

**ИНТЕНСИВНАЯ ПОДГОТОВКА
ЕДИНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭКЗАМЕН**



ФИЗИКА

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СПРАВОЧНИК



ЭКСМО

**ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
ПЕДАГОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**



О.П. Бальва, А.А. Фадеева

ФИЗИКА

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СПРАВОЧНИК

МОСКВА



2010

Авторы:

Теоретическая часть: О. П. Бальва — *кандидат физико-математических наук*

Тренировочные варианты: А. А. Фадеева — *доктор педагогических наук, профессор*

Б 21 Бальва О. П.
ЕГЭ. Физика : универсальный справочник / О. П. Бальва, А. А. Фадеева. — М. : Эксмо, 2010. — 352 с. — (ЕГЭ. Универсальный справочник).

ISBN 978-5-699-37671-1

Справочник адресован *выпускникам и абитуриентам* для подготовки к единому государственному экзамену по физике. Пособие содержит подробный теоретический материал по всем темам, проверяемым экзаменом по физике. После каждого раздела даются примеры заданий ЕГЭ и тренировочный тест. Для итогового контроля знаний в конце справочника приводятся четыре тренировочных варианта, соответствующих ЕГЭ по физике, а также бланки ответов. Ко всем заданиям приводятся ответы.

Издание будет полезно *учителям физики, репетиторам и родителям*, поможет эффективно организовать подготовку учащихся к единому государственному экзамену.

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я721

© Бальва О. П. (теоретическая часть),
Фадеева А. А. (тренировочные варианты), 2009
© ООО «Издательство «Эксмо», 2009

ISBN 978-5-699-37671-1

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ КУРС С ПРИМЕРАМИ ЗАДАНИЙ ЕГЭ

Раздел 1 МЕХАНИКА

1.1. Кинематика	9	1.2.5. Сила. Принцип суперпозиции сил	28
1.1.1. Система отсчета	9	1.2.6. Второй закон Ньютона	29
1.1.2. Поступательное движение	10	1.2.7. Третий закон Ньютона	30
1.1.3. Материальная точка	10	1.2.8. Закон всемирного тяготения	32
1.1.4. Траектория	10	1.2.9. Сила тяжести	32
1.1.5. Способы задания положения точки и описание ее движения	11	1.2.10. Масса тела	33
1.1.6. Перемещение и путь	12	1.2.11. Плотность вещества	34
1.1.7. Скорость	13	1.2.12. Движение тела под действием силы тяжести	35
1.1.8. Относительность механического движения	14	1.2.13. Вес	36
1.1.9. Относительная скорость	15	1.2.14. Невесомость и перегрузка	37
1.1.10. Закон сложения скоростей	15	1.2.15. Космические скорости	38
1.1.11. Равномерное движение	16	1.2.16. Сила упругости	39
1.1.12. Ускорение	17	1.2.17. Закон Гука	39
1.1.13. Равнопеременное движение	18	1.2.18. Сила трения	40
1.1.14. Равномерное движение точки по окружности	20	1.2.19. Давление	42
1.1.15. Вращательное движение твердого тела. Угловая скорость	21	• Примеры заданий ЕГЭ по теме 1.2	44
• Примеры заданий ЕГЭ по теме 1.1	22	1.3. Статика	46
1.2. Основы динамики	24	1.3.1. Момент силы	46
1.2.1. Первый закон Ньютона	24	1.3.2. Равновесие механической системы (абсолютно твердого тела)	47
1.2.2. Инерциальные системы отсчета	24	1.3.3. Закон Паскаля	48
1.2.3. Принцип относительности Галилея	26	1.3.4. Давление покоящейся жидкости на дно и стенки сосуда (гидростатическое давление)	49
1.2.4. Взаимодействие	27	1.3.5. Закон Архимеда	51
		1.3.6. Условие плавания тел	53
		• Примеры заданий ЕГЭ по теме 1.3	56

1.4. Законы сохранения в механике	58
1.4.1. Импульс тела	58
1.4.2. Импульс силы	58
1.4.3. Импульс системы тел.	
Закон сохранения импульса	59
1.4.4. Работа силы	60
1.4.5. Энергия. Кинетическая и потенциальная энергия.	
Закон сохранения энергии	62
1.4.6. Мощность	66
1.4.7. Простые механизмы. КПД механизмов.	66
1.4.8. Столкновение тел. Упругий и неупругий удары	69
• Примеры заданий ЕГЭ по теме 1.4	70
1.5. Механические колебания и волны	72
1.5.1. Механические колебания	72
1.5.2. Амплитуда колебаний	72
1.5.3. Период колебаний	72
1.5.4. Частота колебаний	73
1.5.5. Гармонические колебания	73
1.5.6. Свободные колебания	74
1.5.7. Фаза колебаний	76
1.5.8. Затухающие колебания	77
1.5.9. Вынужденные колебания	77
1.5.10. Резонанс	78
1.5.11. Упругие волны (механические волны)	80
1.5.12. Длина и скорость волны	82
1.5.13. Звук (звуковые волны)	83
1.5.14. Скорость звука	87
1.5.15. Инфразвук	88
1.5.16. Ультразвук	88
1.5.17. Интерференция волн	89
1.5.18. Дифракция волн	91
• Примеры заданий ЕГЭ по теме 1.5	92
• Тренировочный тест к разделу 1	94

Раздел 2

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

2.1. Молекулярная физика	100
2.1.1. Основы молекулярно-кинетической теории	100
2.1.2. Обоснования молекулярно-кинетической теории	102
2.1.3. Модели строения газов, жидкостей и твердых тел в МКТ	105

2.1.4. Модель идеального газа в МКТ	107
2.1.5. Основное уравнение МКТ (давление газа)	107
2.1.6. Температура и ее измерение	109
2.1.7. Шкала абсолютных температур	110
2.1.8. Температура как мера кинетической энергии	111
2.1.9. Уравнение Менделеева-Клапейрона (уравнение состояния идеального газа)	112
2.1.10. Изопроцессы в газах	113
2.1.11. Свойства тел в разных агрегатных состояниях	115
2.1.12. Испарение и конденсация	116
2.1.13. Насыщенные и ненасыщенные пары	117
2.1.14. Кипение жидкости	118
2.1.15. Влажность воздуха	120
2.1.16. Плавление и кристаллизация	121

• Примеры заданий ЕГЭ по теме 2.1	124
--	-----

2.2. Термодинамика	126
2.2.1. Внутренняя энергия	126
2.2.2. Теплообмен	128
2.2.3. Количество теплоты. Удельная теплоемкость вещества	131
2.2.4. Работа в термодинамике	132
2.2.5. Первый закон термодинамики	133
2.2.6. Второй закон термодинамики	135
2.2.7. Принцип действия тепловых двигателей	136
2.2.8. Коэффициент полезного действия теплового двигателя	136

• Примеры заданий ЕГЭ по теме 2.2	138
--	-----

• Тренировочный тест к разделу 2	140
---	-----

Раздел 3

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

3.1. Электростатика	146
3.1.1. Электризация тел	146
3.1.2. Взаимодействие зарядов. Два вида электрических зарядов	147
3.1.3. Закон сохранения электрического заряда	148
3.1.4. Закон Кулона	149
3.1.5. Электрическое поле. Действие электрического поля на электрические заряды	150
3.1.6. Напряженность электрического поля	150

4.6. Корпускулярно-волновой дуализм	248	4.8. Физика атомного ядра	264
4.6.1. Гипотеза Планка о квантах	248	4.8.1. Состав ядра	264
4.6.2. Фотоэффект	248	4.8.2. Ядерные силы	265
4.6.3. опыты Столетова	248	4.8.3. Энергия связи нуклонов в ядре	266
4.6.4. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта	249	4.8.4. Радиоактивность	267
4.6.5. Фотоны. Энергия и импульс фотона	250	4.8.5. Закон радиоактивного распада. Период полураспада	268
4.6.6. Корпускулярно-волновой дуализм. Гипотеза де Бройля о волновых свойствах частиц	250	4.8.6. Экспериментальные методы регистрации элементарных частиц	269
4.6.7. Дифракция электронов	251	4.8.7. Ядерные реакции	270
• Примеры заданий ЕГЭ по теме 4.6	252	4.8.8. Деление и синтез ядер	272
4.7. Физика атома	254	• Примеры заданий ЕГЭ по теме 4.8	276
4.7.1. Планетарная модель атома	254	• Тренировочный тест к разделу 4	278
4.7.2. Постулаты Бора	255	• Ответы к примерам заданий ЕГЭ и тренировочным тестам к разделам	284
4.7.3. Оптические спектры	256		
4.7.4. Лазер	259		
• Примеры заданий ЕГЭ по теме 4.7	262	Справочный материал	290

ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

Вариант 1	301
Вариант 2	313
Вариант 3	323
Вариант 4	335
Ответы	347

ФИЗИКА

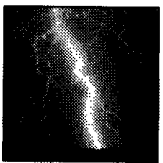
Теоретический курс с примерами заданий ЕГЭ



Механика



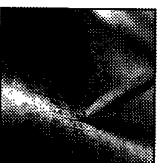
**Молекулярная физика.
Термодинамика**



Электродинамика



**Основы специальной
теории относительности.
Квантовая физика**



Справочный материал





Механика

Механика — наука о механическом движении материальных тел и происходящих при этом взаимодействиях между ними.

Под механикой обычно понимают так называемую классическую механику, в основе которой лежат *законы механики Ньютона*. Механика Ньютона изучает движение любых материальных тел (кроме элементарных частиц) при условии, что эти тела движутся со скоростями, намного меньшими скорости света (движение тел со скоростями порядка скорости света рассматривают в теории относительности, а внутриатомные явления и движение элементарных частиц — в квантовой механике).

Под механическим движением понимают изменение с течением времени взаимного расположения тел или их частей в пространстве: например, движение небесных тел, колебания земной коры, воздушные и морские течения, движение летательных аппаратов и транспортных средств, машин и механизмов, деформации элементов конструкций и сооружений, движение жидкостей и газов и др.

В механике рассматривают взаимодействия тел, результатом которых являются изменения скоростей точек этих тел или их деформации. Например, притяжение тел по закону всемирного тяготения, взаимное давление соприкасающихся тел, воздействие частиц жидкости или газа друг на друга и на движущиеся или покоящиеся в них тела и т. п.

При изучении движения материальных тел оперируют рядом понятий, которые отражают те или иные свойства реальных тел, например:

- **материальная точка** — объект пренебрежимо малых размеров, имеющий массу. Это понятие можно использовать, когда тело движется поступательно или когда в изучаемом движении можно пренебречь вращением тела вокруг его центра масс;
- **абсолютно твердое тело** — тело, расстояние между двумя любыми точками которого не меняется. Это понятие применимо, когда можно пренебречь деформацией тела;
- **сплошная изменяемая среда** — это понятие применимо, когда можно пренебречь молекулярной структурой тела. Его используют при изучении движения жидкостей, газов, деформируемых твердых тел.

Механика состоит из следующих разделов:

- 1) механика материальной точки;
- 2) механика абсолютно твердого тела;
- 3) механика сплошной среды, в которую, в свою очередь, входят:
 - а) теория упругости;
 - б) теория пластичности;
 - в) гидродинамика;
 - г) аэродинамика;
 - д) газовая динамика.

Каждый из перечисленных разделов состоит из *статики, динамики и кинематики*.

Статика — это учение о равновесии тел под действием сил (греч. *statos* — стоящий).

Динамика — это учение о движении тел под действием сил.

Кинематика — это учение о геометрических свойствах движения тел.

Кроме перечисленных выше разделов механики имеют самостоятельное значение теория колебаний, теория устойчивости движения, механика тел переменной массы, теория автоматического регулирования, теория удара и др.

Механика тесно связана с другими разделами физики. Большое значение механика имеет для многих разделов астрономии, особенно для небесной механики (движение планет и звезд и т. д.).

Для техники механика имеет особое значение. Например, гидродинамика, аэродинамика, динамика машин и механизмов, теория движения наземных, воздушных и транспортных средств используют уравнения и методы теоретической механики.

1.1. Кинематика

Кинематика (греч. *kinematos* — движение) — раздел механики, в котором изучаются геометрические свойства движения тел без учета их массы и действующих на них сил.

Другими словами, в кинематике дается описание того, как движутся тела (по каким *траекториям*, с какими *скоростями* и *ускорениями*), без выяснения причин, почему они так движутся.

Кинематика как раздел механики существует для изучения движения:

- точки и твердого тела (не поддающегося деформации);
- твердого тела, поддающегося упругой или пластической деформации;
- жидкости;
- газа.

Основные задачи кинематики точки и твердого тела:

1. Описание движений, совершаемых точками по отношению к выбранной *системе отсчета*, с помощью уравнений, таблиц или графиков. Описать движение точки значит определить положение точки в любой момент времени (или определить так называемые законы движения).
2. Определение кинематических характеристик движения. Кинематическими характеристиками движения точки являются ее *скорость* и *ускорение*.
3. Изучение сложных (составных) движений и определение зависимости между характеристиками этих движений. Под сложным движением понимают движение тела относительно системы координат, которая сама движется (относительно другой, неподвижной системы координат).

1.1.1. Система отсчета

Система координат X, Y, Z , тело отсчета, с которым она связана, и прибор для измерения времени (часы) образуют систему отсчета, относительно которой рассматривается движение тела (рис. 1.1).

Телом отсчета называется тело, относительно которого рассматривается изменение положения других тел в пространстве.

Систему отсчета можно выбрать произвольно. При кинематических исследованиях все системы отсчета равноправны. В задачах динамики также можно использовать любые произвольно движущиеся системы отсчета, но удобнее всего *инерциальные системы отсчета*, так как в них характеристики движения имеют более простой вид.

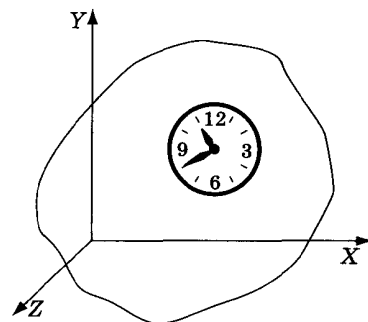


Рис. 1.1

1.1.2. Поступательное движение

Поступательное движение — это движение твердого тела, при котором прямая, соединяющая две любые точки тела, перемещается параллельно своему начальному направлению.

При поступательном движении все точки тела описывают одинаковые (при наложении совпадающие) траектории и имеют в каждый момент времени одинаковые по модулю и направлению скорости и ускорения.

Поступательное движение может быть как криволинейным, так и прямолинейным. Например, поступательно движется кабина колеса обозрения. Человек, стоящий на ступеньке движущегося эскалатора, также движется поступательно. Для описания его движения (т. е. определения изменения скорости со временем, пути) достаточно рассмотреть движение только одной его точки.

Другими словами, изучение поступательного движения твердого тела сводится к задаче кинематики точки.

1.1.3. Материальная точка

Материальная точка — объект пренебрежимо малых размеров, имеющий массу.

Понятие «материальная точка» вводится для описания (с помощью математических формул) механического движения тел. Делается это потому, что описывать движение точки проще, чем реального тела, частицы которого к тому же могут двигаться с разными скоростями (например, при вращении тела или деформациях).

Если реальное тело заменяют материальной точкой, то этой точке приписывают массу этого тела, но пренебрегают его размерами, а заодно пренебрегают различием характеристик движения его точек (скоростей, ускорений и т. д.), если таковое имеется. В каких случаях это можно делать?

Практически любое тело можно рассматривать как материальную точку, если расстояния,ходимые точками тела, очень велики по сравнению с его размерами.

Например, материальными точками считают Землю и другие планеты при изучении их движения вокруг Солнца. В данном случае различия в движении различных точек любой планеты, вызванные ее суточным вращением, не влияют на величины, описывающие годовое движение.

Следовательно, если в изучаемом движении тела можно пренебречь его вращением вокруг оси, такое тело можно представить как материальную точку.

Однако при решении задач, связанных с суточным вращением планет (например, при определении восхода Солнца в разных местах поверхности земного шара), считать планету материальной точкой бессмысленно, так как результат задачи зависит от размеров этой планеты и скорости движения точек ее поверхности.

Материальной точкой правомерно считать самолет, если требуется, например, определить среднюю скорость его движения на пути из Москвы в Новосибирск. Но при вычислении силы сопротивления воздуха, действующей на летящий самолет, считать его материальной точкой нельзя, поскольку сила сопротивления зависит от размеров и формы самолета.

Если тело движется поступательно, даже если его размеры сопоставимы с расстояниями, которые оно проходит, это тело можно рассматривать как материальную точку (поскольку все точки тела движутся одинаково).

В заключение можно сказать: тело, размерами которого в условиях рассматриваемой задачи можно пренебречь, можно считать материальной точкой.

1.1.4. Траектория

Траектория — это линия (или, как принято говорить, кривая), которую описывает тело при движении относительно выбранного тела отсчета.

Говорить о траектории имеет смысл лишь в том случае, когда тело можно представить в виде материальной точки.

Траектории могут иметь разную форму. О форме траектории иногда удается судить по видимому следу, который оставляет движущееся тело, например, летящий самолет или проносящийся в ночном небе метеор.

Форма траектории зависит от выбора тела отсчета. Например, относительно Земли траектория движения Луны представляет собой окружность, относительно Солнца — линию более сложной формы (рис. 1.2).

При изучении механического движения в качестве тела отсчета, как правило, рассматривается Земля.

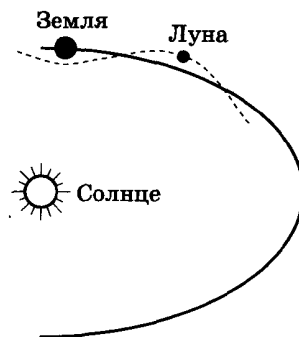


Рис. 1.2

1.1.5. Способы задания положения точки и описание ее движения

Положение точки в пространстве задается двумя способами: 1) с помощью координат; 2) с помощью радиус-вектора.

Положение точки с помощью координат задается тремя проекциями точки x , y , z на оси декартовой системы координат OX , OY , OZ , связанные с телом отсчета (рис. 1.3). Для этого из точки A необходимо опустить перпендикуляры на плоскости YZ (координата x), XZ (координата y), XY (координата z) соответственно. Записывается это так: $A(x, y, z)$. Для конкретного случая, изображенного на рис. 1.3 ($x = 6$, $y = 10$, $z = 4,5$), точка A обозначается $A(6; 10; 4,5)$.

Наоборот, если заданы конкретные значения координат точки в данной системе координат, то для изображения самой точки необходимо отложить значения координат на соответствующие оси (x на ось OX и т. д.) и на этих трех взаимно перпендикулярных отрезках построить параллелепипед. Вершина его, противоположная началу координат O и лежащая на диагонали параллелепипеда, и будет искомой точкой A .

Если точка движется в пределах некоторой плоскости, то через выбранные на теле отсчета точки достаточно провести две координатные оси: OX и OY . Тогда положение точки на плоскости определяют двумя координатами x и y (рис. 1.4).

Если точка движется вдоль прямой, достаточно задать одну координатную ось OX и направить ее вдоль линии движения.

Задание положения точки A с помощью радиус-вектора осуществляется соединением точки A с началом координат O (рис. 1.4). Направленный отрезок $OA = \vec{r}$ называется *радиус-вектором*.

Радиус-вектор — это вектор, соединяющий начало отсчета с положением точки в произвольный момент времени.

Точка задана радиус-вектором, если известны его длина (модуль) и направление в пространстве, т. е. значения его проекций r_x , r_y , r_z на оси координат OX , OY , OZ , либо углы между радиус-вектором и осями координат. Для случая движения на плоскости (рис. 1.4) имеем:

$$\begin{aligned} x &= r_x = r \cos \alpha, \\ y &= r_y = r \sin \alpha. \end{aligned}$$

Здесь $r = |\vec{r}|$ — модуль радиус-вектора $\vec{r}$, r_x и r_y — его проекции на оси координат, все три величины — скаляры; x и y — координаты точки A .

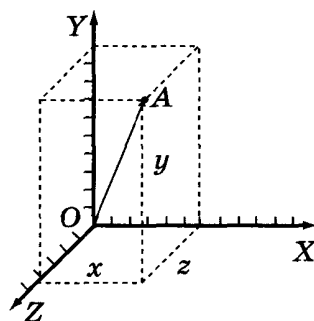


Рис. 1.3

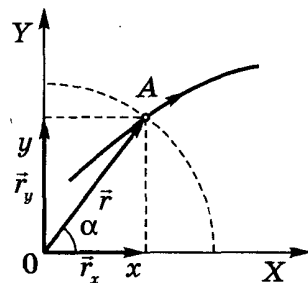


Рис. 1.4

Последние уравнения демонстрируют связь между координатным и векторным способами задания положения точки.

Вектор $\vec{r}$ можно также разложить на составляющие по осям X и Y , т. е. представить в виде суммы двух векторов (рис. 1.4):

$$\vec{r} = \vec{r}_x + \vec{r}_y.$$

Таким образом, положение точки в пространстве задается либо ее координатами, либо радиус-вектором.

Способы описания движения точки

В соответствии со способами задания координат движение точки можно описать: 1) координатным способом; 2) векторным способом.

При координатном способе описания (или задания) движения изменение координат точки со временем записывается в виде функций всех трех ее координат от времени:

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

Уравнения (1.1) называют кинематическими уравнениями движения точки, записанными в координатной форме. Зная кинематические уравнения движения и начальные условия (т. е. положение точки в начальный момент времени), можно определить положение точки в любой момент времени.

При векторном способе описания движения точки изменение ее положения со временем задается зависимостью радиус-вектора от времени:

$$\vec{r} = \vec{r}(t). \quad (1.2)$$

Уравнение (1.2) представляет собой уравнение движения точки, записанное в векторной форме. Если оно известно, то для любого момента времени можно рассчитать радиус-вектор точки, т. е. определить ее положение (как и в случае координатного способа). Таким образом, задание трех скалярных уравнений (1.1) равносильно заданию одного векторного уравнения (1.2).

Для каждого случая движения вид уравнений (1.1) или (1.2) будет вполне определенным. Если траекторией движения точки является прямая линия, движение называется *прямолинейным*, а если кривая — *криволинейным*.

1.1.6. Перемещение и путь

Перемещение в механике — это вектор, соединяющий положения движущейся точки в начале и в конце некоторого промежутка времени.

Понятие вектора перемещения вводится для решения задачи кинематики — определить положение тела (точки) в пространстве в данный момент времени, если известно его начальное положение.

На рис. 1.5 вектор $\overline{M_1 M_2}$ соединяет два положения движущейся точки — M_1 и M_2 в моменты времени t_1 и t_2 соответственно и, согласно определению, является вектором перемещения. Если точка M_1 задана радиус-вектором $\vec{r}_1$, а точка M_2 — радиус-вектором $\vec{r}_2$, то, как видно из рисунка, вектор перемещения равен разности этих двух векторов, т. е. изменению радиус-вектора за время $\Delta t = t_2 - t_1$:

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1.$$

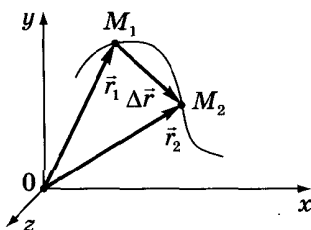


Рис. 1.5

Поскольку путь — это длина участка траектории, пройденного материальной точкой за данный промежуток времени, модуль вектора перемещения в общем случае не равен длине пути, пройденного точкой за время Δt (траектория может быть криволинейной, и, кроме того, точка может менять направление движения).

Модуль вектора перемещения равен пути **только** при прямолинейном движении в одном направлении. Если направление прямолинейного движения меняется, модуль вектора перемещения меньше пути.

При криволинейном движении модуль вектора перемещения также меньше пути, т. к. хорда всегда меньше длины дуги, которую она стягивает (рис. 1.5).

1.1.7. Скорость

Скорость характеризует быстроту, с которой происходят любые изменения в окружающем нас мире (движение материи в пространстве и времени). Движение пешехода по тротуару, полет птицы, распространение звука, радиоволн или света в воздухе, вытекание воды из трубы, движение облаков, испарение воды, нагрев утюга — все эти явления характеризуются определенной скоростью.

При механическом движении тел скорость характеризует не только быстроту, но и направление движения, т. е. является *векторной величиной*.

Скоростью $\vec{v}$ точки называется предел отношения перемещения $\Delta \vec{r}$ к промежутку времени Δt , в течение которого это перемещение произошло, при стремлении Δt к нулю:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

Определенное таким образом понятие скорости называют также **мгновенной скоростью**. Это определение скорости справедливо для любых видов движения — от *криволинейного неравномерного* до *прямолинейного равномерного*. Когда говорят о скорости при неравномерном движении, под ней понимают именно мгновенную скорость. Из этого определения непосредственно вытекает векторный характер скорости, поскольку *перемещение* — векторная величина. Вектор мгновенной скорости $\vec{v}$ всегда направлен по касательной к траектории движения. Он указывает направление, по которому происходило бы движение тела, если бы с момента времени t на него прекратилось действие любых других тел (рис. 1.6).

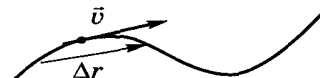


Рис. 1.6

Средняя скорость

Средняя скорость точки вводится для характеристики неравномерного движения (т.е. движения с переменной скоростью) и определяется двояко.

1. Средняя скорость точки $v_{\text{ср}}$ равна отношению всего пройденного телом пути Δs ко всему времени движения Δt :

$$v_{\text{ср}} = \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

При таком определении средняя скорость — скаляр, т. к. пройденный путь (расстояние) и время — величины скалярные.

Такой способ определения дает представление о *средней скорости движения на участке траектории (средней путевой скорости)*.

2. Средняя скорость точки равна отношению перемещения точки к промежутку времени, в течение которого это перемещение произошло:

$$\vec{v}_{\text{ср}} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

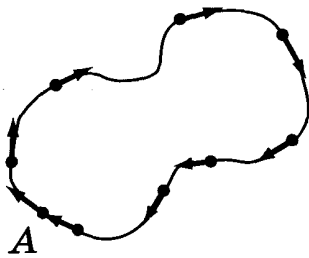


Рис. 1.7

Средняя скорость перемещения — величина *векторная*.

Для неравномерного криволинейного движения такое определение средней скорости не всегда позволяет определить даже приблизительно реальные скорости на пути движения точки. Например, если точка двигалась по замкнутой траектории в течение некоторого времени (рис. 1.7), то перемещение ее равно нулю (но скорость явно отличалась от нуля). В этом случае лучше пользоваться первым определением средней скорости.

В любом случае следует различать эти два определения средней скорости и знать, о какой из них идет речь.

1.1.8. Относительность механического движения

С относительностью механического движения мы знакомы с детства. Так, сидя в поезде и наблюдая за трогаящимся с места поездом, стоявшим до этого на параллельном пути, мы часто не можем определить, какой из поездов на самом деле начал двигаться. И здесь сразу следует уточнить: двигаться относительно чего? Относительно Земли, конечно. Потому что относительно соседнего поезда мы начали двигаться независимо от того, какой из поездов начал свое движение относительно Земли.

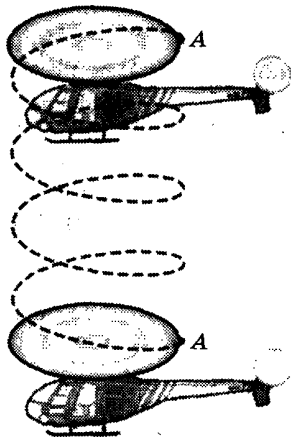


Рис. 1.8

Относительность механического движения заключается в относительности скоростей перемещения тел: скорости тел относительно разных систем отсчета будут различны (скорость человека, перемещающегося в поезде, пароходе, самолете, будет отличаться как по величине, так и по направлению, в зависимости от того, в какой системе отсчета эти скорости определяются: в системе отсчета, связанной с движущимся транспортным средством, или с неподвижной Землей).

Различными будут и траектории движения тела в разных системах отсчета. Так, например, вертикально падающие на землю капли дождя, оставят след в виде косых струй на окне вагона мчащегося поезда. Точно также любая точка на вращающемся пропеллере летящего самолета или спускающегося на землю вертолета описывает окружность относительно самолета и гораздо более сложную кривую — винтовую линию, относительно Земли, рис. 1.8. Таким образом, *при механическом движении относительной является также и траектория движения*.

Путь, пройденный телом, также зависит от системы отсчета. Возвращаясь все к тому же пассажиру, сидящему в поезде, мы понимаем, что путь, проделанный им относительно поезда за время поездки, равен нулю (если он не передвигался по вагону) или, во всяком случае, намного меньше того пути, который он преодолел вместе с поездом относительно Земли. Таким образом, *при механическом движении относительным является также и путь*.

Осознание относительности механического движения (т. е. того, что движение тела можно рассматривать в разных системах отсчета) привело к переходу от геоцентрической системы мира Птолемея к гелиоцентрической системе Коперника. Птолемей, следуя наблюдаемому издревле движению Солнца и звезд на небосклоне, в центре Вселенной расположил неподвижную Землю с вращающимися вокруг нее остальными небесными телами. Коперник же считал, что Земля и другие планеты вращаются вокруг Солнца и одновременно вокруг своих осей.

Таким образом, изменение системы отсчета (Земля — в геоцентрической системе мира и Солнце — в гелиоцентрической) привело к гораздо более прогрессивной гелиоцентрической системе, позволяющей решить многие научные и прикладные задачи астрономии и изменить взгляды человечества на Вселенную.

1.1.9. Относительная скорость

Если два тела движутся в одной и той же системе отсчета со скоростями $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$, то скорость первого тела относительно второго $\vec{v}_{12}$ равна разности скоростей этих тел:

$$\vec{v}_{12} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2.$$

Так, при движении тел в одном направлении (обгон) модуль относительной скорости равен разности скоростей, а при встречном движении — сумме скоростей.

