreign Sales Department of Trading House «Eksmo» for their orders.

international@eksmo-sale.ru

По вопросам заказа книг корпоративным клиентам, в том числе в специальном

оформлении, обращаться по тел. +7 (495) 411-68-59, доб. 2261.

E-mail: ivanova.ey@eksmo.ru

Сведения о подтверждении соответствия издания согласно законодательству РФ
о техническом регулировании можно получить по адресу: <http://eksmo.ru/certification/>

Өндірген мемлекет: Ресей. Сертификация қарастырылған

Подписано в печать 15.06.2017.

Формат 70x100^{1/16}. Печать офсетная. Усл. печ. л. 28,52.

Тираж экз. Заказ



ISBN 978-5-699-95853-5



9 785699 958535 >



**СПРАВОЧНИК СОДЕРЖИТ
ПРОСТОЕ И ДОСТУПНОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ ТЕМ,
ПРОВЕРЯЕМЫХ НА ОГЭ И ЕГЭ ПО ФИЗИКЕ.**

По каждому разделу приводятся:

- важные теоретические сведения;
- понятия, физические законы, формулы;
- наглядные материалы: схемы и таблицы;
- вопросы и типовые задания в форме ОГЭ и ЕГЭ.

С помощью справочника вы:

- освоите сложные темы;
- повторите ключевые понятия и законы;
- быстро найдете нужную информацию;
- систематизируете свои знания при подготовке к урокам и экзаменам.

ISBN 978-5-699-95853-5



www.facebook.com/eksmodetstvo