1.1.10. Закон сложения скоростей

Закон сложения скоростей устанавливает связь между значениями скорости *материальной точки* относительно различных *систем отсчета*, движущихся друг относительно друга. В нерелятивистской (классической) физике, когда рассматриваемые скорости малы по сравнению со скоростью света, справедлив закон сложения скоростей Галилея, который выражается формулой:

$$\vec{v}_2 = \vec{v}_1 + \vec{v}, \quad (1.3)$$

где $\vec{v}_2$ и $\vec{v}_1$ — скорости тела (точки) относительно двух *инерциальных систем отсчета* — неподвижной системы отсчета K_2 и системы отсчета K_1 , движущейся со скоростью $\vec{v}$ относительно K_2 .

Формула (1.3) может быть получена путем сложения векторов перемещений.

Для наглядности рассмотрим движение лодки со скоростью $\vec{v}_1$ относительно реки (система отсчета K_1), воды которой движутся со скоростью $\vec{v}$ относительно берега (система отсчета K_2) (рис. 1.9). Векторы перемещений лодки относительно воды $\Delta\vec{r}_1$, реки относительно берега $\Delta\vec{r}$ и суммарный вектор перемещения лодки относительно берега $\Delta\vec{r}_2$ изображены на рис. 1.10. Математически:

$$\Delta\vec{r}_2 = \Delta\vec{r}_1 + \Delta\vec{r}. \quad (1.4)$$

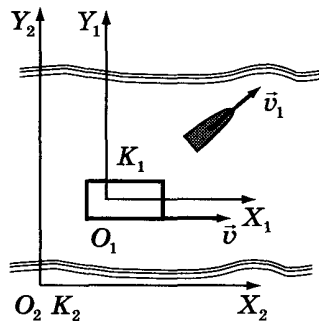


Рис. 1.9

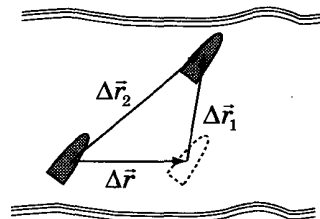


Рис. 1.10

Поделив обе части уравнения (1.4) на интервал времени Δt , получим:

$$\frac{\Delta\vec{r}_2}{\Delta t} = \frac{\Delta\vec{r}_1}{\Delta t} + \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t},$$

что равносильно уравнению (1.3). В проекциях вектора скорости на оси координат уравнение (1.3) имеет вид:

$$\begin{aligned}v_{2x} &= v_{1x} + v_x, \\v_{2y} &= v_{1y} + v_y.\end{aligned}$$

Проекции скоростей складываются алгебраически.

1.1.11. Равномерное движение

Движение точки называется равномерным, если за любые равные промежутки времени она проходит равные пути.

Например, если автомобиль за каждую четверть часа (15 мин) проходит 20 км, за каждые полчаса (30 мин) — 40 км, за каждый час (60 мин) — 80 км и т. д., то такое движение считается равномерным.

При равномерном движении численная величина (модуль) скорости точки v — величина постоянная:

$$v = |\vec{v}| = \text{const}.$$

Равномерное движение может происходить как по криволинейной, так и по прямолинейной траектории.

Закон равномерного движения точки описывается уравнением:

$$s = s_0 + vt, \tag{1.5}$$

где s — расстояние, измеренное вдоль дуги траектории, от некоторой точки на траектории, принятой за начало отсчета; t — время точки в пути; s_0 — значение s в начальный момент времени $t = 0$.

Путь, пройденный точкой за время t , в (1.5) определяется слагаемым vt .

Равномерное прямолинейное движение

Равномерное прямолинейное движение — это движение, при котором тело перемещается с постоянной по модулю и направлению скоростью:

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

Скорость равномерного прямолинейного движения — величина постоянная и может быть определена как отношение перемещения точки к промежутку времени, в течение которого это перемещение произошло:

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

Модуль этой скорости

$$v = \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t}$$

по смыслу есть расстояние $s = |\Delta \vec{r}|$, пройденное точкой за время Δt .

Скорость тела при равномерном прямолинейном движении — это величина, равная отношению пути s ко времени, за которое этот путь пройден:

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

Перемещение при прямолинейном равномерном движении (по оси X) можно рассчитать по формуле:

$$\Delta x = v_x t,$$

где v_x — проекция скорости на ось X . Отсюда закон прямолинейного равномерного движения имеет вид:

$$x = x_0 + v_x t.$$

Если в начальный момент времени $x_0 = 0$, то

$$x = v_x t.$$

График зависимости скорости от времени — прямая, параллельная оси абсцисс, а пройденный путь — это площадь под этой прямой (рис. 1.11). **График зависимости пути от времени** — прямая линия, угол наклона которой к оси времени Ot тем больше, чем больше скорость равномерного движения. Тангенс этого угла равен скорости (рис. 1.12).

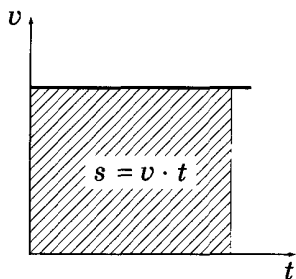


Рис. 1.11

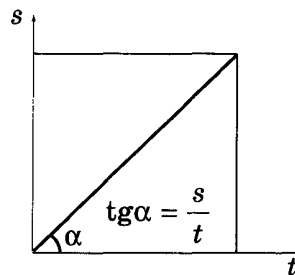


Рис. 1.12

1.1.12. Ускорение

Ускорение — величина, характеризующая быстроту изменения скорости. Как правило, движение является неравномерным, т. е. происходит с переменной скоростью. На одних участках траектории тела могут иметь большую скорость, на других — меньшую. Например, поезд, отходящий от станции, со временем двигается все быстрее и быстрее. Подъезжая к станции, он, наоборот, замедляет свое движение.

Ускорение (или мгновенное ускорение) — векторная физическая величина, равная пределу отношения изменения скорости к промежутку времени, за который это изменение произошло:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

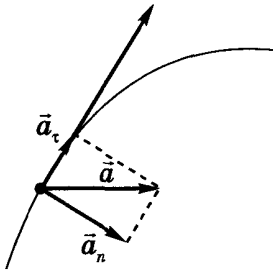


Рис. 1.13

Ускорение, как и изменение скорости, направлено в сторону вогнутости траектории и может быть разложено на две составляющие — *тангенциальную* — по касательной к траектории движения — и *нормальную* — перпендикулярно траектории (рис. 1.13).

В соответствии с этим проекцию ускорения a_t на касательную к траектории называют *касательным*, или *тангенциальным ускорением*, проекцию a_n на нормаль — *нормальным*, или *центростремительным ускорением*.

Касательное ускорение определяет величину изменения численного значения скорости:

$$a_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

Нормальное, или центростремительное ускорение характеризует изменение направления скорости и определяется по формуле:

$$a_n = \frac{v^2}{R},$$

где R — радиус кривизны траектории в соответствующей ее точке. Вывод этой формулы приведен в 1.1.4.

Модуль ускорения определяется по формуле:

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}.$$

При прямолинейном движении полное ускорение a равно тангенциальному $a = a_t$, т. к. центростремительное $a_n = 0$.

Единицей ускорения в СИ является такое ускорение, при котором за каждую секунду скорость тела изменяется на 1 м/с. Эту единицу обозначают 1 м/с² и называют «метр на секунду в квадрате».

1.1.13. Равнопеременное движение

Равнопеременное движение точки — это движение с постоянным ускорением.

Под словом *равнопеременное* понимают:

- 1) *равноускоренное движение* — если модуль скорости увеличивается, т. е. ускорение параллельно скорости:

$$\vec{a} \uparrow \uparrow \vec{v};$$

- 2) *равнозамедленное движение* — когда модуль скорости уменьшается, т. е. ускорение антипараллельно скорости: $\vec{a} \uparrow \downarrow \vec{v}$.

Ускорение и скорость при равнопеременном движении

Поскольку ускорение равнопеременного движения постоянно, оно равно изменению скорости за любой конечный интервал времени:

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

Если спроектировать ускорение и скорость на направление движения, это уравнение будет выглядеть так:

$$a = \frac{\Delta v}{t} = \frac{v - v_0}{t}, \quad (1.6)$$

где v_0 — скорость в начальный момент времени, принятый за нуль; v — текущее значение скорости (в момент времени t). Формула для определения ускорения из состояния покоя (равноускоренное движение, начальная скорость равна нулю: $v_0 = 0$) имеет вид:

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

Если же нулю равна не начальная, а конечная скорость ($v = 0$, торможение при равнозамедленном движении), то формула ускорения принимает вид:

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

Из формулы (1.6) находим выражение для скорости:

$$v = v_0 + at.$$

Графики скорости при равноускоренном движении имеют вид прямых линий, наклон которых показывает, как быстро меняется скорость с течением времени. На рис. 1.14 приведены графики для модуля скорости с ненулевой начальной скоростью для равноускоренного (II) и равнозамедленного (I) движений.

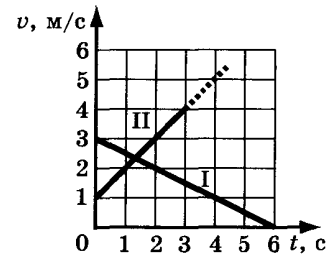


Рис. 1.14

Уравнение движения точки с постоянным ускорением

Путь при прямолинейном равнопеременном движении определяют через выражение для средней скорости, которая равна полусумме начальной и конечной скоростей. После соответствующих преобразований получим:

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

Путь при прямолинейном равноускоренном движении совпадает с проекцией вектора перемещения на направление движения, поэтому координаты тела определяются по формуле:

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

В формуле (1.7) начало координат не совпадает с началом пути ($x_0 \neq 0$). В векторной форме:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}.$$

График зависимости координаты от времени прямолинейного равноускоренного движения представлен на рис 1.15.

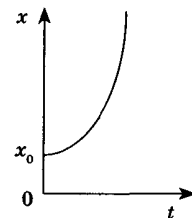


Рис. 1.15

1.1.14. Равномерное движение точки по окружности

Наряду с равномерным прямолинейным движением очень часто приходится встречаться с равномерным движением по окружности. Такое движение могут совершать точки вращающихся колес, валов и роторов турбин, искусственные спутники, обращающиеся по круговым орбитам, и т. д. При равномерном движении по окружности численное значение скорости остается постоянным. Однако направление скорости при таком движении непрерывно изменяется.

В каждой точке круговой траектории скорость точки направлена по касательной к траектории в этой точке. В этом нетрудно убедиться, коснувшись вращающегося точильного камня, имеющего форму диска, стальным резцом: раскаленные частицы камня, имеющие в момент отрыва от него определенную скорость, будут отлетать от диска по касательной к нему. Эта скорость называется *линейной скоростью вращения*.

Период и частота обращения

Равномерное движение по окружности характеризуют периодом и частотой обращения.

Период обращения — это время, за которое совершается один оборот.

Известно, что при равномерном движении время определяется делением пройденного пути, т. е. длины окружности — $l_{\text{окр}}$, на скорость движения. Таким образом,

$$T = \frac{l_{\text{окр}}}{v} = \frac{2\pi r}{v}. \quad (1.8)$$

Величина, обратная периоду, называется частотой обращения и обозначается буквой ν :

$$\nu = 1/T. \quad (1.9)$$

Центростремительное ускорение

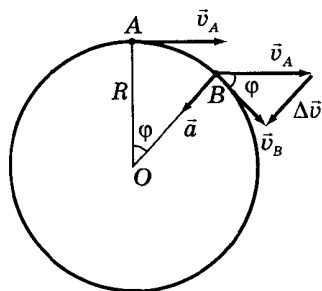


Рис. 1.16

Из-за непрерывного изменения направления скорости тело, движущееся по окружности, обладает ускорением. Это ускорение характеризует не быстроту изменения численного значения скорости (которое в данном случае не меняется), а быстроту изменения ее направления.

При равномерном движении по окружности ускорение тела все время направлено к ее центру и называется **центростремительным ускорением**. Чтобы найти его значение, рассмотрим отношение изменения вектора скорости Δv к малому интервалу времени Δt , за который это изменение произошло (рис. 1.16).

В силу малости угла ϕ имеем:

$$\Delta v = v\phi. \quad (1.10)$$

Так как угол ϕ между векторами скорости в точках A и B равен углу AOB между радиусами, который, в свою очередь, равен отношению длины дуги AB к радиусу R, получим:

$$\phi = \frac{v\Delta t}{R}. \quad (1.11)$$

Из (1.10) и (1.11) получим выражение для модуля вектора ускорения a :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v^2}{R}. \quad (1.12)$$

Из формул (1.8), (1.9) и (1.12) следует, что $a = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$ и $a = 4\pi^2 R\nu$.

1.1.15. Вращательное движение твердого тела. Угловая скорость

Вращательное движение абсолютно твердого тела вокруг неподвижной оси — один из самых простых (после поступательного) видов движения. Оно характеризуется углом поворота точек тела вокруг оси O_1O_2 , жестко связанной с телом (рис. 1.17). Угол поворота φ отсчитывается между двумя лучами, выходящими из одной точки на оси O_1O_2 и перпендикулярными ей: один из лучей (OX) неподвижен, другой (OA) жестко связан с телом (рис. 1.18).

При вращении тела вокруг неподвижной оси все его точки поворачиваются на одинаковый угол, но описывают окружности разных радиусов в зависимости от степени удаленности точки тела от оси вращения.

Равномерное вращение твердого тела или точки его окружности характеризуется постоянной угловой скоростью.

Угловой скоростью тела ω называется отношение угла поворота к интервалу времени, в течение которого этот поворот совершен:

$$\omega = \frac{\varphi}{\Delta t}.$$

Угловая скорость выражается в радианах в секунду (рад/с).

Угловая скорость связана с периодом T и частотой ν вращения следующим соотношением:

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

При равномерном вращении, если известна угловая скорость в начальный момент времени $t_0 = 0$, можно определить угол поворота тела за время t и тем самым положение точек тела:

$$\varphi = \omega t.$$

При ненулевом значении угла поворота φ_0 в начальный момент времени ($t = 0$) закон вращательного движения описывается уравнением:

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

Связь между линейной v и угловой ω скоростями и центростремительным ускорением a определяется соотношениями:

$$v = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R\nu; \quad v = \omega R; \quad a = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R.$$

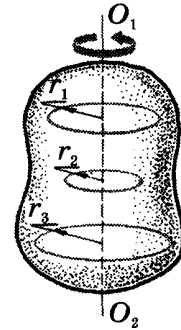


Рис. 1.17

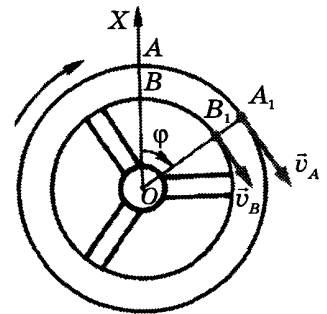


Рис. 1.18

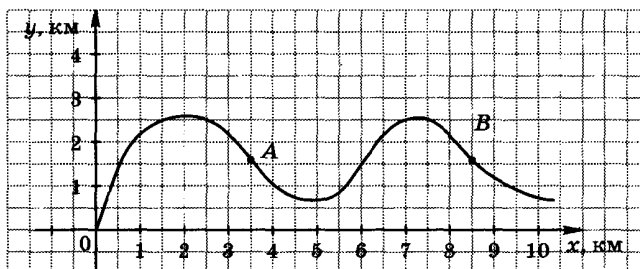
Примеры заданий ЕГЭ по теме 1.1. «Кинематика»

Часть 1

При выполнении заданий уровня А нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

1 2 3 4

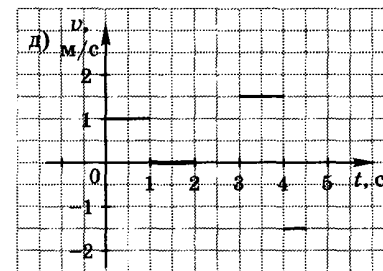
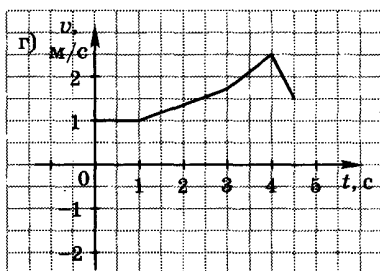
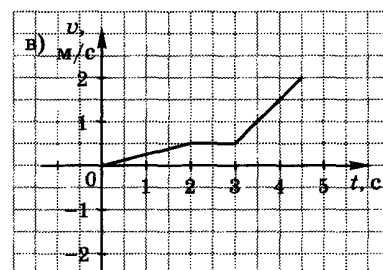
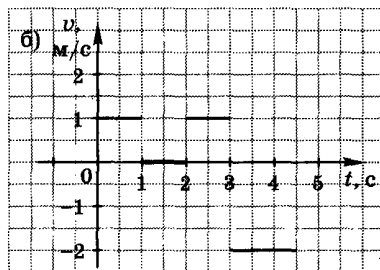
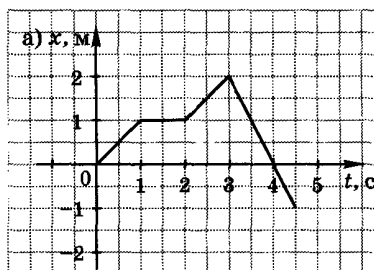
- A1.** На рисунке изображена траектория движения автомобиля. Модуль вектора перемещения из точки *A* в точку *B* составляет



- 1) 6 км 2) 10 км 3) 3,5 км 4) 5 км

1 2 3 4

- A2.** На рисунке *a* приведен график движения тела. Ему соответствует зависимость скорости от времени, представленная на

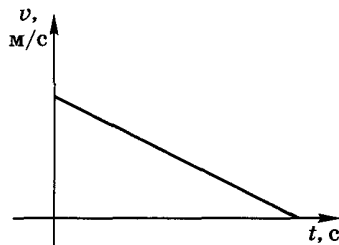


- 1) рис. б 2) рис. в 3) рис. г 4) рис. д

A3. Тело двигалось из точки *A* в точку *B* с переменной скоростью, преодолев первый участок пути в 5 м за 8 с, второй участок в 3 м — за 10 с и третий участок длиной 10 м за 18 с. Средняя путевая скорость движения между точками *A* и *B* составила

- 1) 0,5 м/с 2) 2 м/с 3) 0,3 м/с 4) 1 м/с

A4. График зависимости скорости от времени, изображенный на рисунке, описывает:



- 1) равномерное движение 3) равнозамедленное движение
2) равноускоренное движение 4) отсутствие какого-либо движения

A5. Точка совершает равномерное движение вдоль окружности радиусом $R = 5$ м со скоростью 3 м/с. Ее центростремительное ускорение при этом равно:

- 1) 2,5 м/с² 2) 1,8 м/с² 3) 1,5 м/с² 4) 3 м/с².

A6. Угловая скорость минутной стрелки часов составляет:

- 1) 0,00174 рад/с 2) 0,005 рад/с 3) 0,003 рад/с 4) 0,04 рад/с.

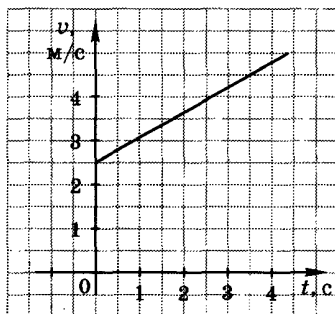
A7. В безветренную погоду капли дождя падают на землю вертикально. При этом след от капель на окне поезда, движущегося с постоянной скоростью относительно наблюдателя, стоящего на платформе, представляет собой:

- 1) прямую горизонтальную линию 3) гиперболу
2) прямую вертикальную линию 4) параболу.

Часть 2

Ответом к заданиям В1—В2 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

В1. Пользуясь графиком зависимости скорости от времени, изображенным на рисунке, определите путь, пройденный телом за первые 3 минуты.



В2. Мгновенное ускорение тела, движущегося по окружности, равно 5 м/с², при этом его центростремительное ускорение составляет 4 м/с². Каково тангенциальное ускорение тела?

1 2 3 4 A3

1 2 3 4 A4

1 2 3 4 A5

1 2 3 4 A6

1 2 3 4 A7

В1

В2

1.2. Основы динамики

Динамика (от греч. *dynamikos* — сила) — раздел механики, посвященный изучению движения материальных тел под действием приложенных к ним сил.

Движения любых материальных тел (кроме микрочастиц), происходящие со скоростями, не близкими к скорости света, изучаются в так называемой классической динамике. Движения тел со скоростями порядка скорости света рассматривают в теории относительности, а движение микрочастиц — в квантовой механике.

Обычно классическую динамику разделяют на динамику материальной точки и динамику системы материальных точек. Последняя содержит такие разделы:

- динамика абсолютно твердого тела;
- динамика упруго (или пластически) деформируемого тела;
- динамика жидкости и газа.

Классическая динамика базируется на трех основных законах, называемых законами Ньютона. К основным законам относят еще *закон независимости действия сил*, согласно которому при одновременном действии на материальную точку нескольких сил каждая из них сообщает точке такое же ускорение, какое она сообщила бы, если бы действовала одна.

Из названных законов следствиями являются все уравнения и теоремы динамики.

В динамике рассматриваются решения двух типов задач:

- 1) зная закон движения данного тела (т. е. уравнения, определяющие положение тела в пространстве в любой момент времени), найти силы, под действием которых это движение происходит;
- 2) зная силы, действующие на данное тело или систему тел, определить закон движения этого тела или системы.

Второй тип задач является в динамике основным.

1.2.1. Первый закон Ньютона

Любое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.

Так был сформулирован Ньютоном в 1687 г. первый закон механики, или *закон инерции*.

Суть закона инерции впервые была изложена в одной из книг итальянского ученого Галилео Галилея, опубликованной в начале XVII в.

Ньютон обобщил выводы Галилея, сформулировав закон инерции, и включил его в качестве первого из трех законов в основу механики. Поэтому данный закон называют первым законом Ньютона.

Однако со временем выяснилось, что первый закон Ньютона выполняется не во всех системах отсчета, а только в инерциальных. Поэтому с точки зрения современных представлений первый закон Ньютона формулируется так:

Существуют системы отсчета, называемые инерциальными, относительно которых свободные тела движутся прямолинейно и равномерно.

Под **свободным телом** здесь понимают тело, на которое не оказывают воздействие другие тела.

Следует помнить, что в первом законе Ньютона речь идет о телах, которые могут рассматриваться как материальные точки.

1.2.2. Инерциальные системы отсчета

Инерциальная система отсчета — это система отсчета, в которой справедлив закон инерции: материальная точка, когда на нее не действуют никакие силы (или действуют силы, взаимно уравновешенные), находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения.

Закон этот был открыт Галилеем в 1632 г. и сформулирован Ньютоном в 1687 г. как первый закон механики.

Любая система отсчета, движущаяся по отношению к инерциальной системе отсчета поступательно, равномерно и прямолинейно, также является *инерциальной системой отсчета*, т. е. в ней выполняется первый закон Ньютона. Следовательно, инерциальных систем отсчета может быть сколь угодно много. Система отсчета, движущаяся с ускорением по отношению к инерциальной системе отсчета, *неинерциальна* и закон инерции в ней не выполняется.

Сказанное подтверждается опытом, изображенным на рис. 1.19. Сначала тележка движется прямолинейно и равномерно относительно земли (рис. 1.19, а). На ней находятся два шарика, один из которых лежит на горизонтальной поверхности, а другой подвешен на нити. Силы, действующие на каждый шарик по вертикали, уравновешены, по горизонтали никакие силы на шарики не действуют (силой сопротивления воздуха в данном случае можно пренебречь).

Шарики будут находиться в покое относительно тележки при любой скорости ее движения (v_1 , v_2 , v_3 и т. д.) относительно земли — главное, чтобы эта скорость была постоянна.

Но когда тележка попадает на песчаную насыпь (рис. 1.19, б), ее скорость быстро уменьшается, в результате чего тележка останавливается. Во время торможения тележки оба шарика приходят в движение, т. е. изменяют свою скорость относительно тележки, хотя нет никаких сил, которые толкали бы их.

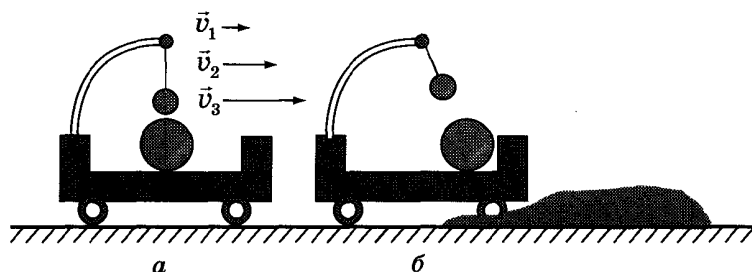


Рис. 1.19

Здесь первой (условно неподвижной) системой отсчета является земля. Второй системой отсчета, движущейся относительно первой, является тележка. Пока тележка двигалась прямолинейно и равномерно, шарики находились в состоянии покоя относительно тележки, т. е. закон инерции выполнялся. Как только тележка начала тормозить, т. е. начала двигаться с ускорением относительно первой инерциальной системы отсчета (земли), закон инерции перестал выполняться.

Если относительно какой-нибудь системы отсчета тело движется с ускорением, не вызванным действием на него других тел, то такую систему называют *неинерциальной*.

В неинерциальных системах отсчета основное положение механики о том, что ускорение тела вызывается воздействием на него других тел, не выполняется.

Следует отметить, что невозможно найти строго инерциальную систему отсчета. Реальная система отсчета всегда связывается с каким-нибудь конкретным телом (землей, корпусом корабля или самолета и т. п.), по отношению к которому и изучается движение различных объектов. Поскольку все реальные тела движутся с тем или иным ускорением, любая реальная система отсчета может рассматриваться как инерциальная лишь приближенно.

С очень высокой степенью точности инерциальной можно считать гелиоцентрическую систему, связанную с центром Солнца и с координатными осями, направленными на три далекие звезды. Эта система используется в задачах небесной механики и космонавтики. Для решения большинства технических задач инерциальной системой отсчета можно считать любую систему, жестко связанную с землей (или с любым телом, которое покоится или движется равномерно и прямолинейно относительно поверхности земли).

1.2.3. Принцип относительности Галилея

Принцип относительности Галилея гласит:

Во всех инерциальных системах отсчета законы механики имеют одинаковый вид.

Это означает, что уравнения, выражающие законы механики, не меняются (инвариантны) при преобразованиях Галилея.

Преобразования Галилея заключаются в преобразовании координат $\vec{r}(x, y, z)$ и времени t движущейся материальной точки при переходе от одной *инерциальной системы отсчета* (ИСО) к другой:

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}t, \quad t = t'. \quad (1.13)$$

Для координаты x , например, это означает:

$$x = x' + vt, \quad t = t',$$

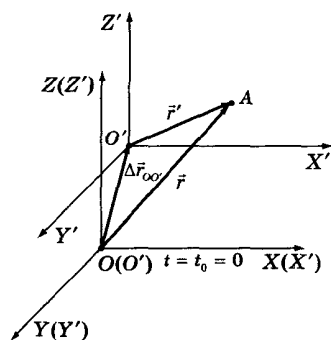


Рис. 1.20

где v — относительная скорость (постоянная) движения двух ИСО, $\vec{r}$ и $\vec{r}'$ — радиус-векторы, а x и x' — координаты точки в этих двух ИСО. Согласно преобразованию Галилея (1.13), время не изменяется при переходе из одной ИСО в другую: принцип относительности Галилея основан на представлениях об абсолютном времени и абсолютном пространстве, что означает одинаковость (одновременность) протекания событий во всех ИСО. Преобразования координат в (1.13) легко понять, если в некоторый момент времени t_0 , принятый за начальный $t_0 = 0$, одну из систем координат $K(XYZ)$ — неподвижную — совместить с другой — $K'(X'Y'Z')$ — подвижной и зафиксировать систему K (рис. 1.20). Тогда в любой последующий момент времени положение некоторой точки A , движущейся относительно обеих систем координат, определяется в системе K радиус-вектором $\vec{r}$, а в системе K' — радиус-вектором $\vec{r}'$. Вектор,

соединяющий начала координат O неподвижной и O' — подвижной систем координат, равен вектору перемещения системы K' относительно K : $\vec{OO'} = \Delta \vec{r}_{OO'}$. Согласно правилу сложения векторов

$$\vec{r} = \vec{r}' + \Delta \vec{r}_{OO'}.$$

Однако вектор перемещения можно выразить через скорость движение системы K' относительно K : $\Delta \vec{r}_{OO'} = \vec{v}t$. Поэтому

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}t,$$

что совпадает с (1.13).

Из уравнения (1.13) вытекает закон сложения скоростей:

$$\vec{u} = \vec{u}' + \vec{v},$$

где u и u' — скорости точки относительно систем K и K' соответственно.

Принцип относительности Галилея означает, что никакими механическими опытами нельзя обнаружить движение одной инерциальной системы координат относительно другой. Именно поэтому, находясь в салоне сверхзвукового самолета, пассажиры могут спокойно передвигаться, не чувствуя его скорости.

Не нужно, однако, думать, что выполнение принципа относительности означает полную тождественность движения одного и того же тела относительно разных инерциальных систем координат.

Тожественны лишь законы движения. Характер же движения определяется начальными условиями (начальными скоростями и координатами тела), которые различны в разных системах отсчета.

Так, камень, выпущенный из рук в движущемся вагоне поезда, будет падать вертикально лишь относительно стен вагона, а для наблюдателя, находящегося на платформе, он будет двигаться по параболе. Объясняется это тем, что начальные скорости разные: относительно стен вагона начальная скорость равна нулю, а относительно земли она равна скорости движения вагона.

1.2.4. Взаимодействие

Взаимодействие в физике — это воздействие тел или частиц друг на друга, приводящее к изменению их движения.

Близкодействие и далекодействие (или действие на расстоянии). О том, как осуществляется взаимодействие тел, в физике издавна существовали две точки зрения. Первая из них предполагала наличие некоторого агента (например, эфира), через который одно тело передает свое влияние на другое, причем с конечной скоростью. Это теория близкодействия. Вторая предполагала, что взаимодействие между телами осуществляется через пустое пространство, не принимающее никакого участия в передаче взаимодействия, причем передача происходит мгновенно. Это теория далекодействия. Она, казалось бы, окончательно победила после открытия Ньютоном закона всемирного тяготения. Так, например, считалось, что перемещение Земли должно сразу же приводить к изменению силы тяготения, действующей на Луну. Кроме самого Ньютона, позднее концепции далекодействия придерживались Кулон и Ампер.

После открытия и исследования электромагнитного поля (см. *Электромагнитное поле*) *теория далекодействия* была отвергнута, так как было доказано, что взаимодействие электрически заряженных тел осуществляется не мгновенно, а с конечной скоростью (равной скорости света: $c = 3 \cdot 10^8$ м/с) и перемещение одного из зарядов приводит к изменению сил, действующих на другие заряды, не мгновенно, а спустя некоторое время. Возникла новая *теория близкодействия*, которая была затем распространена и на все другие виды взаимодействий. Согласно теории близкодействия взаимодействие осуществляется посредством соответствующих полей, окружающих тела и непрерывно распределенных в пространстве (т. е. поле является тем посредником, который передает действие одного тела на другое). Взаимодействие электрических зарядов — посредством электромагнитного поля, всемирное тяготение — посредством гравитационного поля.

На сегодняшний день физике известны *четыре типа фундаментальных взаимодействий, существующих в природе* (в порядке возрастания интенсивности): *гравитационное, слабое, электромагнитное и сильное взаимодействия*.

Фундаментальными называются взаимодействия, которые нельзя свести к другим типам взаимодействий.

Фундаментальные взаимодействия отличаются интенсивностью и *радиусом действия* (см. табл. 1.1). *Под радиусом действия понимают максимальное расстояние между частицами, за пределами которого их взаимодействием можно пренебречь.*

Таблица 1.1

Основные характеристики фундаментальных взаимодействий

Взаимодействие	Взаимодействующие частицы	Радиус действия, м	Относительная интенсивность
Гравитационное	Все	∞	1
Слабое	Все, кроме фотона	10^{-17}	10^{32}
Электромагнитное	Заряженные частицы	∞	10^{36}
Сильное	Адроны	10^{-15}	10^{38}

По радиусу действия фундаментальные взаимодействия делятся на *дальнодействующие* (гравитационное и электромагнитное) и *короткодействующие* (слабое и сильное) (см. табл. 1.1).

Гравитационное взаимодействие универсально: в нем участвуют все тела в природе — от звезд, планет и галактик до микрочастиц: атомов, электронов, ядер. Его радиус действия равен бесконечности. Однако как для элементарных частиц микромира, так и для окружающих нас предметов макромира силы гравитационного взаимодействия настолько малы, что ими можно пренебречь (см. табл. 1.1). Оно становится заметным с увеличением массы взаимодействующих тел и потому определяющим в поведении небесных тел и образовании и эволюции звезд.

Слабое взаимодействие присуще всем элементарным частицам, кроме фотона. Оно отвечает за большинство ядерных реакций распада и многие превращения элементарных частиц.

Электромагнитное взаимодействие определяет структуру вещества, связывая электроны и ядра в атомах и молекулах, объединяя атомы и молекулы в различные вещества. Оно определяет химические и биологические процессы. Электромагнитное взаимодействие является причиной таких явлений, как упругость, трение, вязкость, магнетизм и составляет природу соответствующих сил. На движение макроскопических электронейтральных тел оно существенного влияния не оказывает.

Сильное взаимодействие осуществляется между адронами, именно оно удерживает нуклоны в ядре.

В 1967 г. Шелдон Глэшоу, Абдус Салам и Стивен Вайнберг создали теорию, объединяющую электромагнитное и слабое взаимодействия в *единое электрослабое взаимодействие* с радиусом действия 10^{-17} м, в пределах которого исчезает различие между слабым и электромагнитным взаимодействиями.

В настоящее время выдвинута теория *великого объединения*, согласно которой существуют лишь два типа взаимодействий: *объединенное*, куда входят *сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия*, и *гравитационное взаимодействие*.

Есть также предположение, что все четыре взаимодействия являются частными случаями проявления единого взаимодействия.

В механике взаимное действие тел друг на друга характеризуется *силой* (см. *Сила*). Более общей характеристикой взаимодействия является потенциальная энергия (см. *Потенциальная энергия*).

Силы в механике делятся на *гравитационные, упругости и трения*. Как уже упоминалось выше, природа механических сил обусловлена гравитационным и электромагнитным взаимодействиями. Только эти взаимодействия можно рассматривать как силы в смысле механики Ньютона. Сильные (ядерные) и слабые взаимодействия проявляются на таких малых расстояниях, при которых законы механики Ньютона, а вместе с ними и понятие механической силы теряют смысл. Поэтому термин «сила» в этих случаях следует воспринимать как «взаимодействие».

1.2.5. Сила. Принцип суперпозиции сил

Сила в механике — это величина, являющаяся мерой взаимодействия тел.

При механическом движении проявляются следующие виды сил: *силы упругости, силы трения и гравитационные силы (всемирного тяготения)*.

Действие одного тела на другое приводит как к изменению скорости всего тела как целого, так и к изменению скорости отдельных его частей.

Мерой этого действия является сила. Часто не указывают, какое тело и как действовало на данное тело. Просто говорят, что на тело действует сила, или к нему приложена сила.

Действие одного тела на другое может производиться как при непосредственном контакте (давление, трение), так и посредством создаваемых телами полей (электромагнитное поле, гравитационное поле).

Проявлением действия силы является изменение ускорения тела.

Сила, как и скорость, — векторная величина, т. е. имеет не только численное значение, но и направление. Сила обычно обозначается буквой $\vec{F}$, модуль силы — буквой F (без стрелки). Пря-

мая, вдоль которой направлена сила, называется *линией действия силы*. Когда говорят о силе, важно указать, к какой точке тела приложена действующая на него сила. Если речь идет об абсолютно твердом (недеформируемом) теле, то можно считать, что сила приложена к любой точке на линии ее действия.

Итак, результат действия силы на тело зависит от ее модуля, направления и точки приложения.

Иначе говоря, сила — векторная величина, характеризующаяся численным значением, направлением в пространстве и точкой приложения.

Единицей силы в СИ является ньютон (Н). Один ньютон (1 Н) — это сила, которая за 1 с изменяет скорость тела массой 1 кг на 1 м/с. Эта единица названа в честь великого английского ученого Исаака Ньютона (1642–1727). На практике применяются также килоньютоны и миллиньютоны:

$$1 \text{ кН} = 1000 \text{ Н}, 1 \text{ мН} = 0,001 \text{ Н}.$$

Равнодействующая нескольких сил

Обычно на любое движущееся тело действует не одна, а сразу несколько сил. Так, например, на парашютиста, спускающегося на землю, действуют сила тяжести и сила сопротивления воздуха. На тело, висящее на пружине, действуют две силы: сила тяжести и сила упругости пружины.

В каждом подобном случае несколько сил, приложенных к телу, можно заменить одной суммарной силой $\vec{F}$, равноценной по своему действию этим силам. Сила, производящая на тело такое же действие, как несколько одновременно действующих сил, называется *равнодействующей этих сил*:

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n.$$

В этом состоит *принцип суперпозиции (наложения) сил*.

Равнодействующая сила, действующая на частицу со стороны других тел, равна векторной сумме сил, с которыми каждое из этих тел действует на частицу.

Для нахождения равнодействующей силы пользуются правилами сложения векторов (поскольку сила — векторная величина), в частности, сложение двух сил производится по правилу параллелограмма.

О двух силах, равных по величине и направленных вдоль одной прямой в противоположные стороны, говорят, что они уравнивают, или компенсируют друг друга. Равнодействующая F таких сил всегда равна нулю и потому изменить скорость тела не может.

Для изменения скорости тела относительно земли необходимо, чтобы равнодействующая всех приложенных к телу сил была отлична от нуля. В том случае, когда тело движется в направлении равнодействующей силы, его скорость возрастает; при движении в противоположном направлении скорость тела убывает. Таким образом, направление скорости не всегда совпадает с направлением действующей силы F , а вот изменение направления скорости (а следовательно, и направление ускорения) всегда совпадает с направлением действующей силы.

1.2.6. Второй закон Ньютона

Второй закон Ньютона формулируется так:

Ускорение тела прямо пропорционально равнодействующей всех сил, приложенных к телу, и обратно пропорционально его массе. Направление ускорения совпадает с направлением равнодействующей всех сил.

Следует помнить, что во втором законе Ньютона, так же, как и в первом, под телом подразумевается *материальная точка*, движение которой рассматривается в *инерциальной системе отсчета*.

Математически второй закон Ньютона выражается формулой:

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

В скалярном виде второй закон можно записать:

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{F_x}{m}, \\ a &= \frac{F}{m}. \end{aligned} \quad (1.14)$$

Отсюда можно вывести два следствия:

1. Чем больше сила, приложенная к телу, тем больше его ускорение, и следовательно, тем быстрее изменяется скорость движения этого тела.
2. Чем больше масса тела, тем меньшее ускорение оно получает в результате действия данной силы и потому тем медленнее изменяет свою скорость.

На основании второго закона Ньютона вводится единица силы в СИ — ньютон (Н). Из формулы (1.14) следует:

$$F = am. \quad (1.15)$$

Один ньютон (1 Н) — это сила, с которой нужно действовать на тело массой в 1 кг, чтобы сообщить ему ускорение в 1 м/с².

Подставив в формулу (1.15) значения ускорения и массы с их размерностями из приведенного определения, выразим размерность силы в 1 Н через основные единицы СИ:

$$1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м/с}^2 = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2.$$

Второй закон Ньютона иногда называют *основным законом динамики*. После его открытия стало возможным решать такие задачи о движении тел, которые до Ньютона казались неразрешимыми. Многие казавшиеся ранее непонятными явления теперь были объяснены на основе открытых законов физики.

1.2.7. Третий закон Ньютона

Третий закон Ньютона гласит:

Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе — взаимодействия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны.

В своем первом законе Ньютон описал движение тела, не подверженного действию других тел. В этом случае тело либо сохраняет свое состояние покоя, либо движется равномерно и прямолинейно (относительно *инерциальной системы отсчета*).

Во втором законе Ньютона речь идет о прямо противоположной ситуации. Теперь на данное тело действуют внешние тела, причем их количество может быть произвольным. Под действием окружающих тел рассматриваемое тело начинает двигаться с ускорением, причем произведение массы данного тела на его ускорение оказывается равным действующей силе.

Сформулировав эти два закона, Ньютон обратился к анализу ситуации, когда во взаимодействии участвуют только два тела. Допустим, имеются два тела А и В, которые притягивают друг друга с силами F и F' . Может ли одна из этих сил быть больше другой? Размышление над этой проблемой привело Ньютона к выводу, что такого быть не может: силы взаимодействия двух тел всегда равны друг другу. Каким образом Ньютон пришел к такому заключению? Вот как он рассуждал: «Относительно притяжения дело может быть изложено вкратце следующим образом: между двумя взаимно притягивающимися телами надо вообразить какое-либо пре-

пятствие, мешающее их сближению. Если бы одно из тел A притягивалось телом B сильнее, нежели тело B притягивается телом A , то препятствие испытывало бы со стороны тела A большее давление, нежели со стороны тела B , и, следовательно, не осталось бы равновесия. Преобладающее давление вызвало бы движение системы, состоящей из этих двух тел и препятствия, в сторону тела B , и в свободном пространстве эта система, двигаясь ускоренно, ушла бы в бесконечность. Такое заключение нелепо и противоречит первому закону. Отсюда следует, что оба тела давят на препятствие с равными силами, а значит, и притягиваются взаимно с таковыми же».

Следует помнить, что силы, о которых говорится в законе Ньютона, никогда не уравнивают друг друга, поскольку они приложены к разным телам (рис. 1.21). Две равные по модулю и противоположно направленные силы уравнивают друг друга в том случае, если они приложены к одному телу. Тогда их равнодействующая равна нулю, и тело при этом находится в равновесии, т. е. либо покоится, либо движется равномерно и прямолинейно.

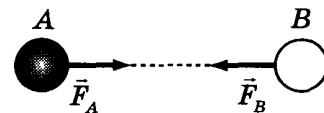


Рис. 1.21

Опыты подтверждают вывод Ньютона. Если, например, взять две тележки и на одной из них закрепить магнит, а на другой кусок железа, а затем соединить их с динамометрами, то мы увидим, что показания этих приборов совпадут (рис. 1.22). Это означает, что сила, с которой магнит притягивает к себе железо, равна по величине силе, с которой железо притягивает к себе магнит. Эти силы равны по абсолютной величине и противоположны по направлению: сила притяжения к магниту направлена влево, а сила притяжения к железу — вправо.

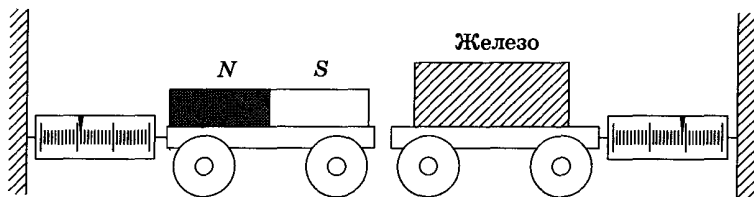


Рис. 1.22

Итак, третий закон Ньютона на более привычном для нас языке может быть сформулирован так: **Силы, с которыми взаимодействуют любые два тела, всегда равны по величине и противоположны по направлению.**

Математически он записывается в следующем виде:

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

Знак «минус» показывает, что векторы сил направлены в противоположные стороны. Используя второй закон Ньютона, можно записать:

$$m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2.$$

Отсюда следует, что

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

Таким образом, отношение модулей ускорений двух взаимодействующих тел определяется исключительно их массами (чем меньше масса тела, тем большее ускорение оно приобретает) и не зависит от природы сил взаимодействия.

Третий закон Ньютона обосновывает введение самого термина «взаимодействие»: если одно тело действует на другое, то второе также действует на первое. Другими словами, не может быть

такого, чтобы одно тело на другое действовало, а второе на первое — нет. Как писал сам Ньютон, «если кто нажимает пальцем на камень, то и палец его также нажимается камнем. Если лошадь тащит камень, привязанный к канату, то и обратно (если можно так выразиться) она с равным усилием оттягивается к камню».

1.2.8. Закон всемирного тяготения

Закон всемирного тяготения (закон тяготения Ньютона) был открыт великим английским ученым Исааком Ньютоном в конце 60-х годов XVII века и опубликован в 1687 г. Он гласит:

Сила гравитационного притяжения двух тел с массами m_1 и m_2 прямо пропорциональна массе каждого из тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния r^2 между ними.

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

где G — гравитационная постоянная. Значение гравитационной постоянной было определено экспериментально в 1798 г. английским физиком Г. Кавендишем и составляет $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Нм}^2/\text{кг}^2$. Гравитацией (от лат. *gravitas* — тяжесть) называется притяжение всех тел во Вселенной друг к другу.

Закон всемирного тяготения имеет всеобъемлющий характер. Притяжение существует не только между Землей и телами, находящимися на ней. Все тела притягиваются друг к другу. Притягиваются между собой Земля и Луна. Притяжение Земли к Луне вызывает приливы и отливы воды. Огромные массы воды поднимаются в океанах и морях дважды в сутки на много метров. Земля и другие планеты движутся вокруг Солнца, притягиваясь друг к другу.

Необходимо помнить, что закон тяготения как всеобщий закон справедлив для материальных точек, и силы гравитационного взаимодействия направлены вдоль линии, соединяющей эти точки. Такие силы называются *центральными*.

При расчетах силы тяготения между двумя телами под расстоянием r между ними имеется в виду расстояние между центрами тяжести этих тел. Это особенно важно в том случае, когда размеры тел сопоставимы с расстоянием между ними (тогда форма тела имеет значение). Как показывают расчеты, точные значения силы тяжести можно определить в следующих случаях:

- 1) размеры тел пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием между ними;
- 2) имеются два однородных шара (произвольного размера);
- 3) форма одного из тел — шар, а размеры и масса его тела намного больше, чем у второго тела (произвольной формы), которое находится вблизи поверхности первого.

Благодаря последнему случаю можно рассчитать силу притяжения к Земле любого предмета, находящегося на ней.

1.2.9. Сила тяжести

Сила, с которой Земля притягивает к себе тело, находящееся вблизи ее поверхности, называется *силой тяжести*.

То, что Земля притягивает к себе все тела, находящиеся на ее поверхности и вблизи нее (деревья, воду, дома, Луну и т. д.), или явление тяготения, следует из простых наблюдений за окружающим миром. Так, мяч, брошенный в горизонтальном направлении, через некоторое время оказывается на земле; камень, выпущенный из рук, падает вниз; прыгнувший вверх человек вскоре снова оказывается внизу. Благодаря явлению тяготения искусственный спутник, запущенный с Земли, летит не по прямой, а движется вокруг Земли.

Сила тяжести всегда направлена вертикально вниз, к центру Земли. Обозначается она обычно латинской буквой F со значком «т» (тяжесть) внизу — F_t . Сила тяжести приложена к центру тяжести тела.

Центр тяжести тела произвольной формы находят так: подвешивают тело на нити за разные его точки. Точка пересечения всех направлений, отмеченных нитью, и будет центром тяжести тела. Для тел правильной формы центр тяжести находится в центре симметрии тела, и точка эта не обязательно принадлежит телу (например, центр симметрии кольца).

Сила тяжести для тела, находящегося вблизи поверхности Земли, равна:

$$F_{\tau} = G \frac{M_3 m}{R^2},$$

где M_3 — масса Земли, m — масса тела, R_3 — радиус Земли.

Согласно второму закону Ньютона, сила тяжести может быть определена как произведение массы тела на ускорение, которое в данном случае называется *ускорением свободного падения* g :

$$F_{\tau} = mg.$$

Сопоставляя две последние формулы, получим выражение для ускорения свободного падения:

$$g = \frac{GM_3}{R_3^2}.$$

Таким образом, ускорение, с которым тело падает на землю, — ускорение свободного падения — не зависит от массы тела, а также от других его характеристик (объема, плотности и т. д.)

Вблизи поверхности Земли оно составляет $9,8 \text{ м/с}^2$.

Земной шар немного сплюснут у полюсов, поэтому тела, находящиеся около полюсов, расположены немного ближе к центру Земли. В связи с этим сила тяжести на полюсе немного больше, чем на экваторе и других широтах (на экваторе $g = 9,78 \text{ м/с}^2$, на Северном полюсе $g = 9,832 \text{ м/с}^2$).

Сила тяжести на других планетах

Вокруг Солнца движутся девять больших планет. Все они удерживаются около Солнца силами тяготения. Эти силы очень велики. Например, между Солнцем и Землей действует сила тяготения, равная примерно $3 \cdot 10^{22} \text{ Н}$. Большое числовое значение этой силы объясняется тем, что массы Солнца и Земли очень велики.

Среди больших планет Солнечной системы наименьшую массу имеет Меркурий — его масса почти в 19 раз меньше массы Земли. Вокруг многих планет движутся их спутники, которые также удерживаются вблизи планет силами тяготения. Спутник нашей Земли — Луна — самое близкое к нам небесное тело. Расстояние между Землей и Луной равно в среднем $380\,000 \text{ км}$. Масса Луны в 81 раз меньше массы Земли.

Чем меньше масса планеты, тем с меньшей силой она притягивает к себе тела. Сила тяжести на поверхности любой планеты рассчитывается по формуле:

$$F_{\tau} = mg = GMm/R^2,$$

где m — масса тела, g — ускорение свободного падения на данной планете, M — масса планеты, R — радиус планеты, G — гравитационная постоянная.

1.2.10. Масса тела

Масса тела — это фундаментальная физическая величина, характеризующая его инерционные и гравитационные свойства.

Инерционные (или инертные) свойства массы в ньютоновой механике (т. е. при скоростях, существенно меньших скорости света) характеризуются соотношениями между массой m , импульсом p тела, силой F , действующей на тело, и его ускорением:

$$\begin{aligned} p &= mv, \\ \Delta p / \Delta t &= F, \\ F &= ma. \end{aligned} \quad (1.16)$$

Чем больше масса тела, тем более оно инертно. Сравнивать массы тел можно по ускорениям, которые приобретают тела при *взаимодействии* друг с другом. При этом во сколько раз ускорение одного тела в результате взаимодействия с другим больше (меньше), во столько раз масса первого тела меньше (больше) массы второго.

Чем меньше меняется скорость тела при взаимодействии, тем оно более инертно и тем его масса больше. И наоборот, чем больше меняется скорость тела при взаимодействии, тем оно менее инертно и тем его масса меньше.

Гравитационная масса. Согласно теории гравитации Ньютона, масса является источником силы всемирного тяготения F_T :

$$F_T = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (1.17)$$

где m_1, m_2 — массы двух тел, r — расстояние между ними, G — гравитационная постоянная.

Из формул (1.16) и (1.17) следует, что ускорение, с которым одно тело падает на другое, — ускорение свободного падения — не зависит от массы падающего тела, а также от других его характеристик (объема, плотности и т. д.). Это было проверено многократными экспериментами в поле тяжести Земли и Солнца и подтвердилось с точностью до 10^{-8} и 10^{-12} соответственно. Эта закономерность называется *равенством инертной и гравитационной масс*. Следует понимать, что речь идет на самом деле об одной и той же массе — физической величине, являющейся источником двух физических явлений — инерции и гравитации.

Масса — мера количества вещества. В классической физике масса служит также мерой количества вещества, содержащегося в теле. Здесь справедливы закон сохранения массы (вещества) и закон аддитивности: масса изолированной системы тел не меняется со временем и равна сумме масс тел, ее составляющих.

За единицу массы в СИ принят *килограмм* (1 кг).

1.2.11. Плотность вещества

Плотностью вещества называют физическую величину, показывающую, чему равна масса в единице объема этого вещества.

Масса любого тела зависит не только от его размеров, но и от того, из какого вещества это тело состоит. Тела, изготовленные из разных веществ, при одинаковых объемах имеют разные массы. Например, железо объемом 1 м^3 имеет массу 7800 кг, а свинец того же объема — 13 000 кг.

Обозначим величины, входящие в это выражение, буквами: m — масса, V — объем тела, ρ — плотность тела.

Тогда формулу для вычисления плотности можно записать в следующем виде:

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

Единицей плотности в СИ является килограмм на кубический метр (кг/м^3). На практике плотность вещества выражают также в граммах на кубический сантиметр (г/см^3).

Плотность одного и того же вещества в твердом, жидком и газообразном состоянии различна. Например, плотность воды равна 1000 кг/м^3 , льда — 900 кг/м^3 , а водяного пара (при 0°C и нормальном атмосферном давлении) — $0,59 \text{ кг/м}^3$.

1.2.12. Движение тела под действием силы тяжести

Свободное падение

Свободным падением называется движение тела, обусловленное притяжением Земли, при отсутствии начальной скорости и сопротивления среды.

Свободно падающее тело движется поступательно, прямолинейно и равноускоренно. Ускорение, с которым движется тело, называется *ускорением свободного падения* и обозначается буквой g . Формулы, описывающие движение свободно падающего тела, не содержат коэффициентов, зависящих от его формы и массы.

Другими словами, тела разной массы, которые мы уронили с одной высоты, достигнут поверхности земли за одно и то же время. Кажущееся несовпадение последнего утверждения с нашим каждодневным опытом (например, все знают, что пушинка будет падать гораздо дольше, чем стальной шарик) связано с сопротивлением воздуха, т. е. с дополнительной силой, направленной вверх, следовательно, такое падение не является свободным. В этом можно убедиться на следующем опыте, впервые проведенном Ньютоном. Если взять пробирку длиной 1 м и опустить в нее одновременно свинцовый шарик, птичье перо и пробку, то все три предмета упадут на дно трубки в разное время: сначала шарик, затем пробка, последним — перо (рис. 1.23, а). Если теперь из пробирки откачать воздух и перевернуть ее вверх дном, можно увидеть, что все три предмета достигнут дна одновременно (рис. 1.23, б).

Впервые независимость ускорения свободного падения от массы тела опытным путем установил Галилей в конце XVI в. Для этого он одновременно ронял шары одинакового размера, но разные по весу (чугунный и деревянный), с Пизанской башни. Оба шара достигали земли практически одновременно.

Свободное падение тел является примером прямолинейного равноускоренного движения.

Для определения высоты тела над землей h при свободном падении можно воспользоваться уравнением (1.7) при следующих начальных условиях: $h_0 = 0$, $v_0 = 0$, $a = g$, что означает следующее: ось h направлена вниз, начало ее помещено в точку, в которой тело выронили (рис. 1.24):

$$h = \frac{gt^2}{2}. \quad (1.18)$$

График зависимости высоты от времени является параболой. Используя формулу (1.18) и выражение для скорости: $v = v_0 + at$, (при $v_0 = 0$, $a = g$), легко показать, что скорость связана с высотой соотношением:

$$v = \sqrt{2gh}. \quad (1.19)$$

Формулы (1.18) и (1.19) справедливы для любого прямолинейного движения с постоянным ускорением и нулевой начальной скоростью, а не только для свободного падения.

Тело, брошенное под углом к горизонту

Тело, брошенное под углом α к горизонту с начальной скоростью $\vec{v}_0$, будет двигаться по криволинейной траектории, в любой точке которой вектор скорости может быть разложен на две составляющие — горизонтальную и вертикальную (рис. 1.25).

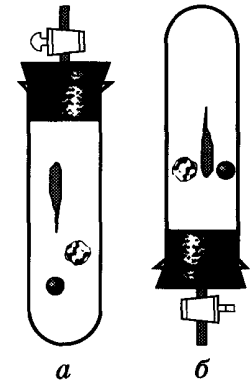


Рис. 1.23

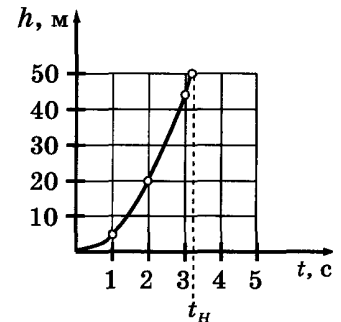


Рис. 1.24

Проекции этих векторов на оси координат, начало которых выбрано в точке бросания, равны:

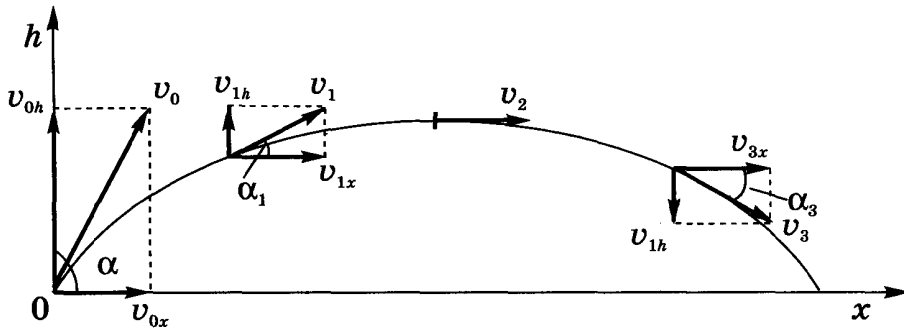


Рис. 1.25

$$\begin{aligned} v_x &= v_0 \cos \alpha, \\ v_h &= v_0 \sin \alpha. \end{aligned} \quad (1.20)$$

При этом горизонтальная составляющая скорости не будет меняться с течением времени, т. к. ускорение свободного падения не имеет горизонтальной составляющей, а направлено вертикально вниз. Вертикальная составляющая скорости будет меняться по закону равнопеременного движения с ускорением $a = g$. Изменение координат тела согласно уравнению (1.7) имеет вид:

$$x = v_0 \cos \alpha t, \quad (1.21)$$

$$h = v_0 \sin \alpha t - \frac{gt^2}{2}. \quad (1.22)$$

В уравнении (1.22) учтено, что ускорение силы тяжести направлено вниз (знак «-» перед вторым членом). Последняя пара уравнений позволяет найти уравнение траектории движения точки, которое представляет собой зависимость одной координаты от другой. Для этого из уравнений (1.21) и (1.22) исключим время и после простых преобразований получим:

$$h = x \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} \cdot x^2.$$

Если ввести обозначения $\operatorname{tg} \alpha = c$ и $\frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} = b$, последнее уравнение примет вид:

$$y = bx^2 + cx,$$

что является уравнением параболы с осью, параллельной вертикальной оси.

Таким образом, траектория тела, брошенного под углом к горизонту, представляет собой параболу. В вершине этой параболы вертикальная составляющая скорости равна нулю. В точке падения скорость тела равна по абсолютной величине скорости тела в точке бросания, а направление ее составляет тот же угол, что и в точке бросания (взятый с противоположным знаком). Это следует из симметрии параболы и имеет место в отсутствие сопротивления воздуха.

Траектория тела, брошенного горизонтально, также представляет собой параболу: тело будет двигаться по одной из ветвей параболы с вершиной в точке бросания (рис. 1.25).

1.2.13. Вес

Вес — это сила, с которой любое тело вследствие притяжения Земли действует на опору или подвес.

Вес тела — векторная физическая величина, его обозначают буквой P . Вес покоящегося, а также равномерно и прямолинейно движущегося (относительно земли) тела по своему численному значению равен действующей на него силе тяжести:

$$P = F_{\tau} = mg,$$

где m — масса, g — ускорение свободного падения.

Вес и сила тяжести приложены к разным телам, а именно: вес приложен к опоре или подвесу, а сила тяжести — к телу (рис. 1.26).

Вес и сила тяжести имеют разную физическую природу. Сила тяжести возникает вследствие взаимодействия тела и Земли. Вес тела возникает в результате взаимодействия тела и опоры (подвеса). Опора (подвес) и тело при этом деформируются, что приводит к появлению *силы упругости*. Из третьего закона Ньютона следует, что вес тела, т. е. сила, с которой тело давит на опору (или растягивает подвес), совпадает по величине с силой, действующей со стороны опоры на данное тело. Сила, с которой опора давит на находящееся на ней тело, называется *силой реакции опоры*. Обозначив силу реакции опоры через N , мы можем записать (см. рис. 1.26):

$$P = N.$$

Полученная формула является более общей, чем $P = mg$, так как она остается справедливой и в том случае, когда тело вместе с опорой совершает ускоренное движение.

Вес тела не следует путать с его массой. Масса тела является скалярной величиной и измеряется в килограммах, а вес тела (как и любая другая сила) — векторная величина и измеряется в ньютонах.

Поскольку *вес тела пропорционален ускорению свободного падения*, которое различно на различных широтах, то вес тела зависит от географической широты и высоты местности (на полюсах вес несколько больше, чем на экваторе).

Вес можно измерять с помощью пружинных весов (динамометра).

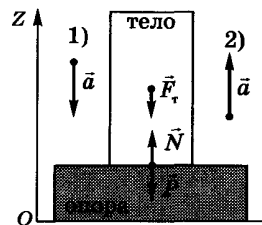


Рис. 1.26

1.2.14. Невесомость и перегрузка

Состояние *невесомости* — это состояние, в котором находится материальное тело, свободно движущееся в поле тяготения Земли (или другого небесного тела) под действием только сил тяготения. Отличительной особенностью такого состояния является отсутствие давления как на все тело в целом, так и на отдельные его части.

Рассмотрим условие достижения невесомости.

Если опора движется вместе с телом с ускорением a , направление которого совпадает с направлением ускорения свободного падения (рис. 1.26, случай 1), то вес тела (определяемый из векторного уравнения $\vec{N} + \vec{F}_{\tau} = m\vec{a}$) в проекции на вертикальную ось OZ , направленную вверх, равен:

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

Когда $g = a$, $P = 0$, наступает невесомость.

При движении тела и опоры в направлении, противоположном направлению свободного падения (рис. 1.26, случай 2), получим:

$$P = N = m(g + a).$$

В этом случае наступает *перегрузка* — вес тела увеличивается.

1.2.15. Космические скорости

Первая космическая скорость — это скорость, которую необходимо сообщить телу, чтобы оно стало искусственным спутником Земли, т. е. двигалось вокруг нее с постоянной скоростью по круговой орбите под действием силы тяжести.

Скорость эта определяется с учетом скорости равномерного движения по окружности и закона всемирного тяготения.

Центростремительное ускорение a тела, равномерно движущегося по окружности, равно:

$$a = \frac{v^2}{r}, \quad (1.23)$$

где v — скорость вращения, r — радиус окружности.

Поскольку в данном случае a равно g — ускорению свободного падения (т. к. тело движется в поле тяжести Земли), то, подставляя в (1.23) вместо a выражение для $g = GM/r^2$, получим:

$$v = \sqrt{G \frac{M_3}{r}} = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3 + h}}.$$

Здесь G — гравитационная постоянная, M_3 — масса Земли, R_3 — радиус Земли, h — высота тела над поверхностью Земли. Это и есть формула *круговой скорости спутника Земли*. С такой скоростью движется спутник Земли по круговой орбите на высоте h от поверхности Земли.

Пренебрегая h по сравнению с R , получим:

$$v_1 = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3}}.$$

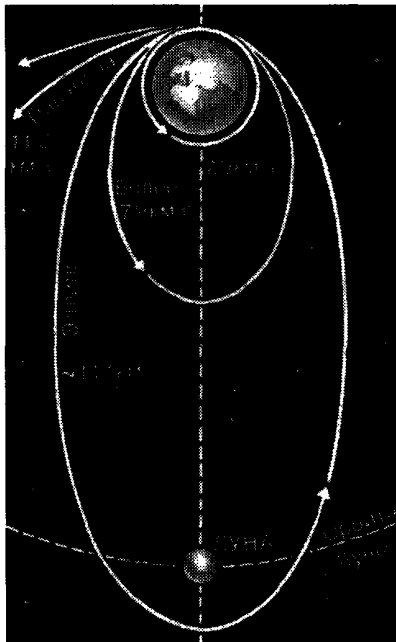


Рис. 1.27

Это формула для расчета первой космической скорости при запуске спутника, т. е. той горизонтальной скорости, которую необходимо сообщить телу вблизи поверхности Земли, чтобы оно стало ее спутником. Запуск искусственного спутника осуществляется с помощью ракеты-носителя, которая поднимает тело спутника на высоту порядка 300 км (это та высота, на которой уже почти не сказывается сопротивление атмосферы) и придает ему горизонтальную скорость v_1 . Спутник отделяется от ракеты-носителя и продолжает свое движение в гравитационном поле Земли. Численное значение первой космической скорости составляет 7,9 км/с. Если придать телу большую скорость, оно будет двигаться по эллиптической орбите. По мере увеличения начальной скорости, придаваемой телу при запуске, орбита его будет вытягиваться, пока наконец не превратится в незамкнутую кривую — параболу (рис. 1.27).

Вторая космическая (параболическая) скорость — это скорость, которую надо придать телу у поверхности Земли, чтобы оно ее покинуло, двигаясь по параболической траектории. Эта скорость в $\sqrt{2}$ раза больше первой космической: $v_{II} = \sqrt{2} \cdot v_1 = 11,2$ км/с. При второй космической скорости тело покидает Землю, но остается в пределах Солнечной системы. Оно становится спутником Солнца.

Третья космическая скорость — это та наименьшая скорость, при которой тело, начиная движение вблизи поверхности Земли, покидает сначала Землю, а затем преодолевает притяжение Солнца, покидая Солнечную систему. Она равна $v_{III} = 16,7$ км/с.

1.2.16. Сила упругости

Упругость — свойство тел изменять форму и размеры (деформироваться) под действием нагрузок и самопроизвольно восстанавливать первоначальные форму и размеры при прекращении внешних воздействий.

Деформацией (от лат. *deformatio* — искажение) называют любое изменение размеров и формы тела.

Деформации бывают разных видов: *растяжения, сжатия, сдвига, изгиба, кручения*. Все перечисленные виды деформации возможны в твердых телах. В жидкостях и газах возможны только деформации объемного сжатия и растяжения, т. к. эти среды не обладают упругостью формы, а только объема (как известно, жидкость принимает форму сосуда, в котором находится, а газ занимает весь предоставленный ему объем).

Деформация называется *упругой*, если она возникает и исчезает одновременно с внешним воздействием.

Деформация, которая не исчезает после прекращения внешнего воздействия, называется *пластической*.

Если, например, пружину несколько растянуть, а затем отпустить, то она снова примет свою первоначальную форму. Но ту же пружину можно растянуть настолько, что после того, как ее отпустят, она так и останется растянутой.

При деформации тел возникают силы упругости, которые используются, например, в динамометрах. Пластические деформации применяют при лепке из пластилина и глины, при обработке металлов — ковке, штамповке.

Сила, возникающая в теле в результате его деформации и стремящаяся вернуть тело в исходное положение, называется силой упругости.

Сила упругости возникает и при *растяжении* (например, если подвесить гирю на нить), и при *изгибе*, и при других видах деформации.

Возникновение силы упругости можно понять из следующего опыта. На рис. 1.28, *а* изображена ненагруженная пружина. Если на нее сверху поместить гирю, то под действием силы тяжести гиря начнет двигаться вниз, сжимая пружину, т. е. *деформируя* ее, но через некоторое время остановится (рис. 1.28, *б*). Так как тело (гиря) неподвижно, значит, силы, действующие на него, уравновешены, т. е. сила тяжести уравновешена силой, действующей на гирю со стороны сжатой пружины. Это и есть сила упругости.

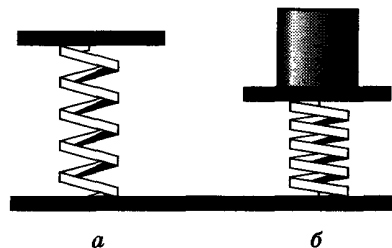


Рис. 1.28

Если на опору поместить достаточно легкий предмет, то ее деформация может оказаться столь незначительной, что изменение формы опоры будет незаметным. Но деформация все равно будет иметь место, а вместе с ней будет действовать и сила упругости, препятствующая падению тел, находящихся на данной опоре. В случае, когда деформация тела незаметна и изменением размеров опоры можно пренебречь, силу упругости называют *силой реакции опоры*.

Силы упругости возникают всегда при попытке изменить форму или объем твердого тела, при изменении объема жидкости или газа.

В отличие от сил тяготения, которые действуют между телами всегда, силы упругости возникают в теле лишь при определенном условии: тело должно быть деформировано.

1.2.17. Закон Гука

Закон Гука — основной закон *теории упругости*. Он был открыт английским ученым Робертом Гуком в 1660 г., когда ему было 25 лет. Закон Гука гласит:

Сила упругости, возникающая при упругой деформации растяжения или сжатия тела, пропорциональна абсолютному значению изменения длины тела.

Если удлинение тела обозначить через x , а *силу упругости* через $F_{\text{упр}}$, то закон Гука можно записать в виде следующей математической формулы:

$$F_{\text{упр}} = -kx,$$

где k — коэффициент пропорциональности, называемый **жесткостью** тела. Знак минус перед правой частью уравнения указывает на противоположные направления силы упругости и удлинения x . Единицей жесткости в СИ является *ньютон на метр* (1 Н/м).

У каждого тела своя жесткость. Чем больше жесткость тела (пружины, проволоки, стержня и т. д.), тем меньше оно изменяет свою длину под действием данной силы.

Следует помнить, что закон Гука справедлив только для *упругой деформации*. Закон Гука хорошо выполняется только при малых деформациях. При больших деформациях изменение длины перестает быть прямо пропорциональным приложенной силе, а при очень больших деформациях тело разрушается.

1.2.18. Сила трения

Взаимодействие, возникающее в месте соприкосновения тел и препятствующее их относительному движению, называют **трением**, а характеризующую это взаимодействие силу — **силой трения**.

Силы трения, как и силы упругости, имеют электромагнитную природу. Трение между двумя твердыми телами называют *сухим трением*.

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

1. **Трение покоя** — трение, возникающее при отсутствии относительного перемещения соприкасающихся тел.

Трение покоя удерживает грузы, находящиеся на движущейся ленте транспортера, от соскальзывания, препятствует развязыванию шнурков, удерживает гвозди, вбитые в доску, и т. д.

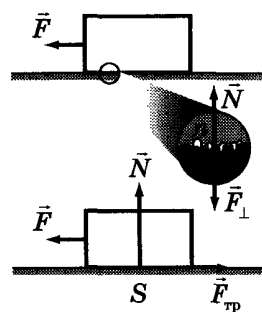


Рис. 1.29

Сила трения покоя — это сила, препятствующая возникновению движения одного тела относительно другого. Направлена сила трения покоя всегда против силы, приложенной извне параллельно поверхности соприкосновения и стремящейся сдвинуть с места предмет, т. е. против предполагающегося движения (рис. 1.29). Измерить силу трения покоя можно с помощью груза, перекинутого через блок и связанного с телом через динамометр.

Сила трения покоя растет вместе с силой, стремящейся сдвинуть тело с места. Но для любых двух соприкасающихся тел она имеет некоторое максимальное значение $(F_{\text{тр.п}})_{\text{max}}$, больше которого она быть не может. Например, для деревянного бруска, находящегося на деревянной доске, максимальная сила трения покоя составляет 0,6 от его веса. Максимальная сила трения покоя пропорциональна силе нормального давления, равного по модулю силе реакции опоры N :

$$(F_{\text{тр.п}})_{\text{max}} = \mu_{\text{п}} N,$$

где $\mu_{\text{п}}$ — коэффициент трения покоя.

Максимальная сила трения покоя не зависит от площади соприкосновения поверхностей. Она зависит от качества обработки соприкасающихся поверхностей и от материалов тел.

2. **Трение скольжения.** Приложив к телу силу, превышающую максимальную силу трения покоя, мы сдвинем тело с места, и оно начнет двигаться. Трение покоя при этом сменится *трением скольжения*.

Сила трения скольжения всегда направлена в сторону, противоположную относительной скорости соприкасающихся тел.

Как и максимальная сила трения покоя, сила трения скольжения пропорциональна силе нормального давления и, следовательно, силе реакции опоры:

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где μ — коэффициент трения скольжения (при небольших скоростях $\mu < \mu_0$), зависящий от свойств соприкасающихся поверхностей.

Сила трения скольжения зависит также довольно сложным образом от относительной скорости соприкасающихся тел. При небольших относительных скоростях сила трения скольжения меньше силы трения покоя, и лишь при увеличении скорости $F_{\text{тр}} > (F_{\text{тр.п}})_{\text{max}}$ (рис. 1.30). При небольших скоростях приблизительно их можно считать равными:

$$F_{\text{тр}} = (F_{\text{тр.п}})_{\text{max}} = \mu N.$$

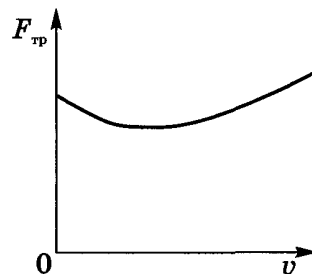


Рис. 1.30

Причины возникновения силы трения

1. **Шероховатость поверхностей соприкасающихся тел.** Даже те поверхности, которые выглядят гладкими, на самом деле всегда имеют микроскопические неровности (выступы, впадины). При скольжении одного тела по поверхности другого эти неровности зацепляются друг за друга и всегда мешают движению.

2. **Межмолекулярное притяжение, действующее в местах контакта трущихся тел.** Межмолекулярное притяжение проявляется в тех случаях, когда поверхности соприкасающихся тел хорошо отполированы. Так, например, при относительном скольжении двух металлов с очень чистыми и ровными поверхностями, обработанными в вакууме с помощью специальной технологии, сила трения оказывается намного больше, чем при перемещении неровного бруска дерева по земле. В некоторых случаях эти металлы даже «схватываются» друг с другом, и дальнейшее скольжение невозможно.

3. **Трение качения.** Если тело не скользит по поверхности другого тела, а, подобно колесу или цилиндру, катится, то возникающее в месте их контакта трение называют трением качения. Катящееся колесо все время вдавливаются в полотно дороги, и потому перед ним все время оказывается небольшой бугорок, который необходимо преодолеть. Именно этим и обусловлено трение качения. При этом чем дорога тверже, тем трение качения меньше.

Как и в предыдущих случаях, сила трения качения пропорциональна силе реакции опоры:

$$F_{\text{тр. кач}} = \mu_{\text{кач}} N,$$

где $\mu_{\text{кач}}$ — коэффициент трения качения.

Благодаря тому, что $\mu_{\text{кач}} \ll \mu$, при одинаковых нагрузках сила трения качения значительно меньше силы трения скольжения. Это было замечено еще в древности. Поэтому для перемещения тяжелых грузов наши предки подкладывали под них катки или бревна. По этой же причине люди стали использовать в транспорте колеса.

Разница в силах трения скольжения и качения объясняется тем, что при скольжении участки тела смещаются вдоль поверхности соприкосновения, и вместо разорванных межмолекулярных связей постоянно образуются новые. Когда колесо катится без проскальзывания по поверхности, молекулярные связи разрываются при подъеме участков колеса быстрее, чем при скольжении, и поэтому сила трения качения значительно меньше силы трения скольжения.

Сила сопротивления твердого тела, движущегося в жидкости и газе

На твердое тело, движущееся в жидкости или газе, действует *сила сопротивления среды*. Эта сила направлена против скорости тела относительно среды и тормозит движение.

В отличие от силы трения сила сопротивления среды появляется только во время движения тела в этой среде. Ничего подобного силе трения покоя здесь нет. Наоборот, всем известно, насколько легче сдвинуть с места предмет в воде, чем на твердой поверхности.

Модуль силы сопротивления среды F_c зависит от размеров, формы и состояния поверхности тела, свойств жидкости или газа, в котором тело движется, и от относительной скорости движения

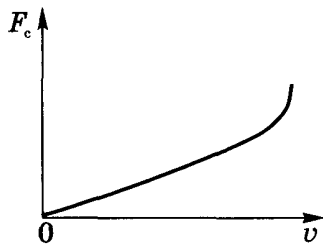


Рис. 1.31

тела и среды. Примерный характер зависимости F_c от скорости v приведен на рис. 1.31. Как следует из рис. 1.31, при малых скоростях движения тела относительно среды можно считать

$$F_c = k_1 v,$$

где k_1 — коэффициент, зависящий от размеров, формы, состояния поверхности тела и вязкости среды.

При больших скоростях относительного движения сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости:

$$F_c = k_2 v^2,$$

где k_2 — коэффициент сопротивления, отличный от k_1 .

1.2.19. Давление

Давление — это физическая величина, равная отношению силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности.

Сила, прикладываемая перпендикулярно поверхности, называется **силой давления** на эту поверхность.

Чтобы определить давление, надо силу давления, приложенную к данной поверхности, разделить на площадь этой поверхности:

$$p = \frac{F}{S}, \quad (1.24)$$

где p — давление, F — сила давления, S — площадь.

Чем меньше площадь поверхности при одной и той же силе давления, тем больше давление.

Если силой давления является вес тела ($F = P = mg$), находящегося на данной поверхности, давление, оказываемое телом, можно найти по формуле

$$p = \frac{mg}{S},$$

где m — масса тела, g — ускорение свободного падения.

Наоборот, если давление p и площадь S известны, из формулы (1.24) можно найти силу давления F :

$$F = pS.$$

Единицей измерения давления в СИ является паскаль (Па). Она названа так в честь французского ученого Блеза Паскаля.

Паскаль — это такое давление, которое производит сила давления в 1 Н, приложенная к поверхности площадью в 1 м²:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2.$$

Из сказанного выше ясно, что одна и та же сила давления приводит к разным результатам, будучи приложена к разным площадям. Так, человек, способный легко скользить по рыхлому снегу на лыжах, сразу же проваливается в него, как только их снимет; гиря, опирающаяся на шляпки гвоздей, только чуть-чуть вдавливают их в песок, а опирающаяся на острия гвоздей вдавливают их намного глубже (рис. 1.32). В обеих ситуациях при одних и тех же силах давления площади опор в случаях *а* больше, чем в *б*.

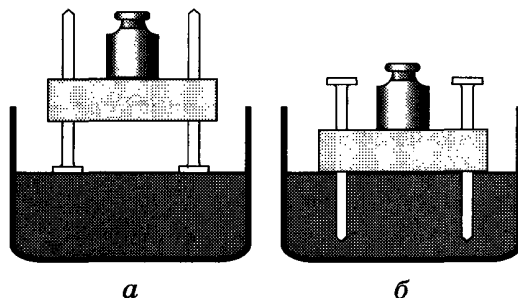


Рис. 1.32

Зависимостью давления от площади опоры пользуются в технике, чтобы увеличить или, наоборот, уменьшить давление. Так, сравнительно небольшая сила давления (около 50 Н), которую прикладывает человек, вдавливая кнопку в доску, приводит к давлению в тысячу раз большему, чем давление, производимое гусеничным трактором.

Примеры заданий ЕГЭ по теме 1.2. «Динамика»

Часть 1

При выполнении заданий уровня А нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

1 2 3 4

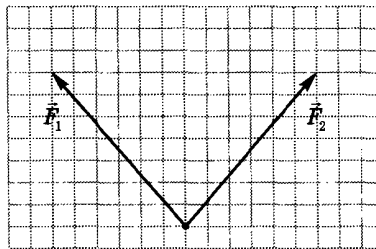
- A1.** Деревянный брусок лежит неподвижно на наклонной плоскости, не соскальзывая вниз, благодаря
- 1) силе тяжести
 - 2) силе трения
 - 3) силе упругости
 - 4) силе межмолекулярного взаимодействия

1 2 3 4

- A2.** На тело, покоящееся в инерциальной системе отсчета, кратковременно подействовали силой, придав ему некоторую скорость. Как будет меняться скорость тела со временем относительно той же системы отсчета, если в дальнейшем на него не будут действовать никакие силы
- 1) скорость будет увеличиваться
 - 2) скорость будет уменьшаться
 - 3) скорость не будет меняться со временем
 - 4) скорость сначала увеличится, затем начнет уменьшаться

1 2 3 4

- A3.** К материальной точке, изображенной на рисунке, приложены две силы. Под действием этих сил точка будет двигаться



- 1) вправо
- 2) влево
- 3) вверх
- 4) вниз

1 2 3 4

- A4.** Тело массой 80 кг лежит на подставке. При этом сила давления (в СИ) подставки на тело приблизительно составляет
- 1) 0
 - 2) 80
 - 3) 40
 - 4) 800

1 2 3 4

- A5.** При движении тела в поле тяжести Земли состояние невесомости наступит при таком значении ускорения
- 1) $\vec{a} > \vec{g}$
 - 2) $\vec{a} < \vec{g}$
 - 3) $\vec{a} = \vec{g}$
 - 4) $\vec{a} = -\vec{g}$

1 2 3 4

- A6.** Пружину растянули на 5 см. Жесткость пружины 0,1 Н/м. Сила упругости, возникшая при этом, равна
- 1) -0,005 Н
 - 2) 0,05 Н
 - 3) 1 Н
 - 4) 0,1 Н

A7. Сила давления F приложена к площади S . Если силу F уменьшить в 4 раза, то как надо изменить S , чтобы давление p увеличилось в 8 раз

- 1) увеличить в 8 раз
- 2) уменьшить в 3 раза
- 3) увеличить в 2 раза
- 4) уменьшить в 32 раза

Часть 2

Ответом к заданиям В1—В3 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

В1. К материальной точке массой 5 кг приложена сила 2 Н. С каким ускорением движется точка?

В2. Ускорение свободного падения на Юпитере в 2,55 раз больше, чем на Земле, а масса Юпитера в 318 раз больше массы Земли. Определите радиус Юпитера (в км).

В3. Тело выпустили из рук на высоте 10 м от земли. Какова скорость тела в момент соприкосновения с землей (сопротивлением воздуха пренебречь)?

В задании В4 на установление соответствия требуется указать последовательность цифр, соответствующих правильному ответу.

В4. Установите соответствие между названием закона, принципа и т. д. (левый столбец) и его математическим выражением (правый столбец).

А) Закон всемирного тяготения

Б) Принцип относительности Галилея

В) Второй закон Ньютона

Г) Третий закон Ньютона

1) $\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}t, t = t'$

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

3) $\vec{F}_A = -\vec{F}_B$

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

5) $p = mv$

Впишите во вторую строку таблицы номера правильных ответов.

А	Б	В	Г

Часть 3

Полное правильное решение задачи С1 должно включать законы и формулы, применение которых необходимо и достаточно для решения задачи, а также математические преобразования, расчеты с численным ответом и, при необходимости, рисунок, поясняющий решение.

С1. Тело массой m движется по наклонной плоскости с углом наклона α с постоянной скоростью. Чему равен коэффициент трения скольжения μ ?

1 2 3 4

В1

В2

В3

В4

1.3. Статика

Статика (от греч. *statos* — стоящий) — это раздел механики, в котором изучаются условия равновесия материальных тел под воздействием сил.

Статику разделяют на аналитическую и геометрическую.

Аналитическая статика описывает общие условия равновесия любой механической системы.

Геометрическая статика имеет дело с материальными частицами (материальными точками) и абсолютно твердым телом. Под абсолютно твердым телом понимают тело, расстояние между точками которого всегда остается неизменным.

Основные аксиомы геометрической статики

1. Равнодействующая двух сил, действующих на материальную точку, определяется по правилу параллелограмма.
2. Две силы, действующие на материальную точку (или абсолютно твердое тело), считаются уравновешенными, если они равны по величине (модулю) и направлены вдоль одной прямой в противоположных направлениях.
3. Сложение или вычитание уравновешенных сил не меняет действия данной системы сил на твердое тело. При этом уравновешенными называются силы, под действием которых свободное твердое тело может находиться в покое в инерциальной системе отсчета.

При изучении статики абсолютно твердого тела решаются следующие задачи:

- 1) приведение всех сил, действующих на тело, к простейшему виду;
- 2) определение условий равновесия сил, действующих на твердое тело.

Геометрическая статика вытекает непосредственно из законов Ньютона и общих законов динамики.

Условия равновесия упруго деформируемых тел, жидкостей и газов рассматриваются в теории упругости, гидростатике и аэростатике.

1.3.1. Момент силы

Моментом силы относительно оси вращения называется физическая величина, равная произведению силы на ее плечо.

Момент силы определяют по формуле:

$$M = Fl, \quad (1.25)$$

где F — сила, l — плечо силы.

Плечом силы называется кратчайшее расстояние от линии действия силы до оси вращения тела.

На рис. 1.33, а изображено твердое тело, способное вращаться вокруг оси. Ось вращения этого тела перпендикулярна плоскости рисунка и проходит через точку, обозначенную буквой O . Плечом силы F_1 здесь является расстояние l_1 от оси вращения до линии действия силы. Находят его следующим образом. Сначала проводят линию действия силы. Затем из точки O , через которую проходит ось вращения тела, опускают на линию действия силы перпендикуляр. Длина этого перпендикуляра является плечом данной силы.

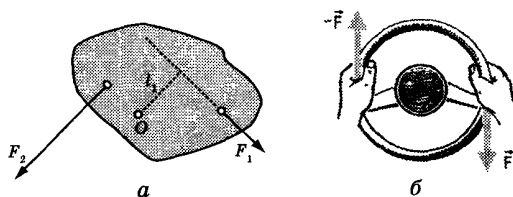


Рис. 1.33

Момент силы характеризует вращающее действие силы. Это действие зависит как от силы, так и от плеча. Чем больше плечо, тем меньшую силу надо приложить, чтобы получить желаемый результат, т. е. один и тот же момент силы (см. (1.33)). Именно поэтому открыть дверь, толкая ее возле петель, гораздо труднее, чем берясь за ручку, а гайку отвернуть гораздо проще длинным, чем коротким гаечным ключом.

За единицу момента силы в СИ принимается момент силы в 1 Н, плечо которой равно 1 м — ньютон-метр (Н · м).

Правило моментов

Твердое тело, способное вращаться вокруг неподвижной оси, находится в равновесии, если момент силы M_1 , вращающей его по часовой стрелке, равен моменту силы M_2 , вращающей его против часовой стрелки:

$$M_1 = -M_2 \text{ или } F_1 l_1 = -F_2 l_2.$$

Момент силы принято считать положительным, если тело вращается по часовой стрелке, и отрицательным, если — против.

Правило моментов является следствием одной из теорем механики, сформулированной французским ученым П. Вариньоном в 1687 г.

Пара сил

Если на тело действуют две равные и противоположно направленные силы, не лежащие на одной прямой, то такое тело не находится в равновесии, поскольку результирующий момент этих сил относительно любой оси не равен нулю, т. к. обе силы имеют моменты, направленные в одну сторону. Две такие силы, одновременно действующие на тело, называют *парой сил*. Если тело закреплено на оси, то под действием пары сил оно будет вращаться. Если пара сил приложена к свободному телу, то оно будет вращаться вокруг оси, проходящей через центр тяжести тела, рис. 1.33, б.

Момент пары сил одинаков относительно любой оси, перпендикулярной к плоскости пары. Суммарный момент M пары всегда равен произведению одной из сил F на расстояние l между силами, которое называется *плечом пары*, независимо от того, на какие отрезки l_1 и l_2 разделяет положение оси плечо пары:

$$M = Fl_1 + Fl_2 = F(l_1 + l_2) = Fl.$$

Момент нескольких сил, равнодействующая которых равна нулю, будет одинаковым относительно всех осей, параллельных друг другу, поэтому действие всех этих сил на тело можно заменить действием одной пары сил с тем же моментом.

1.3.2. Равновесие механической системы (абсолютно твердого тела)

Равновесие механической системы — это состояние, при котором все точки механической системы находятся в покое по отношению к рассматриваемой системе отсчета. Если система отсчета инерциальна, равновесие называется абсолютным, если неинерциальна — относительным.

Для нахождения условий равновесия абсолютно твердого тела необходимо мысленно разбить его на большое число достаточно малых элементов, каждый из которых можно представить материальной точкой. Все эти элементы взаимодействуют между собой — эти силы взаимодействия называются внутренними. Помимо этого на ряд точек тела могут действовать внешние силы.

Согласно второму закону Ньютона, чтобы ускорение точки равнялось нулю (а ускорение покоящейся точки равно нулю), геометрическая сумма сил, действующих на эту точку, должна быть равна нулю. Если тело находится в покое, значит, все его точки (элементы) также находятся в покое. Следовательно, для любой точки тела можно записать:

$$\overline{F}_i + \overline{F}'_i = 0, \quad (1.26)$$

где $\overline{F}_i + \overline{F}'_i$ — геометрическая сумма всех внешних и внутренних сил, действующих на i -й элемент тела.

Уравнение (1.26) означает, что для равновесия тела необходимо и достаточно, чтобы геометрическая сумма всех сил, действующих на любой элемент этого тела, была равна нулю.

Из (1.26) легко получить первое условие равновесия тела (системы тел). Для этого достаточно просуммировать уравнение (1.26) по всем элементам тела:

$$\sum \overline{F}_i + \sum \overline{F}'_i = 0.$$

Вторая сумма равна нулю согласно третьему закону Ньютона: векторная сумма всех внутренних сил системы равна нулю, т. к. любой внутренней силе соответствует сила, равная по модулю и противоположная по направлению.

Следовательно,

$$\sum \overline{F}_i = 0.$$

Первым условием равновесия твердого тела (системы тел) является равенство нулю геометрической суммы всех внешних сил, приложенных к телу.

Это условие является необходимым, но не достаточным. В этом легко убедиться, вспомнив о вращающем действии пары сил, геометрическая сумма которых тоже равна нулю.

Вторым условием равновесия твердого тела является равенство нулю суммы моментов всех внешних сил, действующих на тело, относительно любой оси.

Таким образом, условия равновесия твердого тела в случае произвольного числа внешних сил выглядят так:

$$\sum \overline{F}_i = 0; \quad \sum M_k = 0.$$

1.3.3. Закон Паскаля

Гидростатика (от греч. *hydor* — вода и *statos* — стоящий) — один из подразделов механики, изучающий равновесие жидкости, а также равновесие твердых тел, частично или полностью погруженных в жидкость.

Закон Паскаля — основной закон гидростатики, согласно которому **давление на поверхность жидкости, произведенное внешними силами, передается жидкостью одинаково во всех направлениях.**

Этот закон был открыт французским ученым Б. Паскалем в 1653 г. и опубликован в 1663 г.

Чтобы убедиться в справедливости закона Паскаля, достаточно проделать простой опыт. Присоединим к трубке с поршнем полый шар со множеством маленьких отверстий. Наполнив шар водой, нажмем на поршень, чтобы увеличить в нем давление. Вода начнет выливаться, но не только через то отверстие, которое находится на линии действия прилагаемой нами силы, а и через, все

остальные тоже (рис. 1.34, а). Причем напор воды, обусловленный внешним давлением, во всех появившихся струйках будет одинаковым.

Аналогичный результат мы получим в том случае, если вместо воды будем использовать дым (рис. 1.34, б). Таким образом, закон Паскаля справедлив не только для жидкостей, но и для газов.

Жидкости и газы передают оказываемое на них давление по всем направлениям одинаково.

Передача давления жидкостями и газами во всех направлениях одновременно объясняется достаточно высокой подвижностью частиц, из которых они состоят.

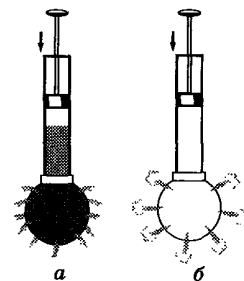


Рис. 1.34

1.3.4. Давление покоящейся жидкости на дно и стенки сосуда (гидростатическое давление)

Жидкости (и газы) передают по всем направлениям не только внешнее давление, но и то давление, которое существует внутри них благодаря весу собственных частей.

Давление, оказываемое покоящейся жидкостью, называется *гидростатическим*.

Получим формулу для расчета гидростатического давления жидкости на произвольной глубине h (в окрестности точки A на рис. 1.35).

Сила давления, действующая со стороны вышележащего узкого столба жидкости, может быть выражена двумя способами:

- 1) как произведение давления p в основании этого столба на площадь его сечения S :

$$F = pS; \quad (1.27)$$

- 2) как вес того же столба жидкости, т. е. произведение массы m жидкости на ускорение свободного падения:

$$F = mg. \quad (1.28)$$

Масса жидкости может быть выражена через ее плотность ρ и объем V :

$$m = \rho V, \quad (1.29)$$

а объем — через высоту столба и площадь его поперечного сечения:

$$V = Sh. \quad (1.30)$$

Подставляя в формулу (1.28) значение массы из (1.29) и объема из (1.30), получим:

$$F = \rho Vg = \rho Shg. \quad (1.31)$$

Приравнявая выражения (1.27) и (1.31) для силы давления, получим:

$$pS = \rho Shg.$$

Разделив обе части последнего равенства на площадь S , найдем давление жидкости на глубине h :

$$p = \rho hg.$$

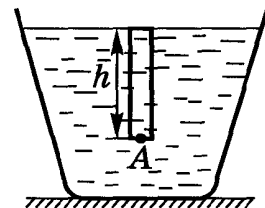


Рис. 1.35

Это и есть формула гидростатического давления.

Гидростатическое давление на любой глубине внутри жидкости не зависит от формы сосуда, в котором находится жидкость, и равно произведению плотности жидкости, ускорения свободного падения и глубины, на которой определяется давление.

Важно еще раз подчеркнуть, что по формуле гидростатического давления можно рассчитывать давление жидкости, налитой в сосуд любой формы, в том числе, давление на стенки сосуда, а также давление в любой точке жидкости, направленное снизу вверх, поскольку давление на одной и той же глубине одинаково по всем направлениям.

Гидростатический парадокс

Гидростатический парадокс — явление, заключающееся в том, что вес жидкости, налитой в сосуд, может отличаться от силы давления жидкости на дно сосуда.

В данном случае под словом «парадокс» понимают неожиданное явление, не соответствующее обычным представлениям.

Так, в расширяющихся кверху сосудах сила давления на дно меньше веса жидкости, а в сужающихся — больше. В цилиндрическом сосуде обе силы одинаковы. Если одна и та же жидкость налита до одной и той же высоты в сосуды разной формы, но с одинаковой площадью дна, то, несмотря на разный вес налитой жидкости, сила давления на дно одинакова для всех сосудов и равна весу жидкости в цилиндрическом сосуде (рис. 1.36).

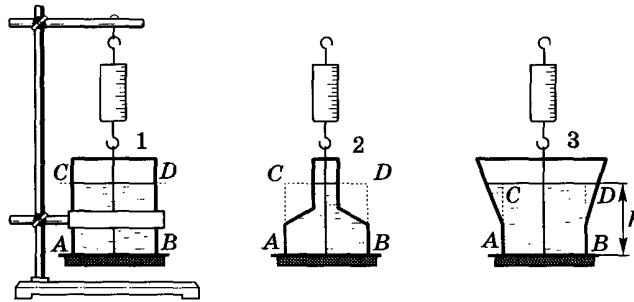


Рис. 1.36

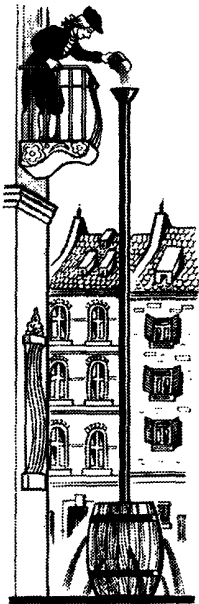


Рис. 1.37

Это следует из того, что давление покоящейся жидкости зависит только от глубины под свободной поверхностью и от плотности жидкости: $p = \rho gh$ (формула гидростатического давления). А так как площадь дна у всех сосудов одинакова, то и сила, с которой жидкость давит на дно этих сосудов, одна и та же. Она равна весу вертикального столба $ABCD$ жидкости: $P = \rho ghS$, здесь S — площадь дна (хотя масса, а следовательно, и вес в этих сосудах различны).

Гидростатический парадокс объясняется законом Паскаля — способностью жидкости передавать давление одинаково во всех направлениях.

Из формулы гидростатического давления следует, что одно и то же количество воды, находясь в разных сосудах, может оказывать разное давление на дно. Поскольку это давление зависит от высоты столба жидкости, то в узких сосудах оно будет больше, чем в широких. Благодаря этому даже небольшим количеством воды можно создавать очень большое давление. В 1648 г. это очень убедительно продемонстрировал Б. Паскаль. Он вставил в закрытую бочку, наполненную водой, узкую трубку и, поднявшись на балкон второго этажа, вылил в эту трубку кружку воды. Из-за малой толщины трубки вода в ней поднялась до большой высоты, и давление в бочке увеличилось настолько, что крепления бочки не выдержали, и она треснула (рис. 1.37).

1.3.5. Закон Архимеда

Закон Архимеда — закон статике жидкостей и газов, согласно которому на всякое тело, погруженное в жидкость (или газ), действует со стороны этой жидкости (или газа) выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости (газа) и направленная по вертикали вверх.

Этот закон был открыт древнегреческим ученым Архимедом в III в. до н. э. Свои исследования Архимед описал в трактате «О плавающих телах», который считается одним из последних его научных трудов.

Ниже приведены выводы, следующие из закона Архимеда.

Действие жидкости и газа на погруженное в них тело

Если погрузить в воду мячик, наполненный воздухом, и отпустить его, то он всплывет. То же самое произойдет со щепкой, с пробкой и многими другими телами. Какая же сила заставляет их всплывать?

На тело, погруженное в воду, со всех сторон действуют силы давления воды (рис. 1.38, а). В каждой точке тела эти силы направлены перпендикулярно его поверхности. Если бы все эти силы были одинаковы, тело испытывало бы лишь всестороннее сжатие. Но на разных глубинах гидростатическое давление различно: оно возрастает с увеличением глубины. Поэтому силы давления, приложенные к нижним участкам тела, оказываются больше сил давления, действующих на тело сверху.

Если заменить все силы давления, приложенные к погруженному в воду телу, одной (результатирующей или равнодействующей) силой, оказывающей на тело то же самое действие, что и все эти отдельные силы вместе, то результирующая сила будет направлена вверх. Это и заставляет тело всплывать. Эта сила называется **выталкивающей силой**, или **архимедовой силой** (по имени Архимеда, который впервые указал на ее существование и установил, от чего она зависит). На рис. 1.38, б она обозначена как F_A .

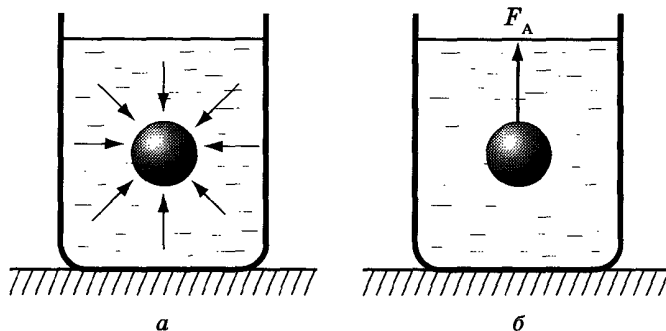


Рис. 1.38

Архимедова (выталкивающая) сила действует на тело не только в воде, но и в любой другой жидкости, т. к. в любой жидкости существует гидростатическое давление, разное на разных глубинах. Эта сила действует и в газах, благодаря чему летают воздушные шары и дирижабли.

Благодаря выталкивающей силе вес любого тела, находящегося в воде (или в любой другой жидкости), оказывается меньше, чем в воздухе, а в воздухе меньше, чем в безвоздушном пространстве. В этом легко убедиться, взвесив гирию с помощью учебного пружинного динамометра сначала в воздухе, а затем опустив ее в сосуд с водой.

Уменьшение веса происходит и при переносе тела из вакуума в воздух (или какой-либо другой газ).

Если вес тела в вакууме (например, в сосуде, из которого откачан воздух) равен P_0 , то его вес в воздухе равен:

$$P_{\text{возд}} = P_0 - F'_A,$$

где F'_A — архимедова сила, действующая на данное тело в воздухе. Для большинства тел эта сила ничтожно мала и ею можно пренебречь, т. е. можно считать, что $P_{\text{возд}} = P_0 = mg$.

Вес тела в жидкости уменьшается значительно сильнее, чем в воздухе. Если вес тела в воздухе $P_{\text{возд}} = P_0$, то вес тела в жидкости равен $P_{\text{жидк}} = P_0 - F_A$. Здесь F_A — архимедова сила, действующая в жидкости. Отсюда следует, что

$$F_A = P_0 - P_{\text{жидк}}. \quad (1.32)$$

Поэтому чтобы найти архимедову силу, действующую на тело в какой-либо жидкости, нужно это тело взвесить в воздухе и в жидкости. Разность полученных значений и будет архимедовой (вытесняющей) силой.

Другими словами, учитывая формулу (1.32), можно сказать:

Вытесняющая сила, действующая на погруженное в жидкость тело, равна весу жидкости, вытесненной этим телом.

Определить архимедову силу можно также теоретически. Для этого предположим, что тело, погруженное в жидкость, состоит из той же жидкости, в которую оно погружено. Мы имеем право это предположить, так как силы давления, действующие на тело, погруженное в жидкость, не зависят от вещества, из которого оно сделано. Тогда приложенная к такому телу архимедова сила F_A будет уравновешена действующей вниз силой тяжести $m_{\text{ж}}g$ (где $m_{\text{ж}}$ — масса жидкости в объеме данного тела):

$$F_A = m_{\text{ж}}g. \quad (1.33)$$

Но сила тяжести $m_{\text{ж}}g$ равна весу вытесненной жидкости $P_{\text{ж}}$. Таким образом,

$$F_A = P_{\text{ж}}.$$

Учитывая, что масса жидкости равна произведению ее плотности $\rho_{\text{ж}}$ на объем, формулу (1.33) можно записать в виде:

$$F_A = \rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}} g,$$

где $V_{\text{ж}}$ — объем вытесненной жидкости. Этот объем равен объему той части тела, которая погружена в жидкость. Если тело погружено в жидкость целиком, то он совпадает с объемом V всего тела; если же тело погружено в жидкость частично, то объем $V_{\text{ж}}$ вытесненной жидкости меньше объема V тела (рис. 1.39).

Формула (1.33) справедлива и для архимедовой силы, действующей в газе. Только в этом случае в нее следует подставлять плотность газа и объем вытесненного газа, а не жидкости.

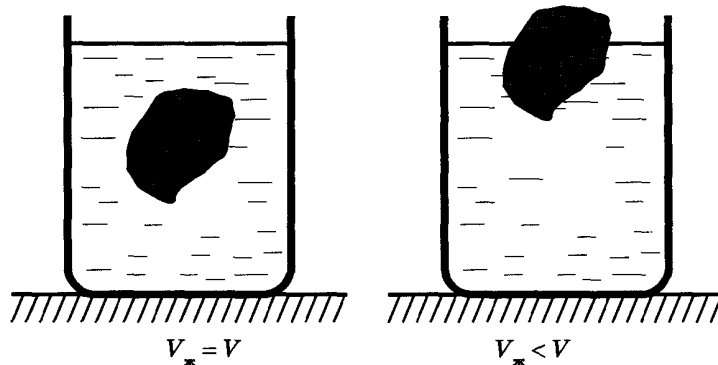


Рис. 1.39

С учетом вышеизложенного закон Архимеда можно сформулировать так:

На всякое тело, погруженное в покоящуюся жидкость (или газ), действует со стороны этой жидкости (или газа) выталкивающая сила, равная произведению плотности жидкости (или газа), ускорения свободного падения и объема той части тела, которая погружена в жидкость (или газ).

1.3.6. Условие плавания тел

Плавание тел — состояние равновесия твердого тела, частично или полностью погруженного в жидкость (или газ).

Основная задача теории плавания тел — определение равновесия тела, погруженного в жидкость, выяснение условий устойчивости равновесия. На простейшие условия плавания тел указывает закон Архимеда. Рассмотрим эти условия.

Как известно, на все тела, погруженные в жидкость, действует сила Архимеда F_A (выталкивающая сила), направленная вертикально вверх, однако всплывают далеко не все. Чтобы понять, почему одни тела всплывают, а другие тонут, необходимо учесть еще одну силу, действующую на все тела, — силу тяжести F_τ , которая направлена вертикально вниз, т. е. противоположно F_A . Если тело оставить внутри жидкости в состоянии покоя, то оно начнет двигаться в сторону, в которую направлена большая из сил. При этом возможны следующие случаи:

- 1) если архимедова сила меньше силы тяжести ($F_A < F_\tau$), то тело опустится на дно, т. е. утонет (рис. 1.40, а);
- 2) если архимедова сила больше силы тяжести ($F_A > F_\tau$), то тело всплывет (рис. 1.40, б);

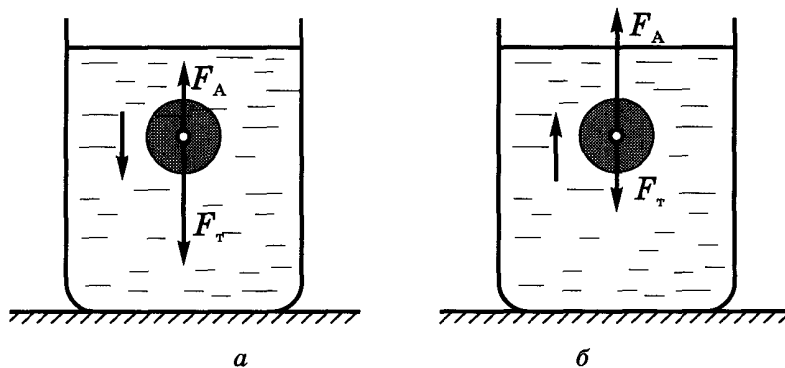


Рис. 1.40

- 3) если архимедова сила равна силе тяжести ($F_A = F_\tau$), то тело останется в покое. Последнее условие является условием равновесия тела в жидкости:

$$F_A = F_\tau. \quad (1.34)$$

Равенство (1.34) выражает *условие плавания тел*: для того, чтобы тело плавало, необходимо, чтобы действующая на него сила тяжести уравнивалась архимедовой (выталкивающей) силой.

Условию плавания тел можно придать другую форму. Представим архимедову силу в виде

$$F_A = \rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}} g, \quad (1.35)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости, $V_{\text{ж}}$ — объем жидкости, вытесненный телом, g — ускорение свободного падения.

Силу тяжести, действующую на тело, тоже можно выразить через объем V и плотность тела ρ :

$$F_{\tau} = mg = \rho Vg, \quad (1.36)$$

где m — масса тела. Подставим выражения (1.35) и (1.36) в равенство (1.34):

$$\rho Vg = \rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}} g.$$

Разделив обе части этого равенства на g , получим условие плавание тел в новой форме:

$$\rho V = \rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}}.$$

Из полученного соотношения можно вывести два важных следствия.

1. Для того чтобы тело плавало, будучи полностью погруженным в жидкость, необходимо, чтобы плотность тела была равна плотности жидкости.
2. Для того чтобы тело плавало, частично выступая над поверхностью жидкости, необходимо, чтобы плотность тела была меньше плотности жидкости.

При $\rho > \rho_{\text{ж}}$ плавание тел невозможно, так как в этом случае сила тяжести превышает архимедову силу, и тело тонет.

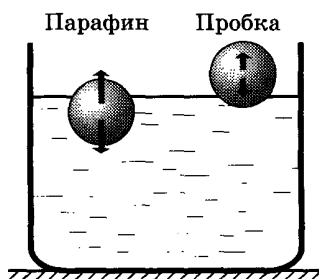


Рис. 1.41

Что будет происходить с телом, у которого $\rho < \rho_{\text{ж}}$, если его полностью погрузить в жидкость? В этом случае архимедова сила будет преобладать над силой тяжести, и потому тело начнет подниматься вверх. Пока тело будет двигаться, оставаясь полностью погруженным в жидкость, архимедова сила будет оставаться неизменной. Но как только тело достигнет поверхности жидкости и появится над ней, эта сила (по мере уменьшения объема части тела, погруженного в жидкость) будет становиться все меньше и меньше. Всплытие прекратится тогда, когда архимедова (выталкивающая) сила станет равной силе тяжести. При этом чем меньшей плотностью (по сравнению с плотностью жидкости) обладает тело, тем меньшая его часть останется внутри жидкости (рис. 1.41).

Плавание судов

Масса современных судов достигает нескольких десятков тысяч тонн. Почему же они не тонут? Дело в том, что, несмотря на огромную массу, их средняя плотность по-прежнему меньше плотности воды (благодаря тому, что в кораблях много пустых помещений). При этом сила тяжести, действующая на судно, уравнивается архимедовой (выталкивающей) силой, и судно плавает.

Глубина, на которую плавающее судно погружается в воду, называется *осадкой судна*. При полной загрузке судна оно не должно погружаться в воду ниже так называемой грузовой *ватерлинии*.

Вес воды, вытесняемый судном при погружении до ватерлинии, равный силе тяжести, действующей на судно с грузом, называется *водоизмещением судна*.

Если из водоизмещения вычесть вес самого судна, получим *грузоподъемность судна*. Грузоподъемность показывает вес груза, перевозимого судном.

Воздухоплавание

На все тела в воздухе (как и в жидкости) действует выталкивающая (архимедова) сила. Для тел, находящихся в воздухе, она равна:

$$F_A = \rho_{\text{возд}} Vg,$$

где $\rho_{\text{возд}}$ — плотность воздуха.

Если эта сила окажется больше силы тяжести, действующей на тело, то тело взлетит. На этом основано воздухоплавание.

Летательные аппараты, применяемые в воздухоплавании, называют *аэростатами* (от греч. *aer* — воздух, *statos* — стоящий). Неуправляемые аэростаты свободного полета с оболочкой, имеющей форму шара, называют *воздушными шарами*. Для исследования верхних слоев атмосферы (стратосферы) еще не так давно применялись огромные воздушные шары — *стратостаты*. Управляемые аэростаты (имеющие двигатель и воздушные винты) называют *дирижаблями*.

Воздушный шар не только сам поднимается вверх, но может поднять и некоторый груз: кабину, людей, приборы. Для того, чтобы определить, какой груз способен поднять воздушный шар, следует знать его подъемную силу. Подъемная сила воздушного шара равна разности между архимедовой силой и действующей на шар силой тяжести:

$$F = F_A - F_T.$$

Чем меньше плотность газа, наполняющего воздушный шар данного объема, тем меньше действующая на него сила тяжести и тем больше возникающая подъемная сила. Воздушные шары можно наполнять гелием, водородом или нагретым воздухом. Хотя у водорода меньше плотность, чем у гелия, все же чаще в целях безопасности применяют гелий (водород — горючий газ).

Гораздо проще осуществить подъем и спуск шара, наполненного горячим воздухом. Для этого под отверстием, находящимся в нижней части шара, располагают горелку. Она позволяет регулировать температуру воздуха, а значит, и его плотность и подъемную силу.

Можно подобрать такую температуру шара, при которой вес шара и кабины будет равен выталкивающей силе. Тогда шар повиснет в воздухе, и с него будет легко проводить наблюдения.

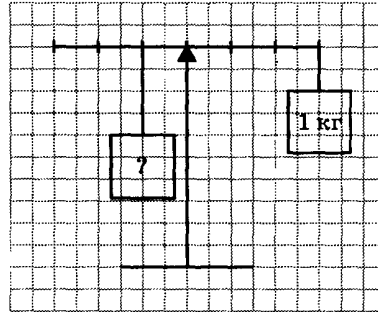
Примеры заданий ЕГЭ по теме 1.3. «Статика»

Часть 1

При выполнении заданий уровня А нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

1 2 3 4

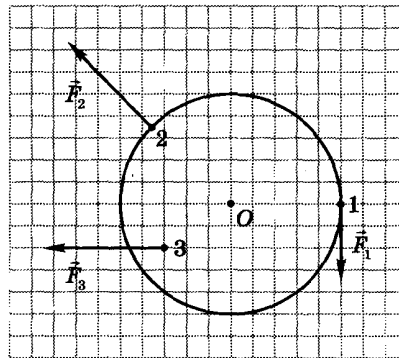
- А1.** Чтобы уравновесить рычаг, изображенный на рисунке, в точку А необходимо подвесить груз массой



- 1) 3 кг 2) 4 кг 3) 2 кг 4) 2,5 кг

1 2 3 4

- А2.** К разным точкам диска, изображенного на рисунке, способного свободно вращаться вокруг неподвижной оси, приложены силы, величина и направление которых изображены стрелками. Под действием этих сил



- 1) диск будет вращаться по часовой стрелке
2) диск будет вращаться против часовой стрелки
3) диск останется неподвижным
4) невозможно определить направление и характер движения диска

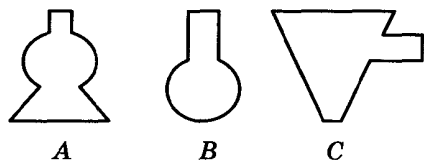
1 2 3 4

- А3.** К рулю автомобиля приложена пара сил, суммарный момент которой равен $3 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Радиус руля 20 см. С какой силой водитель крутит руль левой рукой?

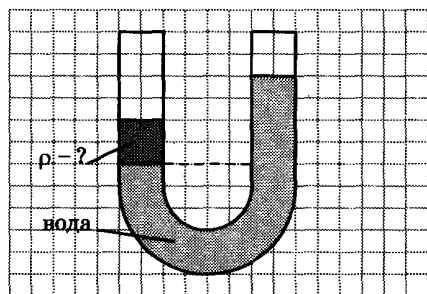
- 1) 3 Н 2) 4,5 Н 3) 6 Н 4) 7,5 Н

A4. Давление жидкости на дно изображенных на рисунке сосудов

- 1) максимально в сосуде A
- 2) максимально в сосуде B
- 3) максимально в сосуде C
- 4) одинаково во всех трех сосудах



A5. Плотность неизвестной жидкости в сообщающихся сосудах, изображенных на рисунке, составляет



- 1) 1,5 г/см³
- 2) 0,5 г/см³
- 3) 2 г/см³
- 4) 0,8 г/см³

A6. Условие плавания тел выражается следующим соотношением между массой m , плотностью ρ , объемом тела V_t и вытесненной им жидкости V_j

- 1) $m_t > m_j$
- 2) $\rho_t \geq \rho_j$
- 3) $V_t \leq V_j$
- 4) $\rho_t V_t^* = V_j \rho_j$

A7. Атмосферное давление с увеличением высоты местности

- 1) повышается
- 2) понижается
- 3) не изменяется
- 4) зависит от широты местности

Часть 2

Ответом к заданиям В1—В5 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

В1. Рассчитайте величину гидростатического давления (в атм.) на дне озера Байкал (на глубине ~ 1600 м), считая воду чистой.

В2. В жидкость с плотностью 1,4 г/см³ погружен шар радиусом 5 см. Рассчитайте силу Архимеда, действующую на шар.

В3. Какую силу F_1 нужно приложить к ручке гидравлического пресса, чтобы сжать деталь с силой $F_2 = 100$ Н, если отношение площадей поршней $S_1 : S_2 = 1 : 5$?

В4. С какой силой надо давить на пробку объемом 5 см³ и плотностью 0,24 г/см³, чтобы полностью погрузить ее в воду?

В5. Подъемная сила аэростата $F = 1000$ Н, объем шара $V = 100$ м³. Вес самой оболочки 50 Н. Какова плотность газа, наполняющего воздушный шар?

1 2 3 4

1 2 3 4

1 2 3 4

1 2 3 4

1.4. Законы сохранения в механике

1.4.1. Импульс тела

Импульсом тела называется величина, равная произведению массы тела на его скорость.

Следует помнить, что речь идет о теле, которое можно представить как материальную точку. Импульс тела (p) называют также *количеством движения*. Понятие количества движения было введено в физику Рене Декартом (1596–1650). Термин «импульс» появился позже (*impulsus* в переводе с латинского означает «толчок»). Импульс является векторной величиной (как и скорость) и выражается формулой:

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (1.37)$$

Направление вектора импульса всегда совпадает с направлением скорости.

За единицу импульса в СИ принимают импульс тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с, следовательно, единицей импульса является 1 кг · м/с.

1.4.2. Импульс силы

Если на тело (материальную точку) действует постоянная сила в течение промежутка времени Δt , то постоянным будет и ускорение:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t},$$

где, $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ — начальная и конечная скорости тела. Подставив это значение в выражение второго закона Ньютона, получим:

$$\frac{m(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)}{\Delta t} = \vec{F}. \quad (1.38)$$

Раскрыв скобки и воспользовавшись выражением (1.37) для импульса тела, имеем:

$$\vec{p}_2 - \vec{p}_1 = \vec{F}\Delta t.$$

Здесь $\vec{p}_2 - \vec{p}_1 = \Delta\vec{p}$ — изменение импульса за время Δt . Тогда предыдущее уравнение примет вид:

$$\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t. \quad (1.39)$$

Выражение (1.39) представляет собой математическую запись формулировки *второго закона механики*, данной самим Ньютоном:

Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.

Произведение силы на время ее действия называют *импульсом силы*. Поэтому *изменение импульса точки равно изменению импульса силы, действующей на нее*.

Выражение (1.39) называется *уравнением движения тела*. Следует заметить, что одно и то же действие — изменение импульса точки — может быть получено малой силой за большой промежуток времени и большой силой за малый промежуток времени.

1.4.3. Импульс системы тел. Закон сохранения импульса

Закон сохранения импульса является следствием второго и третьего законов Ньютона.

Рассмотрим систему, состоящую из двух тел (рис. 1.42). Силы ($\vec{F}_{12}$ и $\vec{F}_{21}$ на рис. 1.42), с которыми тела системы взаимодействуют между собой, называются внутренними. Пусть кроме внутренних сил на систему действуют внешние силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$. Для каждого тела можно записать уравнение (1.39). Сложив левые и правые части этих уравнений, получим:

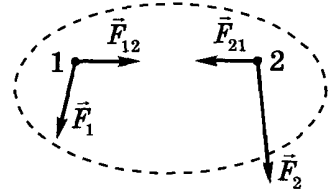


Рис. 1.42

$$\Delta \vec{p}_1 + \Delta \vec{p}_2 = (\vec{F}_{12} + \vec{F}_{21} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2) \Delta t.$$

Согласно третьему закону Ньютона $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$.

Следовательно,

$$\Delta \vec{p}_1 + \Delta \vec{p}_2 = (\vec{F}_1 + \vec{F}_2) \Delta t. \quad (1.40)$$

В левой части стоит геометрическая сумма изменений импульсов всех тел системы, равная изменению импульса самой системы — $\Delta \vec{p}_{\text{сист}}$. С учетом этого равенство (1.40) можно записать:

$$\Delta \vec{p}_{\text{сист}} = \vec{F} \Delta t, \quad (1.41)$$

где $\vec{F}$ — сумма всех внешних сил, действующих на тело. Полученный результат означает, что импульс системы могут изменить только внешние силы, причем изменение импульса системы направлено так же, как суммарная внешняя сила.

Внутренние силы изменить суммарный импульс системы не могут. Они лишь меняют импульсы отдельных тел системы.

Из уравнения (1.41) вытекает закон сохранения импульса. Если на систему не действуют никакие внешние силы, то правая часть уравнения (1.41) обращается в ноль, что означает неизменность суммарного импульса системы:

$$\vec{p}_{\text{сист}} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = \text{const.}$$

Система, на которую не действуют никакие внешние силы или равнодействующая внешних сил равна нулю, называется *замкнутой*.

Закон сохранения импульса гласит:

Суммарный импульс замкнутой системы тел остается постоянным при любых взаимодействиях тел системы между собой.

Полученный результат справедлив для системы, содержащей произвольное число тел. Если сумма внешних сил не равна нулю, но сумма их проекций на какое-то направление равна нулю, то проекция импульса системы на это направление не меняется. Так, например, система тел на поверхности Земли не может считаться замкнутой из-за силы тяжести, действующей на все тела, однако сумма проекций импульсов на горизонтальное направление может оставаться неизменной (при отсутствии трения), т. к. в этом направлении сила тяжести не действует.

Реактивное движение

Рассмотрим примеры, подтверждающие справедливость закона сохранения импульса.

Возьмем детский резиновый шарик, надуем его и отпустим. Мы увидим, что когда воздух начнет выходить из него в одну сторону, сам шарик полетит в другую. Движение шарика является

примером реактивного движения. Объясняется оно законом сохранения импульса: суммарный импульс системы «шарик плюс воздух в нем» до истечения воздуха равен нулю; он должен остаться равным нулю и во время движения; поэтому шарик движется в сторону, противоположную направлению истечения струи, и с такой скоростью, что его импульс по модулю равен импульсу воздушной струи.

Реактивным движением называют движение тела, возникающее при отделении от него с какой-либо скоростью некоторой его части. Вследствие закона сохранения импульса направление движения тела при этом противоположно направлению движения отделившейся части.

На принципе реактивного движения основаны полеты ракет. Современная космическая ракета представляет собой очень сложный летательный аппарат. Масса ракеты складывается из массы рабочего тела (т. е. раскаленных газов, образующихся в результате сгорания топлива и выбрасываемых в виде реактивной струи) и конечной, или, как говорят, «сухой» массы ракеты, остающейся после выброса из ракеты рабочего тела.

Когда реактивная газовая струя с большой скоростью выбрасывается из ракеты, сама ракета устремляется в противоположную сторону. Согласно закону сохранения импульса, импульс $m_p v_p$, приобретаемый ракетой, должен быть равен импульсу $m_{\text{газ}} \cdot v_{\text{газ}}$ выброшенных газов:

$$m_p v_p = m_{\text{газ}} \cdot v_{\text{газ}}.$$

Отсюда следует, что скорость ракеты

$$v_p = (m_{\text{газ}}/m_p) \cdot v_{\text{газ}}. \quad (1.42)$$

Из этой формулы видно, что скорость ракеты тем больше, чем больше скорость выбрасываемых газов и отношение массы рабочего тела (т. е. массы топлива) к конечной («сухой») массе ракеты.

Формула (1.42) является приближенной. В ней не учитывается, что по мере сгорания топлива масса летящей ракеты становится все меньше и меньше. Точная формула для скорости ракеты была получена в 1897 г. К. Э. Циолковским и носит его имя.

Формула Циолковского позволяет рассчитать запасы топлива, необходимые для сообщения ракете заданной скорости.

1.4.4. Работа силы

Термин «работа» был введен в физику в 1826 г. французским ученым Ж. Понселе. Если в обыденной жизни работой называют лишь труд человека, то в физике и, в частности, в механике принято считать, что работу совершает сила. Физическую величину работы обычно обозначают буквой A .

Работа силы — это мера действия силы, зависящая от ее модуля и направления, а также от перемещения точки приложения силы. Для постоянной силы и прямолинейного перемещения работа определяется равенством:

$$A = F |\Delta \vec{r}| \cos \alpha,$$

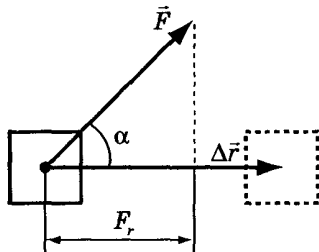


Рис. 1.43

где F — сила, действующая на тело, $\Delta \vec{r}$ — перемещение, α — угол между силой и перемещением (рис. 1.43).

Работа силы равна произведению модулей силы и перемещения и косинуса угла между ними, т. е. скалярному произведению векторов $\vec{F}$ и $\Delta \vec{r}$.

Работа — величина скалярная. Если $\alpha < 90^\circ$, то $A > 0$, а если $90^\circ < \alpha < 180^\circ$, то $A < 0$; если же $\alpha = 90^\circ$, то $A = 0$. Так, сила тяжести

не совершает работу при перемещении тела по горизонтальной плоскости. Также при движении спутника по круговой орбите сила тяготения не совершает работу.

При действии на тело нескольких сил полная работа (сумма работ всех сил) равна работе результирующей силы.

Единицей работы в СИ является *джоуль* (1 Дж). 1 Дж — это работа, которую совершает сила в 1 Н на пути в 1 м в направлении действия этой силы. Эта единица названа в честь английского ученого Дж. Джоуля (1818–1889): 1 Дж = 1 Н · м. Часто применяются также килоджоули и миллиджоули: 1 кДж = 1 000 Дж, 1 мДж = 0,001 Дж.

Работа силы тяжести

Рассмотрим тело, скользящее по наклонной плоскости с углом наклона α и высотой H (рис. 1.44). Выразим Δx через H и α :

$$\Delta x = \frac{H}{\sin \alpha}. \quad (1.43)$$

Учитывая, что сила тяжести $F_g = mg$ составляет угол $(90^\circ - \alpha)$ с направлением перемещения, используя формулу (1.43), получим выражение для работы силы тяжести A_g :

$$A_g = mg \cdot \cos(90^\circ - \alpha) \cdot \frac{H}{\sin \alpha} = mgH.$$

Из этой формулы видно, что работа силы тяжести зависит от высоты и не зависит от угла наклона плоскости.

Отсюда следует, что:

- 1) работа силы тяжести не зависит от формы траектории, по которой движется тело, а лишь от начального и конечного положения тела;
- 2) при перемещении тела по замкнутой траектории работа силы тяжести равна нулю, т. е. сила тяжести — консервативная сила (консервативными называются силы, обладающие таким свойством).

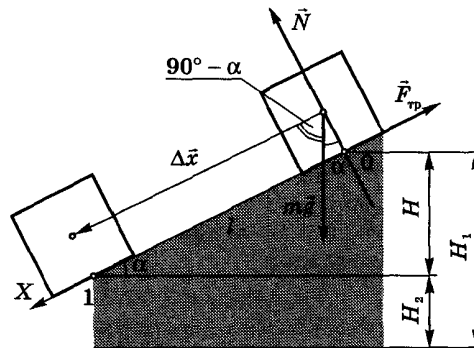


Рис. 1.44

Работа сил реакции, как следует из рис. 1.44, равна нулю, поскольку сила реакции (N) направлена перпендикулярно перемещению Δx .

Работа силы трения

Сила трения направлена противоположно перемещению Δx и составляет с ним угол 180° (рис. 1.44), поэтому работа силы трения отрицательна:

$$A_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} \Delta x \cdot \cos 180^\circ = -F_{\text{тр}} \cdot \Delta x.$$

Так как $F_{\text{тр}} = \mu N$, $N = mg \cdot \cos \alpha$, $\Delta x = l = \frac{H}{\sin \alpha}$, то

$$A_{\text{тр}} = \mu mg H \operatorname{ctg} \alpha.$$

Работа силы упругости

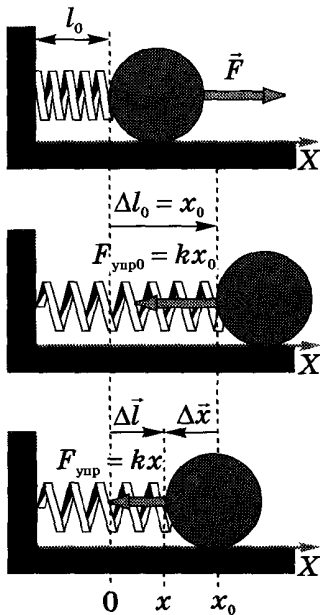


Рис. 1.45

Пусть на нерастянутую пружину длиной l_0 действует внешняя сила $\vec{F}$, растягивая ее на $\Delta l_0 = x_0$ (рис. 1.45). В положении $x = x_0$ $F_{\text{упр}} = kx_0$. После прекращения действия силы $\vec{F}$ в точке x_0 пружина под действием силы $F_{\text{упр}}$ сжимается.

Определим работу силы упругости при изменении координаты правого конца пружины от x_0 до x . Поскольку сила упругости на этом участке изменяется линейно, в законе Гука можно использовать ее среднее значение на этом участке:

$$F_{\text{упр.ср}} = \frac{kx_0 + kx}{2} = \frac{k}{2}(x_0 + x).$$

Тогда работа (с учетом того, что направления $\vec{F}_{\text{упр.ср}}$ и $\Delta \vec{x}$ совпадают) равна:

$$A_{\text{упр}} = \frac{k}{2}(x_0 + x)(x_0 - x) = \frac{kx_0^2}{2} - \frac{kx^2}{2}.$$

Можно показать, что вид последней формулы не зависит от угла между $\vec{F}_{\text{упр}}$ и $\Delta \vec{x}$. Работа сил упругости зависит лишь от деформаций пружины в начальном и конечном состояниях.

Таким образом, сила упругости, подобно силе тяжести, является консервативной силой.

1.4.5. Энергия. Кинетическая и потенциальная энергия. Закон сохранения энергии

Если тело или несколько взаимодействующих между собой тел (система тел) могут совершать работу, то говорят, что они обладают энергией.

Слово «энергия» (от греч. *energia* — действие, деятельность) нередко употребляется в быту. Так, например, людей, которые могут быстро выполнять работу, называют энергичными, обладающими большой энергией.

Кинетическая энергия

Энергия, которой обладает тело вследствие движения, называется кинетической энергией.

Как и в случае определения энергии вообще, о кинетической энергии можно сказать, что кинетическая энергия — это способность движущегося тела совершать работу.

Найдем кинетическую энергию тела массой m , движущегося со скоростью v . Поскольку кинетическая энергия — это энергия, обусловленная движением, нулевым состоянием для нее являет-

ся то состояние, в котором тело покоится. Найдя работу, необходимую для сообщения телу данной скорости, мы найдем его кинетическую энергию.

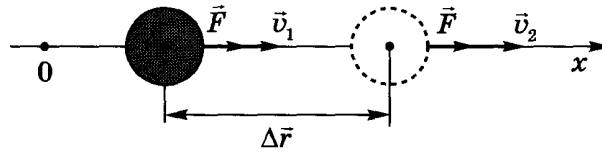


Рис. 1.46

Для этого подсчитаем работу на участке перемещения $\Delta \vec{r}$ при совпадении направлений векторов силы $\vec{F}$ и перемещения $\Delta \vec{r}$ (рис. 1.46). В этом случае работа равна

$$A = F \cdot \Delta x, \quad (1.44)$$

где $\Delta x = \Delta r$.

Для движения точки с ускорением $a = \text{const}$ выражение для перемещения имеет вид:

$$\Delta x = v_1 t + \frac{at^2}{2}, \quad (1.45)$$

где v_1 — начальная скорость.

Подставив в уравнение (1.44) выражение для Δx из (1.45) и воспользовавшись вторым законом Ньютона $F = ma$, получим:

$$A = ma \left(v_1 t + \frac{at^2}{2} \right) = \frac{mat}{2} (2v_1 + at). \quad (1.46)$$

Выразив ускорение через начальную v_1 и конечную v_2 скорости $a = \frac{v_2 - v_1}{t}$ и подставив в (1.46), имеем:

$$A = \frac{m(v_2 - v_1)}{2} \cdot (2v_1 + v_2 - v_1)$$

или

$$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Приравняв теперь начальную скорость к нулю: $v_1 = 0$, получим выражение для *кинетической энергии*:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (1.47)$$

Таким образом, движущееся тело обладает кинетической энергией. Эта энергия равна работе, которую необходимо совершить, чтобы увеличить скорость тела от нуля до значения v .

Из (1.47) следует, что работа силы по перемещению тела из одного положения в другое равна изменению кинетической энергии:

$$A = E_{k_2} - E_{k_1} = \Delta E_k. \quad (1.48)$$

Равенство (1.48) выражает *теорему об изменении кинетической энергии*.

Изменение кинетической энергии тела (материальной точки) за некоторый промежуток времени равно работе, совершенной за это время силой, действующей на тело.

Потенциальная энергия

Потенциальной энергией называется энергия, определяемая взаимным расположением взаимодействующих тел или частей одного и того же тела.

Поскольку энергия определяется как способность тела совершать работу, то потенциальную энергию, естественно, определяют как работу силы, зависящую только от взаимного расположения тел. Таковой является работа силы тяжести $A = mgh_1 - mgh_2 = mgH$ и работа силы упругости:

$$A = \frac{kx_0^2}{2} - \frac{kx^2}{2}.$$

Потенциальной энергией тела, взаимодействующего с Землей, называют величину, равную произведению массы m этого тела на ускорение свободного падения g и на высоту h тела над поверхностью Земли:

$$E_p = mgh. \quad (1.49)$$

Потенциальной энергией упруго деформированного тела называют величину, равную половине произведения коэффициента упругости (жесткости) k тела на квадрат деформации Δl :

$$E_p = \frac{1}{2} k \Delta l^2. \quad (1.50)$$

Работа консервативных сил (тяжести и упругости) с учетом (1.49) и (1.50) выражается следующим образом:

$$A = E_{p_1} - E_{p_2} = -(E_{p_2} - E_{p_1}) = -\Delta E_p. \quad (1.51)$$

Эта формула позволяет дать общее определение потенциальной энергии.

Потенциальной энергией системы называется зависящая от положения тел величина, изменение которой при переходе системы из начального состояния в конечное равно работе внутренних консервативных сил системы, взятой с противоположным знаком.

Знак «минус» в правой части уравнения (1.51) означает, что при совершении работы внутренними силами (например, падение тела на землю под действием силы тяжести в системе «камень — Земля») энергия системы убывает. Работа и изменение потенциальной энергии в системе всегда имеют противоположные знаки.

Поскольку работа определяет лишь изменение потенциальной энергии (см. (1.51)), то физический смысл в механике имеет только изменение энергии. Поэтому выбор нулевого уровня энергии произволен и определяется исключительно соображениями удобства, например, простотой записи соответствующих уравнений.

Закон сохранения механической энергии

Полной механической энергией системы называется сумма ее кинетической и потенциальной энергий:

$$E = E_k + E_p.$$

Она определяется положением тел (потенциальная энергия) и их скоростью (кинетическая энергия).

Согласно теореме о кинетической энергии,

$$E_k - E_{k_1} = A_p + A_{np},$$

где A_p — работа потенциальных сил, A_{np} — работа непотенциальных сил.

В свою очередь, работа потенциальных сил равна разности потенциальной энергии тела в начальном E_{p_1} и конечном E_p состояниях. Учитывая это, получим выражение для *закона изменения механической энергии*:

$$(E_k + E_p) - (E_{k_1} + E_{p_1}) = A_{np}.$$

где левая часть равенства — изменение полной механической энергии, а правая — работа непотенциальных сил.

Итак, *закон изменения механической энергии* гласит:

Изменение механической энергии системы равно работе всех непотенциальных сил.

Механическая система, в которой действуют только потенциальные силы, называется консервативной.

В консервативной системе $A_{np} = 0$. Отсюда следует *закон сохранения механической энергии*:

В замкнутой консервативной системе полная механическая энергия сохраняется (не изменяется со временем):

$$E_k + E_p = E_{k_1} + E_{p_1}$$

Закон сохранения механической энергии выводится из законов механики Ньютона, которые применимы для системы материальных точек (или макрочастиц).

Однако закон сохранения механической энергии справедлив и для системы микрочастиц, где сами законы Ньютона уже не действуют.

Закон сохранения механической энергии является следствием однородности времени.

Однородность времени состоит в том, что при одинаковых начальных условиях протекание физических процессов не зависит от того, в какой момент времени эти условия созданы.

Закон сохранения полной механической энергии означает, что при изменении кинетической энергии в консервативной системе должна меняться и ее потенциальная энергия, так что их сумма остается постоянной. Это означает возможность превращения одного вида энергии в другой.

В соответствии с различными формами движения материи рассматривают различные виды энергии: механическую, внутреннюю (равную сумме кинетической энергии хаотического движения молекул относительно центра масс тела и потенциальной энергии взаимодействия молекул друг с другом), электромагнитную, химическую (которая складывается из кинетической энергии движения электронов и электрической энергии их взаимодействия друг с другом и с атомными ядрами), ядерную и пр. Из сказанного видно, что деление энергии на разные виды достаточно условно.

Явления природы обычно сопровождаются превращением одного вида энергии в другой. Так, например, трение частей различных механизмов приводит к превращению механической энергии в тепло, т. е. во *внутреннюю энергию*. В тепловых двигателях, наоборот, происходит превращение внутренней энергии в механическую; в гальванических элементах химическая энергия превращается в электрическую и т. д.

В настоящее время понятие энергии является одним из основных понятий физики. Это понятие неразрывно связано с представлением о превращении одной формы движения в другую.

Вот как в современной физике формулируется понятие энергии:

Энергия — общая количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи. Энергия не возникает из ничего и не исчезает, она может только переходить из одной формы в другую. Понятие энергии связывает воедино все явления природы.

1.4.6. Мощность

Мощность — физическая величина, измеряемая отношением работы к промежутку времени, в течение которого она произведена.

Другими словами, мощность показывает, какая работа совершается за единицу времени (в СИ — за 1 с).

Мощность определяется формулой:

$$N = \frac{A}{\Delta t}, \quad (1.52)$$

где N — мощность, A — работа, совершенная за время Δt .

Подставив в формулу (1.52) вместо работы A ее выражение $A = F|\Delta\vec{r}|\cos\alpha$, получим:

$$N = \frac{F|\Delta\vec{r}|\cos\alpha}{\Delta t} = Fv\cos\alpha.$$

Мощность равна произведению модулей векторов силы и скорости на косинус угла между этими векторами.

Мощность в системе СИ измеряется в *ваттах* (Вт). Один ватт (1 Вт) — это такая мощность, при которой за 1 с совершается работа 1 Дж: 1 Вт = 1 Дж/с.

Эта единица названа в честь английского изобретателя Дж. Ватта (Уатта), построившего первую паровую машину. Сам Дж. Ватт (1736–1819) пользовался другой единицей мощности — лошадиной силой (л. с.), которую он ввел для того, чтобы можно было сравнивать работоспособности паровой машины и лошади: 1 л. с. = 735,5 Вт.

В технике часто применяются более крупные единицы мощности — киловатт и мегаватт: 1 кВт = 1000 Вт, 1 МВт = 1 000 000 Вт.

1.4.7. Простые механизмы. КПД механизмов

Простыми механизмами называются приспособления, изменяющие величину или направление приложенных к телу сил.

Они применяются для перемещения или подъема больших грузов с помощью небольших усилий. К ним относятся рычаг и его разновидности — блоки (подвижный и неподвижный), ворот, наклонная плоскость и ее разновидности — клин, винт и др.

Рычаг. Правило рычага

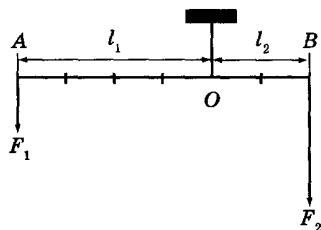


Рис. 1.47

Рычаг представляет собой твердое тело, способное вращаться вокруг неподвижной опоры (рис. 1.47).

Правило рычага гласит:

Рычаг находится в равновесии, если приложенные к нему силы обратно пропорциональны их плечам:

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

Из формулы (1.53), применив к ней свойство пропорции (произведение крайних членов пропорции равно произведению ее средних членов), можно получить такую формулу:

$$F_1 l_1 = F_2 l_2.$$

Но $F_1 l_1 = M_1$ — момент силы, стремящейся повернуть рычаг по часовой стрелке, а $F_2 l_2 = M_2$ — момент силы, стремящейся повернуть рычаг против часовой стрелки. Таким образом, $M_1 = M_2$, что и требовалось доказать.

Рычаг начал применяться людьми в глубокой древности. С его помощью удавалось поднимать тяжелые каменные плиты при постройке пирамид в Древнем Египте. Без рычага это было бы невозможно. Ведь, например, для возведения пирамиды Хеопса, имеющей высоту 147 м, было использовано более двух миллионов каменных глыб, самая меньшая из которых имела массу 2,5 тонн!

В наше время рычаги находят широкое применение как на производстве (например, подъемные краны), так и в быту (ножницы, кусачки, весы).

Неподвижный блок

Действие *неподвижного блока* (рис. 1.48) аналогично действию рычага с равными плечами: $l_1 = l_2 = r$. Приложенная сила F_1 равна нагрузке F_2 , и условие равновесия имеет вид:

$$F_1 = F_2.$$

Неподвижный блок применяют, когда нужно изменить направление силы, не меняя ее величину.

Подвижный блок

Подвижный блок (рис. 1.49) действует аналогично рычагу, плечи которого составляют: $l_2 = l_1 / 2 = r$. При этом условие равновесия имеет вид:

$$F_1 = \frac{F_2}{2},$$

где F_1 — приложенная сила, F_2 — нагрузка. Применение подвижного блока дает выигрыш в силе в два раза.

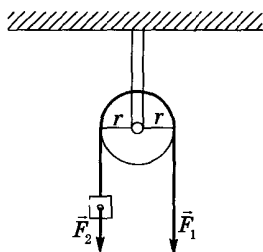


Рис. 1.48

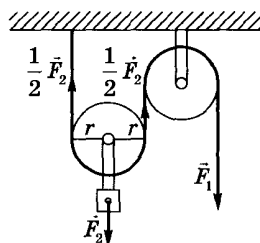


Рис. 1.49

Полиспаст (система блоков)

Обычный полиспаст (рис. 1.50) состоит из n подвижных и n неподвижных блоков. Его применение дает выигрыш в силе в $2n$ раз:

$$F_1 = \frac{F_2}{2n}.$$

Степенной полиспаст (1.51) состоит из n подвижных и одного неподвижного блока. Применение степенного полиспаста дает выигрыш в силе в 2^n раз:

$$F_1 = \frac{F_2}{2^n}.$$

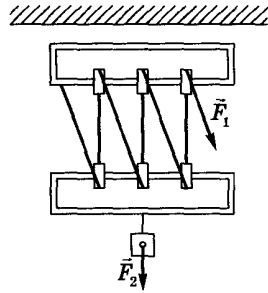


Рис. 1.50

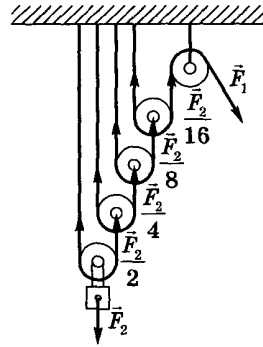


Рис. 1.51

Винт

Винт представляет собой наклонную плоскость, навитую на ось (рис 1.52, а). Условие равновесия сил, действующих на винт (рис 1.52, б), имеет вид:

$$F_1 = \frac{F_2 h}{2\pi r} = F_2 \operatorname{tg} \alpha, \quad F_1 = \frac{F_2 h}{2\pi R},$$

где F_1 — внешняя сила, приложенная к винту и действующая на расстоянии R от его оси; F_2 — сила, действующая в направлении оси винта; h — шаг винта; r — средний радиус резьбы; α — угол наклона резьбы. R — длина рычага (гаечного ключа), вращающего винт с силой F_1 .

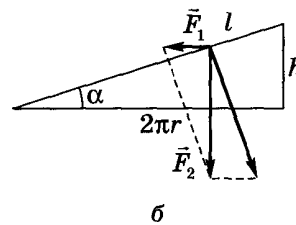
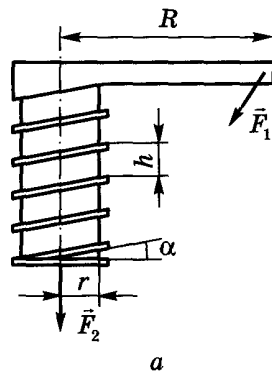


Рис. 1.52

Коэффициент полезного действия

Коэффициент полезного действия (КПД) — отношение полезной работы ко всей затраченной работе.

Коэффициент полезного действия часто выражают в процентах и обозначают греческой буквой η («эта»):

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{з}}} \cdot 100\%,$$

где $A_{\text{п}}$ — полезная работа, $A_{\text{з}}$ — вся затраченная работа.

Полезная работа всегда составляет лишь часть полной работы, которую затрачивает человек, используя тот или иной механизм.

Часть совершенной работы тратится на преодоление сил трения. Поскольку $A_{\text{з}} > A_{\text{п}}$, КПД всегда меньше 1 (или $< 100\%$).

Когда КПД немного меньше 1, можно считать, что затраченная работа примерно равна полезной: $A_{\text{з}} \approx A_{\text{п}}$.

Поскольку каждую из работ в этом равенстве можно выразить в виде произведения соответствующей силы на пройденный путь, то его можно переписать так: $F_1 s_1 \approx F s$.

Отсюда следует, что, *выигрывая с помощью механизма в силе, мы во столько же раз проигрываем в пути, и наоборот*. Этот закон называют *золотым правилом механики*.

Золотое правило механики является приближенным законом, так как в нем не учитывается работа по преодолению трения и силы тяжести частей используемых приспособлений. Тем не менее оно бывает очень полезным при анализе работы любого простого механизма.

Так, например, благодаря этому правилу сразу можно сказать, что рабочему, изображенному на рис. 1.53, при двукратном выигрыше в силе подъема груза на 10 см придется опустить противоположный конец рычага на 20 см.

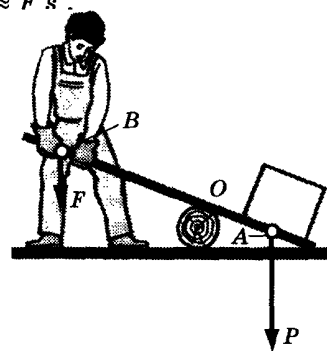


Рис. 1.53

1.4.8. Столкновение тел. Упругий и неупругий удары

Законы сохранения импульса и механической энергии применяются для решения задачи о движении тел после столкновения: по известным импульсам и энергиям до столкновения определяются значения этих величин после столкновения. Рассмотрим случаи упругого и неупругого ударов.

Абсолютно неупругим называется удар, после которого тела образуют единое тело, движущееся с определенной скоростью. Задача о скорости последнего решается с помощью закона сохранения импульса системы тел m_1 и m_2 (если речь идет о двух телах) до и после удара:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{v}.$$

Очевидно, что кинетическая энергия тел при неупругом ударе не сохраняется (например при $\vec{v}_1 = -\vec{v}_2$ и $m_1 = m_2$ она становится равной нулю после удара).

Абсолютно упругим называется удар, при котором сохраняется не только сумма импульсов, но и сумма кинетических энергий ударяющихся тел.

Для абсолютно упругого удара справедливы уравнения

$$\begin{aligned} m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 &= m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2; \\ \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} &= \frac{m_1 (v'_1)^2}{2} + \frac{m_2 (v'_2)^2}{2}, \end{aligned}$$

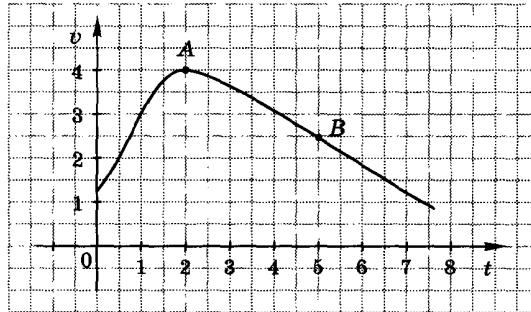
где m_1, m_2 — массы шаров, $\vec{v}_1, \vec{v}_2$ — скорости шаров до удара, $\vec{v}'_1, \vec{v}'_2$ — скорости шаров после удара.

Примеры заданий ЕГЭ по теме 1.4.
«Законы сохранения в механике»

Часть 1

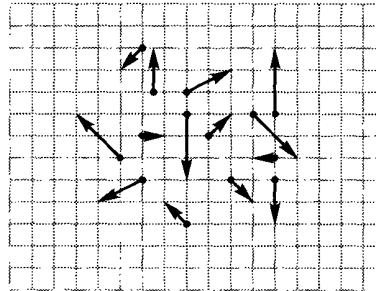
При выполнении заданий уровня А нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

- A1.** По графику зависимости скорости тела от времени, изображенному на рисунке, определите, как изменилось количество движения тела при перемещении из точки *A* в точку *B*.



- | | |
|-------------------------|---------------------------|
| 1) возросло в 1,5 раза | 3) уменьшилось в 1,6 раза |
| 2) уменьшилось в 2 раза | 4) не изменилось |

- A2.** На рисунке стрелками изображены величина и направление импульсов частиц, составляющих изолированную систему. Определите суммарный импульс системы (1 клетка = 1 Н · м).



- | | | | |
|------------|------------|------------|------------|
| 1) 8 Н · м | 2) 0 Н · м | 3) 4 Н · м | 4) 5 Н · м |
|------------|------------|------------|------------|

- A3.** Теннисный мячик отскакивает от стены. Количество движения мячика до соударения со стенкой составило mv . Количество движения, которое мячик передает стенке в момент удара, равно

- | | | | |
|---------|-------------|-----------|-----------|
| 1) mv | 2) $0,5 mv$ | 3) $2 mv$ | 4) $0 mv$ |
|---------|-------------|-----------|-----------|

- A4.** Ракета массой 250 г содержит 350 г взрывчатого вещества. Какова начальная скорость ракеты, если взрыв горючего и выход газов со скоростью 0,3 км/с происходят мгновенно?

- | | | | |
|------------|------------|-------------|------------|
| 1) 500 м/с | 2) 420 м/с | 3) 1000 м/с | 4) 100 м/с |
|------------|------------|-------------|------------|

A5. Тело первый раз подняли на высоту 1 м вертикально вверх. Второй раз его тащили по наклонной плоскости длиной 2 м и подняли на такую же высоту. В каком случае работа по преодолению силы тяжести больше (силой трения и сопротивления воздуха можно пренебречь)?

- 1) в первом случае
- 2) во втором случае
- 3) работа одинакова
- 4) не достаточно данных для ответа на вопрос

1 2 3 4 A5

A6. Тело массой 5 кг подняли на высоту 10 м. При этом была совершена работа

- 1) 50 Дж
- 2) 150 Дж
- 3) 200 Дж
- 4) 500 Дж

1 2 3 4 A6

A7. В результате удара хоккеиста клюшкой по шайбе скорость шайбы удвоилась. Как изменилась ее кинетическая энергия?

- 1) увеличилась в 2 раза
- 2) уменьшилась в 4 раза
- 3) не изменилась
- 4) увеличилась в 4 раза

1 2 3 4 A7

Часть 2

Ответом к заданиям В1—В3 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

В1. Тело массой 1 кг, двигаясь со скоростью 5 м/с, сталкивается со вторым неподвижным телом массой 0,5 кг. Определите скорости тел, считая удар абсолютно неупругим.

В1

В2. Тело приводят в движение кратковременным (0,2 с) ударом с силой 10 Н. Какое количество движения приобретает тело?

В2

В3. Тело массой 70 кг переместили по горизонтальной плоскости на расстояние 5 км. Какова работа сил трения, если коэффициент трения скольжения равен 0,1?

В3

В задании В4 на установление соответствия требуется указать последовательность цифр, соответствующих правильному ответу.

В4. Исходя из определения понятия работы, установите соответствие между величиной и взаимной ориентацией перемещения и приложенной к телу силы (левый столбец) и совершенной работой (правый столбец).

- | | |
|---|------------|
| А) $\Delta \vec{r} \parallel \vec{F}$ | 1) $A = 0$ |
| Б) $\Delta \vec{r} \uparrow \vec{F}$ | 2) $A > 0$ |
| В) $\Delta \vec{r} \perp \vec{F}$ | 3) $A < 0$ |
| Г) $\Delta \vec{r} = 0, \vec{F} \neq 0$ | |

В4

Впишите во вторую строку таблицы номера правильных ответов.

А	Б	В	Г

Часть 3

Полное правильное решение задачи С1 должно включать законы и формулы, применение которых необходимо и достаточно для решения задачи, а также математические преобразования, расчеты с численным ответом и, при необходимости, рисунок, поясняющий решение.

С1. Два шарика массой 50 г и 100 г движутся навстречу друг другу по одной прямой со скоростями 0,5 м/с и 1 м/с соответственно. Определите скорости шариков после абсолютно упругого удара.

1.5. Механические колебания и волны

Колебания — это движения или состояния, повторяющиеся во времени.

Колебания являются очень распространенным видом движения. Это покачивание веток деревьев на ветру, вибрация струн музыкальных инструментов, движение поршня в цилиндре двигателя автомобиля, качание маятника в настенных часах и даже биение нашего сердца, пульсация излучения звезд, внутри которых происходят циклические ядерные реакции, приливы и отливы на Земле, вызываемые движением Луны. Колебания свойственны практически всем явлениям природы.

1.5.1. Механические колебания

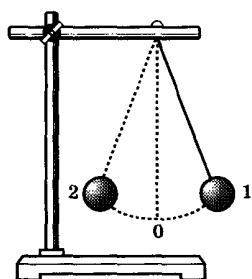


Рис. 1.54

Одним из видов колебаний, особо выделяемых в физике, являются механические колебания.

Рассмотрим колебательное движение на примере двух маятников — нитяного и пружинного.

Нитяной маятник изображен на рис. 1.54. Он представляет собой шарик, прикрепленный к легкой тонкой нити. Если этот шарик сместить в сторону от положения равновесия и отпустить, то он начнет *колебаться*, т. е. совершать колебательные движения, периодически проходя через положение равновесия.

На рис. 1.55 изображен *пружинный маятник*. Он представляет собой груз, способный колебаться под действием силы упругости.

Колебательное движение характеризуют *амплитудой* A , *периодом* T и *частотой колебаний* ν .

1.5.2. Амплитуда колебаний

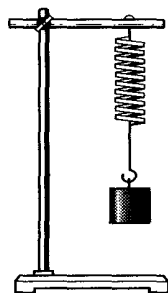


Рис. 1.55

Амплитуда колебаний (лат. *amplitude* — величина) — это наибольшее отклонение колеблющегося тела от положения равновесия.

Для маятника это максимальное расстояние, на которое удаляется шарик от своего положения равновесия (рис. 1.54). Для колебаний с малыми амплитудами за такое расстояние можно принимать как длину дуги $O1$ или $O2$, так и длины этих отрезков.

Амплитуда колебаний измеряется в единицах длины — метрах, сантиметрах и т. д. На графике колебаний амплитуда определяется как максимальная (по модулю) ордината синусоидальной кривой, (см. рис. 1.58).

1.5.3. Период колебаний

Период колебаний — это наименьший промежуток времени, через который система, совершающая колебания, снова возвращается в то же состояние, в котором она находилась в начальный момент времени, выбранный произвольно.

Другими словами, *период колебаний* (T) — это время, за которое совершается одно полное колебание. Например, на рис. 1.56 это время, за которое грузик маятника перемещается из крайней правой точки через точку равновесия O в крайнюю левую точку и обратно через точку O снова в крайнюю правую. За полный период колебаний, таким образом, тело проходит путь, равный четырем амплитудам. Период колебаний измеряется в единицах времени — секундах, минутах и т. д. Период колебаний может быть определен по известному *графику колебаний*, (см. рис. 1.58).

Понятие «период колебаний», строго говоря, справедливо, лишь когда значения колеблющейся величины точно повторяются через определенный промежуток времени, т. е. для *гармонических колебаний*. Однако это понятие применяется также и для случаев приблизительно повторяющихся величин, например, для *затухающих колебаний*.

1.5.4. Частота колебаний

Частота колебаний — это число колебаний, совершаемых за единицу времени, например, за 1 с. Единица частоты в СИ названа *герцем* (Гц) в честь немецкого физика Г. Герца (1857–1894). Если частота колебаний (ν) равна 1 Гц, то это значит, что за каждую секунду совершается одно колебание. Частота и период колебаний связаны соотношениями:

$$T = 1/\nu, \nu = 1/T.$$

В теории колебаний пользуются также понятием *циклической*, или *круговой частоты* ω . Она связана с обычной частотой ν и периодом колебаний T соотношениями:

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

Циклическая частота — это число колебаний, совершаемых за 2π секунд.

1.5.5. Гармонические колебания

Гармонические колебания — это колебания, при которых физическая величина меняется во времени по синусоидальному закону:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi),$$

где x — значение колеблющейся величины в момент времени t , A — амплитуда, ω — круговая частота, φ — начальная фаза колебаний, $(\omega t + \varphi)$ — полная фаза колебаний. При этом величины A , ω и φ — постоянные.

Для механических колебаний колеблющейся величиной x являются, в частности, *смещение* и *скорость*, для электрических колебаний — *напряжение* и *сила тока*.

Гармонические колебания занимают особое место среди всех видов колебаний, т. к. это единственный тип колебаний, форма которых не искажается при прохождении через любую однородную среду, т. е. волны, распространяющиеся от источника гармонических колебаний, также будут гармоническими. Любое негармоническое колебание может быть представлено в виде сумм (интеграла) различных гармонических колебаний (в виде спектра гармонических колебаний).

Превращения энергии при гармонических колебаниях

В процессе колебаний происходит переход потенциальной энергии W_p в кинетическую W_k и наоборот. В положении максимального отклонения от положения равновесия потенциальная энергия максимальна, кинетическая равна нулю. По мере возвращения к положению равновесия скорость колеблющегося тела растёт, а вместе с ней растёт и кинетическая энергия, достигая максимума в положении равновесия. Потенциальная энергия при этом падает до нуля. Дальнейшее движение происходит с уменьшением скорости, которая падает до нуля, когда отклонение достигает своего второго максимума. Потенциальная энергия здесь увеличивается до своего первоначального (максимального) значения (при отсутствии трения). Таким образом, колебания кинетической и потенциальной энергий происходят с удвоенной (по сравнению с колебаниями самого

маятника) частотой и находятся в противофазе (т. е. между ними существует сдвиг фаз, равный π). Полная энергия колебаний W остается неизменной. Для тела, колеблющегося под действием силы упругости, она равна:

$$W = W_p + W_k = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv_x^2}{2} = \frac{kx_m^2}{2} = \frac{mv_m^2}{2},$$

где v_m — максимальная скорость тела (в положении равновесия), $x_m = A$ — амплитуда.

Из-за наличия трения и сопротивления среды свободные колебания затухают: их энергия и амплитуда с течением времени уменьшаются. Поэтому на практике чаще используют не свободные, а вынужденные колебания.

1.5.6. Свободные колебания

Свободные колебания (или собственные колебания) — это колебания колебательной системы, совершаемые только благодаря первоначально сообщенной энергии (потенциальной или кинетической) при отсутствии внешних воздействий.

Потенциальная или кинетическая энергия может быть сообщена, например, в механических системах через начальное смещение или начальную скорость.

Свободно колеблющиеся тела всегда взаимодействуют с другими телами и вместе с ними образуют систему тел, которая называется *колебательной системой*.

Например, пружина, шарик и вертикальная стойка, к которой прикреплен верхний конец пружины (см. рис. 1.57), входят в колебательную систему. Здесь шарик свободно скользит по струне (силы трения пренебрежимо малы). Если отвести шарик вправо и предоставить его самому себе, он будет совершать свободные колебания около положения равновесия (точки O) вследствие действия силы упругости пружины, направленной к положению равновесия.

Другим классическим примером механической колебательной системы является *математический маятник* (см. рис. 1.56). В данном случае шарик совершает свободные колебания под действием двух сил: силы тяжести и силы упругости нити (в колебательную систему входит также Земля). Их равнодействующая направлена к положению равновесия. Силы, действующие между телами колебательной системы, называются *внутренними силами*. *Внешними силами* называются силы, действующие на систему со стороны тел, не входящих в нее. С этой точки зрения свободные колебания можно определить как колебания в системе под действием внутренних сил после того, как система выведена из положения равновесия.

Условиями возникновения свободных колебаний являются:

- 1) возникновение в них силы, возвращающей систему в положение устойчивого равновесия, после того как ее вывели из этого состояния;
- 2) отсутствие трения в системе.

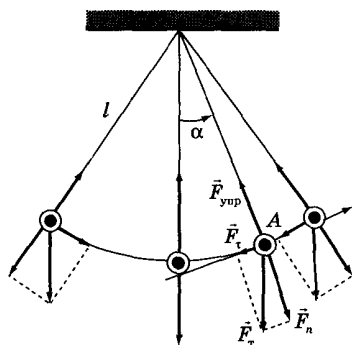


Рис. 1.56

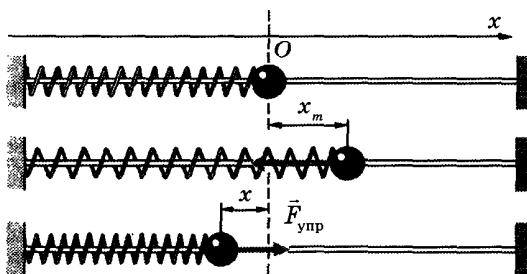


Рис. 1.57

Динамика свободных колебаний

Колебания тела под действием сил упругости. Уравнение колебательного движения тела под действием силы упругости $F_{\text{упр}}$ (рис. 1.57) может быть получено с учетом второго закона Ньютона ($F = ma$) и закона Гука ($F_{\text{упр}} = -kx$), где m — масса шарика, a — ускорение, приобретаемое шариком под действием силы упругости, k — коэффициент жесткости пружины, x — смещение тела от положения равновесия (оба уравнения записаны в проекции на горизонтальную ось Ox). Приравняв правые части этих уравнений и учитывая, что ускорение a — это вторая производная от координаты x (смещения), получим:

$$x'' = -\frac{k}{m}x. \quad (1.54)$$

Это дифференциальное уравнение движения тела, колеблющегося под действием силы упругости: вторая производная координаты по времени (ускорение тела) прямо пропорциональна его координате, взятой с противоположным знаком.

Колебания математического маятника. Для получения уравнения колебания математического маятника (см. рис. 1.56) необходимо разложить силу тяжести $F_g = mg$ на нормальную F_n (направленную вдоль нити) и тангенциальную F_t (касательную к траектории движения шарика — окружности) составляющие. Нормальная составляющая силы тяжести F_n и сила упругости нити $F_{\text{упр}}$ в сумме сообщают маятнику центростремительное ускорение, не влияющее на величину скорости, а лишь меняющее ее направление, а тангенциальная составляющая F_t является той силой, которая возвращает шарик в положение равновесия и заставляет его совершать колебательные движения. Используя, как и в предыдущем случае, закон Ньютона для тангенциального ускорения $ma_t = F_t$ и учитывая, что $F_t = -mg \sin \alpha$, получим:

$$a_t = -g \sin \alpha.$$

Знак минус появился потому, что сила и угол отклонения от положения равновесия α имеют противоположные знаки. Для малых углов отклонения $\sin \alpha \approx \alpha$. В свою очередь, $\alpha = s/l$, где s — дуга OA , l — длина нити. Учитывая, что $a_t = s''$, окончательно получим:

$$s'' = -\frac{g}{l}s. \quad (1.55)$$

Вид уравнения (1.55) аналогичен уравнению (1.54). Только здесь параметрами системы являются длина нити и ускорение свободного падения, а не жесткость пружины и масса шарика; роль координаты играет длина дуги (т. е. пройденный путь, как и в первом случае).

Таким образом, свободные колебания описываются уравнениями одного вида (подчиняются одним и тем же законам) независимо от физической природы сил, вызывающих эти колебания.

Решением уравнений (1.54) и (1.55) является функция вида:

$$x = x_m \cos \omega_0 t \text{ (или } x = x_m \sin \omega_0 t \text{)}. \quad (1.56)$$

То есть координата тела, совершающего свободные колебания, меняется с течением времени по закону косинуса или синуса, и, следовательно, эти колебания являются гармоническими (рис. 1.58).

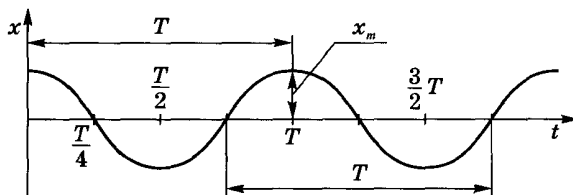


Рис. 1.58

В уравнении (1.56) x_m — амплитуда колебания, ω_0 — собственная циклическая (круговая) частота колебаний.

Циклическая частота и период свободных гармонических колебаний определяются свойствами системы. Так, для колебаний тела, прикрепленного к пружине, справедливы соотношения:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Собственная частота тем больше, чем больше жесткость пружины или меньше масса груза, что вполне подтверждается опытом.

Для математического маятника выполняются равенства:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}; \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Эта формула была впервые получена и проверена на опыте голландским ученым Гюйгенсом (современником Ньютона).

Период колебаний возрастает с увеличением длины маятника и не зависит от его массы.

Следует особо обратить внимание на то, что гармонические колебания являются строго периодическими (т. к. подчиняются закону синуса или косинуса) и даже для математического маятника, являющегося идеализацией реального (физического) маятника, возможны только при малых углах колебания. Если углы отклонения велики, смещение груза не будет пропорционально углу отклонения (синусу угла) и ускорение не будет пропорционально смещению.

Скорость и ускорение тела, совершающего свободные колебания, также будут совершать гармонические колебания. Беря производную по времени функции (1.56), получим выражение для скорости:

$$v = -v_m \sin \omega_0 t = -v_m x_m \cos(\omega_0 t + \pi/2), \quad (1.57)$$

где $v_m = \omega_0 x_m$ — амплитуда скорости.

Аналогично выражение для ускорения a получим, дифференцируя (1.57):

$$a = -a_m \cos \omega_0 t,$$

где $a_m = \omega_0^2 x_m$ — амплитуда ускорения. Таким образом, амплитуда скорости гармонических колебаний пропорциональна частоте, а амплитуда ускорения — квадрату частоты колебания.

1.5.7. Фаза колебаний

Фаза колебаний — это аргумент периодически изменяющейся функции, описывающей колебательный или волновой процесс.

Для гармонических колебаний

$$X(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (1.58)$$

где $\varphi = \omega t + \varphi_0$ — фаза колебания, A — амплитуда, ω — круговая частота, t — время, φ_0 — начальная (фиксированная) фаза колебания: в момент времени $t = 0$ $\varphi = \varphi_0$. Фаза выражается в **радианах**.

Фаза гармонического колебания при постоянной амплитуде определяет не только координату колеблющегося тела в любой момент времени, но и скорость и ускорение, которые тоже изменяются по гармоническому закону (скорость и ускорение гармонических колебаний — это первая и вторая производные по времени функции (1.58), которые, как известно, снова дают синус и косинус). Поэтому можно сказать, что *фаза определяет при заданной амплитуде состояние колебательной системы в любой момент времени*.

Два колебания с одинаковыми амплитудами и частотами могут отличаться друг от друга фазами. Так как $\omega = 2\pi/T$, то

$$\varphi - \varphi_0 = \omega t = 2\pi t/T.$$

Отношение t/T показывает, какая часть периода прошла от момента начала колебаний. Любому значению времени, выраженному в долях периода, соответствует значение фазы, выраженной в радианах (рис. 1.59). Сплошная кривая на рис. 1.59 — это зависимость координаты от времени и одновременно от фазы колебаний (верхние и нижние значения на оси абсцисс соответственно) для точки, совершающей гармонические колебания по закону:

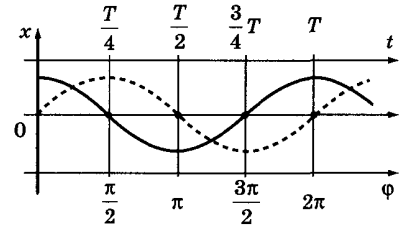


Рис. 1.59

$$x = x_m \cos \omega_0 t. \quad (1.59)$$

Здесь начальная фаза равна нулю $\varphi_0 = 0$. В начальный момент времени амплитуда максимальна. Это соответствует случаю колебаний тела, прикрепленного к пружине (или маятника), которое в начальный момент времени отвели от положения равновесия и отпустили. Описание колебаний, начинающихся из положения равновесия (например, при кратковременном толчке покоящегося шарика), удобнее вести с помощью функции синуса:

$$x = x_m \sin \omega_0 t. \quad (1.60)$$

Как известно, $\cos \varphi = \sin(\varphi + \pi/2)$, поэтому колебания, описываемые уравнениями (1.59) и (1.60), отличаются друг от друга только фазами. Разность фаз, или сдвиг фаз, составляет $\pi/2$. Чтобы определить сдвиг фаз, нужно колеблющуюся величину выразить через одну и ту же тригонометрическую функцию — косинус или синус. Пунктирная кривая на рис. 1.59 (это график уравнения (1.60)) сдвинута относительно сплошной на $\pi/2$.

1.5.8. Затухающие колебания

Затухание колебаний — это уменьшение амплитуды колебаний с течением времени, обусловленное потерей энергии колебательной системой. Свободные колебания всегда являются затухающими колебаниями.

Потери энергии колебаний в механических системах связаны с превращением ее в теплоту вследствие трения и сопротивления окружающей среды.

Так, механическая энергия колебаний маятника (см. рис. 1.56) расходуется на преодоление сил трения и сопротивления воздуха, переходя при этом во внутреннюю энергию. Амплитуда колебаний постепенно уменьшается, и через некоторое время колебания прекращаются. Такие колебания называются *затухающими* (рис. 1.60).

Чем больше силы сопротивления движению, тем быстрее прекращаются колебания. Например, в воде колебания прекращаются быстрее, чем в воздухе (рис. 1.60, а, б).

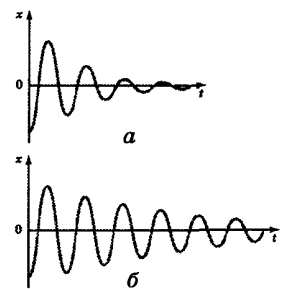


Рис. 1.60

1.5.9. Вынужденные колебания

Колебания, совершаемые телом под действием внешней периодически изменяющейся силы, называются *вынужденными колебаниями*.

Внешняя периодически изменяющаяся сила называется *вынуждающей силой*.

Примерами вынужденных колебаний являются тряска автомобиля, движущегося по неровной дороге, вибрации кормовой части судна, связанные с работой гребного винта, движение качелей, которые кто-то периодически подталкивает.

Особый интерес представляют вынужденные колебания в системе, способной совершать свободные колебания, т. е. обладающие собственной частотой колебаний. Они интересны тем, что их амплитуда может возрасти при соответствующем изменении частоты вынуждающей силы. Например, после начала раскачивания качелей (являющихся маятником) амплитуда вынужденных колебаний будет возрастать, т. е. амплитуда каждого последующего колебания будет больше, чем предыдущего (если раскачивать качели в такт). Увеличение амплитуды прекратится тогда, когда потеря энергии на преодоление сил трения станет равна энергии, получаемой качелями извне (за счет работы вынуждающей силы).

В большинстве случаев постоянная частота вынужденных колебаний тоже устанавливается не сразу, а спустя некоторое время после их начала.

Когда амплитуда и частота вынужденных колебаний перестают меняться, говорят, что *колебания установились*.

Частота установившихся вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы.

В отличие от свободных колебаний, являющихся затухающими, *вынужденные колебания — незатухающие*. Они происходят до тех пор, пока действует вынуждающая сила.

1.5.10. Резонанс

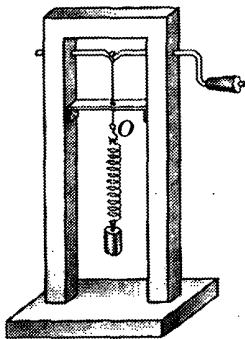


Рис. 1.61

Явление резонанса заключается в том, что амплитуда установившихся вынужденных колебаний достигает наибольшего значения, когда частота вынуждающей силы равна собственной частоте колебательной системы.

Отличительной особенностью вынужденных колебаний является зависимость их амплитуды от частоты изменения внешней силы. Для изучения этой зависимости можно воспользоваться установкой, изображенной на рис. 1.61. На кривошипе с ручкой укреплен пружинный маятник. При равномерном вращении ручки на груз через пружину передается действие периодически изменяющейся силы. Изменяясь с частотой, равной частоте вращения ручки, эта сила заставит груз совершать вынужденные колебания. Если вращать ручку кривошипа очень медленно, то груз вместе с пружиной будет перемещаться вверх и вниз так же, как и точка подвеса O . Амплитуда вынужденных колебаний при этом будет невелика. При более быстром вращении груз начнет колебаться сильнее, и при частоте вращения, равной собственной частоте пружинного маятника ($\omega = \omega_{\text{соб}}$), амплитуда его колебаний достигнет максимума. При дальнейшем увеличении частоты вращения ручки амплитуда вынужденных колебаний груза опять станет меньше. Очень быстрое вращение ручки оставит груз почти неподвижным: из-за своей инертности пружинный маятник, не успевая следовать изменениям внешней силы, будет просто дрожать на месте.

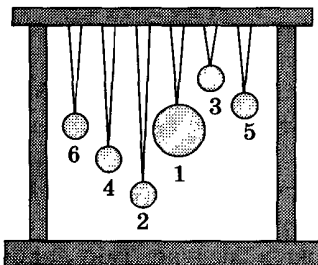


Рис. 1.62

Явление резонанса можно продемонстрировать и с нитяными маятниками. Подвесим на рейке массивный шар 1 и несколько маятников, имеющих нити разной длины (рис. 1.62). Каждый из этих маятников имеет свою собственную частоту колебаний, которую можно определить, зная длину нити и ускорение свободного падения.

Теперь, не трогая легких маятников, выведем шар 1 из положения равновесия и отпустим. Качания массивного шара вызовут периодические колебания рейки, вследствие которых на каждый из легких маятников начнет действовать периодически изменяющаяся сила упругости. Частота ее изменений будет равна частоте колебаний шара. Под действием этой силы маятники начнут совершать вынужденные колебания. При этом маятники 2 и 3 останутся почти неподвижными. Маятники 4 и 5 будут колебаться с немного большей амплитудой. А у маятника 6, имеющего такую же длину нити и, следовательно, собственную частоту колебаний, как у шара 1, амплитуда окажется максимальной. Это и есть резонанс.

Резонанс возникает из-за того, что внешняя сила, действуя в такт со свободными колебаниями тела, все время совершает положительную работу. За счет этой работы энергия колеблющегося тела увеличивается, и амплитуда колебаний возрастает.

Резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при $\omega = \omega_{\text{соб}}$ называется резонансом.

Изменение амплитуды колебаний в зависимости от частоты при одной и той же амплитуде внешней силы, но при различных коэффициентах трения μ , изображено на рис. 1.63, где кривой 1 соответствует минимальное значение μ , кривой 3 — максимальное.

Из рис. 1.63 видно, что о резонансе имеет смысл говорить, если затухание свободных колебаний в системе мало. Иначе амплитуда вынужденных колебаний при $\omega = \omega_0$ мало отличается от амплитуды колебаний при других частотах.

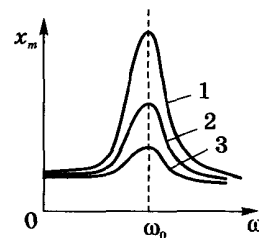


Рис. 1.63

Явление резонанса в жизни и в технике

Явление резонанса может играть как положительную, так и отрицательную роль.

Известно, например, что тяжелый «язык» большого колокола может раскачать даже ребенок, но при условии, что будет тянуть за веревку в такт со свободными колебаниями «языка».

На применении резонанса основано действие язычкового частотомера. Этот прибор представляет собой набор укрепленных на общем основании упругих пластин различной длины. Собственная частота каждой пластины известна. При контакте частотомера с колебательной системой, частоту которой нужно определить, с наибольшей амплитудой начинает колебаться та пластина, частота которой совпадает с измеряемой частотой. Заметив, какая пластина вошла в резонанс, мы определим частоту колебаний системы.

С явлением резонанса можно встретиться и тогда, когда это совершенно нежелательно. Так, например, в 1750 г. близ города Анжера во Франции через цепной мост длиной 102 м шел в ногу отряд солдат. Частота их шагов совпала с частотой свободных колебаний моста. Из-за этого размахи колебаний моста резко увеличились (наступил резонанс), и цепи оборвались. Мост обрушился в реку.

В 1830 г. по той же причине обрушился подвесной мост около Манчестера в Англии, когда по нему маршировал военный отряд.

В 1906 г. из-за резонанса разрушился Египетский мост в Петербурге, по которому проходил кавалерийский эскадрон.

Теперь для предотвращения подобных случаев войсковым частям при переходе через мост приказывают «сбить ногу», идти не строевым, а вольным шагом.

Если же через мост проезжает поезд, то, чтобы избежать резонанса, он проходит его либо на медленном ходу, либо, наоборот, на максимальной скорости (чтобы частота ударов колес о стыки рельсов не оказалась равной собственной частоте моста).

Собственной частотой обладает и сам вагон (колеблющийся на своих рессорах). Когда частота ударов его колес на стыках рельсов оказывается ей равной, вагон начинает сильно раскачиваться.

Явление резонанса встречается не только на суше, но и в море, и даже в воздухе. Так, например, при некоторых частотах гребного вала в резонанс входили целые корабли. А на заре развития авиации некоторые авиационные двигатели вызвали столь сильные резонансные колебания частей самолета, что он разваливался в воздухе.

1.5.11. Упругие волны (механические волны)

Возмущения, распространяющиеся в пространстве, удаляясь от места их возникновения, называют *волнами*.

Упругие волны — это возмущения, распространяющиеся в твердой, жидкой и газообразной средах благодаря действию в них сил упругости.

Сами эти среды называют *упругими*. Возмущение упругой среды — это любое отклонение частиц этой среды от своего положения равновесия.

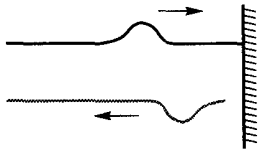


Рис. 1.64

Возьмем, например, длинную веревку (или резиновую трубку) и прикрепим один из ее концов к стене. Туго натянув веревку, резким боковым движением руки создадим на ее незакрепленном конце кратковременное возмущение. Мы увидим, что это возмущение побежит вдоль веревки и, дойдя до стены, отразится назад (рис. 1.64).

Начальное возмущение среды, приводящее к появлению в ней волны, вызывается действием в ней какого-нибудь инородного тела, которое называют *источником волны*. Это может быть рука человека, ударившего по веревке, камешек, упавший в воду, и т. д.

Если действие источника носит кратковременный характер, то в среде возникает так называемая *одиночная волна* (см. рис. 1.64). Если же источник волны совершает длительное колебательное движение, то волны в среде начинают идти одна за другой. Подобную картину можно увидеть, поместив над ванной с водой вибрирующую пластину, имеющую наконечник, опущенный в воду.

Необходимым условием возникновения упругой волны является появление в момент возникновения возмущения сил упругости, препятствующих этому возмущению. Эти силы стремятся сблизить соседние частицы среды, если они расходятся, и отдалить их, когда они сближаются. Действуя на все более удаленные от источника частицы среды, силы упругости начинают выводить их из положения равновесия. Постепенно все частицы среды одна за другой вовлекаются в колебательное движение. Распространение этих колебаний и проявляется в виде волны.

В любой упругой среде одновременно существуют два вида движения: колебания частиц среды и распространение возмущения. Волна, в которой частицы среды колеблются вдоль направления ее распространения, называется *продольной*, а волна, в которой частицы среды колеблются поперек направления ее распространения, называется *поперечной*.

Продольная волна

Волна, в которой колебания происходят вдоль направления распространения волны, называется *продольной*.

В упругой продольной волне возмущения представляют собой сжатия и разрежения среды. Деформация сжатия сопровождается возникновением сил упругости в любой среде. Поэтому продольные волны могут распространяться во всех средах (и в жидких, и в твердых, и в газообразных) (рис. 1.65).

Пример распространения продольной упругой волны изображен на рис. 1.66. По левому концу длинной пружины, подвешенной на нитях, ударяют рукой. От удара несколько витков сближа-

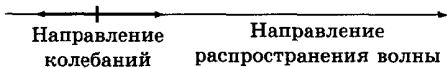


Рис. 1.65

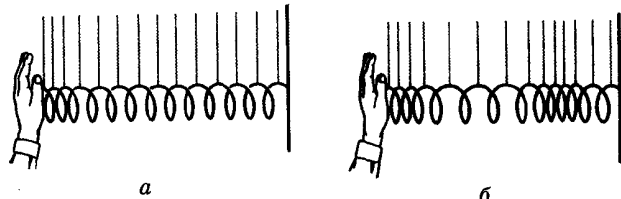


Рис. 1.66

ются, возникает сила упругости, под действием которой эти витки начинают расходиться. Продолжая движение по инерции, они будут продолжать расходиться, минуя положение равновесия и образуя в этом месте разрежение (рис. 1.66 б). При ритмичном воздействии витки на конце пружины будут то сближаться, то отходить друг от друга, т. е. колебаться возле своего положения равновесия. Эти колебания постепенно передадутся от витка к витку вдоль всей пружины. По пружине распространятся сгущения и разрежения витков, или *упругая волна*.

Поперечная волна

Волны, в которых колебания происходят перпендикулярно направлению их распространения, называются поперечными.

В поперечной упругой волне возмущения представляют собой смещения (сдвиги) одних слоев среды относительно других (рис. 1.67). Деформация сдвига приводит к появлению сил упругости только в твердых телах: сдвиг слоев в газах и жидкостях возникновением сил упругости не сопровождается. Поэтому поперечные волны могут распространяться только в твердых телах (см. рис. 1.64).

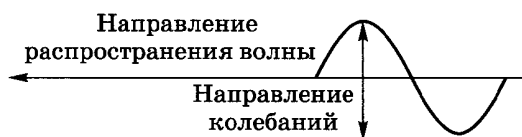


Рис. 1.67

Плоская волна

Плоская волна — это волна, у которой направление распространения одинаково во всех точках пространства.

В такой волне амплитуда не меняется со временем (по мере удаления от источника). Получить такую волну можно, если большую пластину, находящуюся в сплошной однородной упругой среде, заставить колебаться перпендикулярно плоскости. Тогда все точки среды, примыкающей к пластине, будут колебаться с одинаковыми амплитудами и одинаковыми фазами. Распространяться эти колебания будут в виде волн в направлении нормали к пластине, причем все частицы среды, лежащие в плоскостях, параллельных пластине, будут колебаться с одинаковыми фазами.

Геометрическое место точек, в которых фаза колебаний имеет одно и то же значение, называется *волновой поверхностью*, или *фронтом волны*.

С этой точки зрения плоской волне можно дать и следующее определение.

Волна называется плоской, если ее волновые поверхности представляют совокупность плоскостей, параллельных друг другу (рис. 1.68).

Линия, нормальная к волновой поверхности, называется *лучом*. Вдоль лучей происходит перенос энергии волны. Для плоских волн лучи — это параллельные прямые.

Уравнение плоской синусоидальной волны имеет вид:

$$s = s_m \sin[\omega(t - x/v) + \varphi_0],$$

где s — смещение колеблющейся точки, s_m — амплитуда колебаний, ω — циклическая частота, t — время, x — текущая координата, v — скорость распространения колебаний или скорость волны, φ_0 — начальная фаза колебаний.

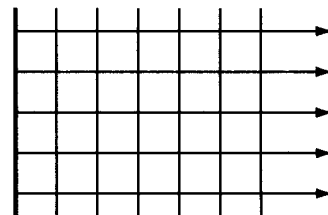


Рис. 1.68

Сферическая волна

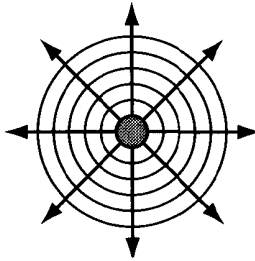


Рис. 1.69

Сферической называется волна, волновые поверхности которой имеют вид концентрических сфер. Центр этих сфер называется центром волны.

Лучи в такой волне направлены вдоль радиусов, расходящихся от центра волны (рис. 1.69). На рис. 1.69 источником волны является пульсирующая сфера.

Амплитуда колебаний частиц в сферической волне обязательно убывает по мере удаления от источника. Энергия, излучаемая источником, равномерно распределяется по поверхности сферы, радиус которой непрерывно увеличивается по мере распространения волны. Уравнение сферической волны имеет вид:

$$s = \frac{a_0}{r} \sin \left[\omega \left(t - \frac{r}{v} \right) + \varphi_0 \right].$$

В отличие от плоской волны, где $s_m = A$ — амплитуда волны постоянная величина, в сферической волне она убывает с расстоянием от центра волны.

1.5.12. Длина и скорость волны

Любая волна распространяется с некоторой скоростью. Под *скоростью волны* понимают скорость распространения возмущения. Например, удар по торцу стального стержня вызывает в нем местное сжатие, которое затем распространяется вдоль стержня со скоростью около 5 км/с.

Скорость волны определяется свойствами среды, в которой эта волна распространяется. При переходе волны из одной среды в другую ее скорость изменяется.

Длиной волны называется расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний в ней.

Поскольку скорость волны — величина постоянная (для данной среды), то пройденное волной расстояние равно произведению скорости на время ее распространения. Таким образом, чтобы найти длину волны, надо скорость волны умножить на период колебаний в ней:

$$\lambda = vT, \quad (1.61)$$

где v — скорость волны, T — период колебаний в волне, λ (греческая буква лямбда) — длина волны.

Формула (1.61) выражает связь длины волны с ее скоростью и периодом. Учитывая, что период колебаний в волне обратно пропорционален частоте ν , т. е. $T = 1/\nu$, можно получить формулу, выражающую связь длины волны с ее скоростью и частотой:

$$\lambda = vT = v \frac{1}{\nu},$$

откуда

$$v = \lambda \nu.$$

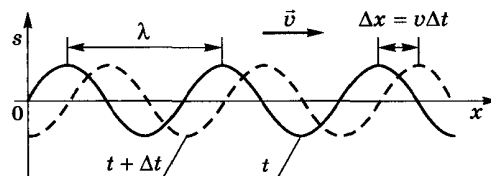


Рис. 1.70

Полученная формула показывает, что скорость волны равна произведению длины волны на частоту колебаний в ней.

Длина волны — это пространственный период волны. На графике волны (рис. 1.70) длина волны определяется как расстояние между двумя ближайшими точками гармонической *бегущей* волны, находящимися в одинаковой фазе колебаний. Рис. 1.70 — это как бы мгновенные фотографии волн в колеблющейся упругой среде в моменты времени t и $t + \Delta t$. Ось x совпадает с направлением распространения волны, на оси ординат отложены смещения s колеблющихся частиц среды.

Частота колебаний в волне совпадает с частотой колебаний источника, т. к. колебания частиц в среде являются вынужденными и не зависят от свойств среды, в которой распространяется волна. При переходе волны из одной среды в другую ее частота не изменяется, меняются лишь скорость и длина волны.

1.5.13. Звук (звуковые волны)

Звук (или звуковые волны) — это распространяющиеся в виде волн колебательные движения частиц упругой среды: газообразной, жидкой или твердой.

Под словом «звук» понимают также ощущения, вызываемые действием звуковых волн на специальный орган чувств (орган слуха или, проще говоря, ухо) человека и животных: человек слышит звук частотой от 16 Гц до 20 кГц. Частоты этого диапазона называют звуковыми.

Итак, физическое понятие звука подразумевает упругие волны не только тех частот, которые человек слышит, но также более низкие и более высокие частоты. Первые называются *инфразвуком*, вторые — *ультразвуком* (рис. 1.71). Самые высокочастотные упругие волны в диапазоне 10^9 – 10^{13} Гц относятся к гиперзвуку.

«Услышать» звуковые волны можно, заставив дрожать зажатую в тисках длинную стальную линейку. Однако если над тисками будет выступать большая часть линейки (рис. 1.72, а), то, вызвав ее колебания, мы не услышим порождаемые ею волны. Но если укоротить выступающую часть линейки и тем самым увеличить частоту ее колебаний, то линейка начнет звучать.



Рис. 1.71

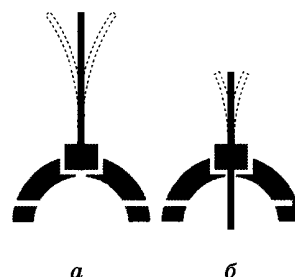


Рис. 1.72

Источники звука

Любое тело, колеблющееся со звуковой частотой, является источником звука, так как в окружающей среде возникают распространяющиеся от него волны.

Существуют как естественные, так и искусственные источники звука. Один из искусственных источников звука, камертон (рис. 1.73), был изобретен в 1711 г. английским музыкантом Дж. Шором для настройки музыкальных инструментов.

Камертон представляет собой изогнутый (в виде двух ветвей) металлический стержень с держателем посередине. Ударив резиновым молоточком по одной из ветвей камертона, мы услышим определенный звук. Ветви камертона начинают вибрировать, создавая вокруг себя попеременные сжатия и разрежения воздуха (рис. 1.73, а). Распространяясь по воздуху, эти возмущения образуют звуковую волну.

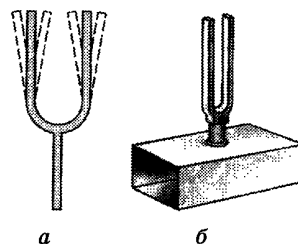


Рис. 1.73

Стандартная частота колебаний камертона — 440 Гц. Это означает, что за 1 с его ветви совершают 440 колебаний. На глаз они незаметны. Если, однако, прикоснуться к звучащему камертону рукой, то можно почувствовать его вибрацию. Для определения характера колебаний камертона к одной из его ветвей следует прикрепить иглу. Заставив камертон звучать, проведем соединенной с ним иглой по поверхности закопченной стеклянной пластинки. На пластинке появится след в форме синусоиды (рис. 1.74).

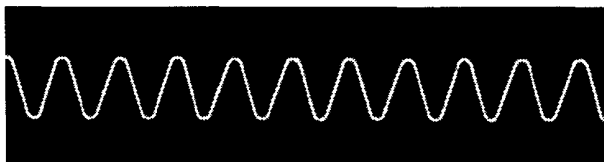


Рис. 1.74

Для усиления звука, создаваемого камертоном, его держатель укрепляют на деревянном ящике, открытом с одной стороны (см. рис. 1.73, б). Этот ящик называют *резонатором*. При колебаниях камертона вибрация ящика передается находящемуся в нем воздуху. Из-за резонанса, возникающего при правильно подобранных размерах ящика, амплитуда вынужденных колебаний воздуха возрастает, и звук усиливается. Его усилению способствует и увеличение площади излучающей поверхности, которое имеет место при соединении камертона с ящиком.

Нечто подобное происходит и в таких музыкальных инструментах, как гитара, скрипка. Сами по себе струны этих инструментов создают слабый звук. Громким он становится благодаря наличию у них корпуса определенной формы с отверстием, через которое могут выходить звуковые волны.

Источниками звука могут быть не только колеблющиеся твердые тела, но и некоторые явления, вызывающие колебания давления в окружающей среде (взрывы, полет пуль, завывания ветра и т. д.). Наиболее ярким примером подобных явлений является молния. Во время грозы температура в канале молнии увеличивается до 30 000 °С. Давление резко возрастает, и в воздухе возникает ударная волна, постепенно переходящая в звуковые колебания (с типичной частотой 60 Гц), распространяющиеся в виде раскатов грома.

Интересным источником звука является дисковая сирена, изобретенная немецким физиком Т. Зеебеком (1770–1831). Она представляет собой соединенный с электродвигателем диск с отверстиями, расположенными перед сильной струей воздуха. При вращении диска поток воздуха, проходящего через отверстия, периодически прерывается, в результате чего возникает резкий характерный звук. Частота этого звука определяется по формуле $\nu = nk$, где n — частота вращения диска, k — число отверстий в нем.

Используя сирену с несколькими рядами отверстий и регулируемой частотой вращения диска, можно получить звуки разной частоты. Частотный диапазон сирен, применяемых на практике, составляет обычно от 200 Гц до 100 кГц и выше.

Свое название эти источники звука получили по имени полуптиц-полууженщин, которые, согласно древнегреческим мифам, завлекали своим пением мореходов на кораблях, и те разбивались о прибрежные скалы.

Приемники звука

Приемники звука служат для восприятия звуковой энергии и преобразования ее в другие виды энергии. К приемникам звука относятся, в частности, слуховой аппарат человека и животных. В технике для приема звука применяют главным образом микрофоны (в воздухе), гидрофоны (в воде) и геофоны (в земной коре).

В газах и жидкостях звуковые волны распространяются в виде продольных волн сжатия и разрежения. Сжатия и разрежения среды, возникающие вследствие колебаний источника звука (колокольчика, струны, камертона, мембраны телефона, голосовых связок и т. д.), через некоторое время достигают человеческого уха, заставляя барабанную перепонку уха совершать вынуж-

денные колебания с частотой, соответствующей частоте источника звука. Дрожания барабанной перепонки передаются посредством системы косточек окончанием слухового нерва, раздражают их и тем вызывают у человека определенные слуховые ощущения. Животные также реагируют на упругие колебания, правда, в качестве звука они воспринимают волны других частот.

Человеческое ухо — очень чувствительный прибор. Воспринимать звук мы начинаем уже тогда, когда амплитуда колебаний частиц воздуха в волне оказывается равной всего лишь радиусу атома! С возрастом из-за потери эластичности барабанной перепонки верхняя граница воспринимаемых человеком частот постепенно снижается. Лишь молодые люди способны слышать звуки с частотой 20 кГц. В среднем и тем более в старшем возрасте как мужчины, так и женщины перестают воспринимать звуковые волны, частота которых превышает 12–14 кГц.

Ухудшается слух людей и в результате длительного воздействия громких звуков. Работа вблизи мощных самолетов, в очень шумных заводских цехах, частое посещение дискотек и чрезмерное увлечение аудиоплеерами негативно влияют на остроту восприятия звуков (особенно высокочастотных) и в некоторых случаях могут привести к потере слуха.

Громкость звука

Громкость звука — это субъективное качество слухового ощущения, позволяющее располагать звуки по шкале от тихих до громких.

Слуховые ощущения, которые у нас вызывают различные звуки, во многом зависят от амплитуды звуковой волны и ее частоты, которые являются физическими характеристиками звуковой волны. Этим физическим характеристикам соответствуют определенные физиологические характеристики, связанные с нашим восприятием звука.

Громкость звука определяется амплитудой: чем больше амплитуда колебаний в звуковой волне, тем больше громкость.

Так, когда колебания звучащего камертона затухают, вместе с амплитудой уменьшается и громкость звука. И наоборот, ударив по камертону сильнее и тем самым увеличив амплитуду его колебаний, мы вызовем и более громкий звук.

Громкость звука зависит также от того, насколько чувствительно наше ухо к данному звуку. Наибольшей чувствительностью человеческое ухо обладает к звуковым волнам с частотой 1–5 кГц. Поэтому, например, высокий женский голос с частотой 1000 Гц будет восприниматься нашим ухом как более громкий, чем низкий мужской голос с частотой 200 Гц, даже если амплитуды колебаний голосовых связок у них одинаковы.

Громкость звука зависит также от его длительности, интенсивности и от индивидуальных особенностей слушателя.

Интенсивностью звука называется энергия, переносимая звуковой волной за 1 с через поверхность площадью 1 м². Оказалось, что интенсивность самых громких звуков (при которых возникает ощущение боли) превышает интенсивность самых слабых звуков, доступных восприятию человека, в 10 триллионов раз! В этом смысле человеческое ухо оказывается намного более совершенным устройством, чем любой из обычных измерительных приборов. Ни одним из них столь широкий диапазон значений измерить невозможно (у приборов диапазон измерений редко превосходит 100).

Единицу громкости называют *соном*. Громкостью в 1 сон обладает приглушенный разговор. Тиканье часов характеризуется громкостью около 0,1 сона, обычный разговор — 2 сона, стук пишущей машинки — 4 сона, громкий уличный шум — 8 сон. В кузнечном цехе громкость достигает 64 сон, а на расстоянии 4 м от работающего двигателя реактивного самолета — 264 сон. Звуки еще большей громкости начинают вызывать болевые ощущения.

Высота звука

Помимо громкости звук характеризуется высотой. *Высота звука определяется его частотой: чем больше частота колебаний в звуковой волне, тем выше звук.* Колебаниям небольшой частоты соответствуют низкие звуки, колебаниям большой частоты — высокие звуки.

Так, например, шмель машет своими крылышками с меньшей частотой, чем комар: у шмеля она составляет 220 взмахов в секунду, а у комара — 500–600. Поэтому полет шмеля сопровождается низким звуком (жужжанием), а полет комара — высоким (писком).

Звуковую волну определенной частоты иначе называют музыкальным тоном, поэтому о высоте звука часто говорят как о высоте тона.

Основной тон с примесью нескольких колебаний других частот образует музыкальный звук. Например, звуки скрипки и пианино могут включать до 15–20 различных колебаний. От состава каждого сложного звука зависит его тембр.

Частота свободных колебаний струны зависит от ее размеров и натяжения. Поэтому, натягивая струны гитары с помощью колышков и прижимая их к грифу гитары в разных местах, мы меняем их собственную частоту, а следовательно, и высоту издаваемых ими звуков.

При обычной речи в мужском голосе встречаются колебания с частотой от 100 до 7000 Гц, а в женском — от 200 до 9000 Гц. Наиболее высокочастотные колебания входят в состав согласного звука «с».

Характер восприятия звука во многом зависит от планировки помещения, в котором слушается речь или музыка. Объясняется это тем, что в закрытых помещениях слушатель воспринимает, кроме прямого звука, еще и слитный ряд быстро следующих друг за другом повторений, вызванных многократными отражениями звука от находящихся в помещении предметов, стен, потолка и пола.

Отражение звука

На границе между двумя разными средами часть звуковой волны отражается, а часть проходит дальше.

При переходе звука из воздуха в воду 99,9 % звуковой энергии отражается назад, однако давление в прошедшей в воду звуковой волне оказывается почти в 2 раза больше, чем в воздухе. Слуховой аппарат рыб реагирует именно на это. Поэтому, например, крики и шумы над поверхностью воды являются верным способом распугать морских обитателей. Человека же, оказавшегося под водой, эти крики не оглушат: при погружении в воду в его ушах останутся воздушные пробки, которые и спасут его от звуковой перегрузки.

При переходе звука из воды в воздух снова отражается 99,9 % энергии. Но если при переходе из воды в воздух звуковое давление увеличивалось, то теперь оно, наоборот, резко уменьшается. Именно по этой причине человек, находящийся над водой, не слышит звук, возникающий под водой при ударе одним камнем о другой.

Такое поведение звука на границе между водой и воздухом дало основание нашим предкам считать подводный мир «миром молчания». Отсюда же и выражение «нем как рыба». Однако еще Леонардо да Винчи предлагал слушать подводные звуки, приложив ухо к веслу, опущенному в воду. Воспользовавшись таким способом, можно убедиться, что рыбы на самом деле довольно болтливы.

Эхо

Отражением звука объясняется и эхо. Эхо — это звуковые волны, отраженные от какого-либо препятствия (зданий, холмов, деревьев) и возвратившиеся к своему источнику. Мы слышим эхо лишь в том случае, когда отраженный звук воспринимается отдельно от произнесенного. Происходит это тогда, когда до нас доходят звуковые волны, последовательно отразившиеся от нескольких препятствий и разделенные интервалом времени $t > 50\text{--}60$ мс. Тогда возникает многократное эхо. Некоторые из таких явлений приобрели мировую известность. Так, например, скалы, расположенные в форме круга возле Адерсбаха в Чехии, в определенном месте повторяют 7 слогов, а в замке Вудсток в Англии эхо отчетливо повторяет 17 слогов!

Слово «эхо» связано с именем горной нимфы Эхо, которая, согласно древнегреческой мифологии, безответно была влюблена в Нарцисса. От тоски по возлюбленному Эхо высохла и окаменела

так, что от нее остался лишь голос, способный повторять окончания произнесенных в ее присутствии слов.

Почему не слышно эхо в небольшой квартире? Ведь и в ней звук должен отражаться от стен, потолка, пола. Дело в том, что время t , за которое звук проходит расстояние, скажем, в $s = 6$ м, распространяясь со скоростью $v = 340$ м/с, равно:

$$t = \frac{s}{v} = \frac{6}{340} = 0,02 \text{ с.}$$

А это значительно меньше времени (0,06 с), необходимого, чтобы услышать эхо.

Увеличение длительности звука, вызванное его отражениями от различных препятствий, называется *реверберацией*. Реверберация велика в пустых помещениях, где она приводит к гулкости. И наоборот, помещения с мягкой обивкой стен, драпировками, шторами, мягкой мебелью, коврами, а также наполненные людьми хорошо поглощают звук, и потому реверберация в них незначительна.

1.5.14. Скорость звука

Для распространения звука необходима упругая среда. В вакууме звуковые волны распространяться не могут, так как там нечему колебаться. В этом можно убедиться на простом опыте. Если поместить под стеклянный колокол электрический звонок, то по мере выкачивания из-под колокола воздуха звук от звонка будет становиться все слабее и слабее, пока не прекратится совсем.

Известно, что во время грозы мы видим вспышку молнии и лишь через некоторое время слышим раскаты грома. Это запаздывание возникает из-за того, что скорость звука в воздухе значительно меньше скорости света, идущего от молнии.

Скорость звука в воздухе впервые была измерена в 1636 г. французским ученым М. Мерсенном. При температуре 20°C она равна 343 м/с, т. е. 1235 км/ч. Заметим, что именно до такого значения уменьшается на расстоянии 800 м скорость пули, вылетевшей из автомата Калашникова. Начальная скорость пули 825 м/с, что значительно превышает скорость звука в воздухе. Поэтому человек, услышавший звук выстрела или свист пули, может не беспокоиться: эта пуля его уже миновала. Пуля обгоняет звук выстрела и достигает своей жертвы до того, как приходит этот звук.

Скорость звука в газах зависит от температуры среды: с увеличением температуры воздуха она возрастает, а с уменьшением — убывает. При 0°C скорость звука в воздухе составляет 332 м/с.

В разных газах звук распространяется с разной скоростью. Чем больше масса молекул газа, тем меньше скорость звука в нем. Так, при температуре 0°C скорость звука в водороде составляет 1284 м/с, в гелии — 965 м/с, а в кислороде — 316 м/с.

Скорость звука в жидкостях, как правило, больше скорости звука в газах. Скорость звука в воде впервые была измерена в 1826 г. Ж. Колладом и Я. Штурмом. Свои опыты они проводили на Женевском озере в Швейцарии. На одной лодке поджигали порох и одновременно ударяли в колокол, опущенный в воду. Звук этого колокола, опущенного в воду, улавливался на другой лодке, которая находилась на расстоянии 14 км от первой. По интервалу времени между вспышкой светового сигнала и приходом звукового сигнала определили скорость звука в воде. При температуре 8°C она оказалась равной 1440 м/с.

Скорость звука в твердых телах больше, чем в жидкостях и газах. Если приложить ухо к рельсу, то после удара по другому концу рельса слышно два звука. Один из них достигает уха по рельсу, другой — по воздуху.

Хорошей проводимостью звука обладает земля. Поэтому в старые времена при осаде в крепостных стенах помещали «слухачей», которые по звуку, передаваемому землей, могли определить, ведет ли враг подкоп к стенам или нет. Прикладывая ухо к земле, также следили за приближением вражеской конницы.

Твердые тела хорошо проводят звук. Благодаря этому люди, потерявшие слух, иной раз способны танцевать под музыку, которая доходит до слуховых нервов не через воздух и наружное ухо, а через пол и кости.

Скорость звука можно определить, зная длину волны и частоту (или период) колебаний:

$$v = \lambda \nu, v = \lambda / T.$$

1.5.15. Инфразвук

Звуковые волны с частотой, меньшей 16 Гц, называются инфразвуком.

Инфразвуковые волны человеческое ухо не воспринимает (рис. 1.71). Несмотря на это, они способны оказывать на человека определенное физиологическое воздействие. Объясняется это действие резонансом. Внутренние органы нашего тела имеют достаточно низкие собственные частоты: брюшная полость и грудная клетка — 5–8 Гц, голова — 20–30 Гц. Среднее значение резонансной частоты для всего тела составляет 6 Гц. Имея частоты того же порядка, инфразвуковые волны заставляют наши органы вибрировать и при очень большой интенсивности способны привести к внутренним кровоизлияниям.

Специальные опыты показали, что облучение людей достаточно интенсивным инфразвуком может вызвать потерю чувства равновесия, тошноту, непроизвольное вращение глазных яблок и т. д. Например, на частоте 4–8 Гц человек ощущает перемещение внутренних органов, а на частоте 12 Гц — приступ морской болезни.

Рассказывают, что однажды американский физик Р. Вуд (прославившийся среди коллег большим оригиналом и весельчаком) принес в театр специальный аппарат, излучающий инфразвуковые волны, и, включив его, направил на сцену. Никакого звука никто не услышал, однако с актрисой случилась истерика.

Резонансным влиянием на человеческий организм низкочастотных звуков объясняется и возбуждающее действие современной рок-музыки, насыщенной многократно усиленными низкими частотами барабанов, бас-гитар.

Инфразвук не воспринимается человеческим ухом, однако его способны слышать некоторые животные. Например, медузы уверенно воспринимают инфразвуковые волны с частотой 8–13 Гц, возникающие при шторме в результате взаимодействия потоков воздуха с гребнями морских волн. Достигая медуз, эти волны заранее (за 15 часов!) «предупреждают» о приближающемся шторме.

Источниками инфразвука могут служить грозовые разряды, выстрелы, извержения вулканов, работающие двигатели реактивных самолетов, ветер, обтекающий гребни морских волн, и т. д. Для инфразвука характерно малое поглощение в различных средах, вследствие чего он может распространяться на очень большие расстояния. Это позволяет определить места сильных взрывов, положение стреляющего орудия, осуществлять контроль за подземными ядерными взрывами, предсказывать цунами и т. д.

1.5.16. Ультразвук

Упругие волны с частотой выше 20 кГц называются ультразвуком.

Ультразвук в животном мире. Ультразвук, как и инфразвук, не воспринимается человеческим ухом, однако его способны излучать и воспринимать некоторые животные. Так, например, дельфины благодаря этому уверенно ориентируются в мутной воде. Посылая и принимая возвратившиеся назад ультразвуковые импульсы, они способны на расстоянии 20–30 м обнаружить даже маленькую дробишку, осторожно опущенную в воду. Ультразвук помогает и летучим мышам, которые плохо видят или вообще ничего не видят. Издавая с помощью своего слухового аппарата ультразвуковые волны (до 250 раз в секунду), они способны ориентироваться в полете и успешно ловить добычу даже в темноте. Любопытно, что у некоторых насекомых в ответ на это вырабо-

талась особая защитная реакция: отдельные виды ночных бабочек и жуков тоже оказались способными воспринимать ультразвуки, издаваемые летучими мышами, и, услышав их, они тут же складывают крылья, падают вниз и замирают на земле.

Ультразвуковые сигналы используются и некоторыми китами. Эти сигналы позволяют им охотиться на кальмаров при полном отсутствии света.

Установлено также, что ультразвуковые волны с частотой более 25 кГц вызывают болезненные ощущения у птиц. Это используется, например, для отпугивания чаек от водоемов с питьевой водой.

Использование ультразвука в технике. Ультразвук находит широкое применение в науке и технике, где его получают с помощью различных механических (например, сирена) и электро-механических устройств.

Источники ультразвука устанавливают на кораблях и подводных лодках. Посылая короткие импульсы ультразвуковых волн, можно уловить их отражения от дна или каких-либо других предметов. По времени запаздывания отраженной волны можно судить о расстоянии до препятствия. Используемые при этом эхолоты и гидролокаторы позволяют измерять глубину моря, решать различные навигационные задачи (плавание вблизи скал, рифов и т. д.), осуществлять рыбопромысловую разведку (обнаруживать косяки рыб), а также решать военные задачи (поиск подводных лодок противника, бесперископные торпедные атаки и др.).

В промышленности по отражению ультразвука от трещин в металлических отливках судят о дефектах в изделиях.

Ультразвуки дробят жидкие и твердые вещества, образуя различные эмульсии и суспензии.

С помощью ультразвука удается осуществить пайку алюминиевых изделий, что с помощью других методов сделать не удастся (так как на поверхности алюминия всегда имеется плотный слой оксидной пленки). Наконечник ультразвукового паяльника не только нагревается, но и совершает колебания с частотой около 20 кГц, благодаря чему оксидная пленка разрушается.

Преобразование ультразвука в электрические колебания, а их затем в свет позволяет осуществить звуковидение. При помощи звуковидения можно видеть предметы в непрозрачной для света воде.

В медицине при помощи ультразвука осуществляют сварку сломанных костей, обнаруживают опухоли, осуществляют диагностические исследования в акушерстве и т. д. Биологическое действие ультразвука (приводящее к гибели микробов) позволяет использовать его для пастеризации молока, стерилизации медицинских инструментов.

1.5.17. Интерференция волн

Интерференция волн (от лат. *inter* — взаимно, между собой и *ferio* — ударяю, поражаю) — взаимное усиление или ослабление двух (или большего числа) волн при их наложении друг на друга при одновременном распространении в пространстве.

Обычно под интерференционным эффектом понимают тот факт, что результирующая интенсивность в одних точках пространства получается больше, в других — меньше суммарной интенсивности волн.

Интерференция волн — одно из основных свойств волн любой природы: упругих, электромагнитных, в том числе и световых, и др.

Интерференция механических волн

Сложение механических волн — их взаимное наложение — проще всего наблюдать на поверхности воды. Если возбудить две волны, бросив в воду два камня, то каждая из этих волн ведет себя так, как будто другой волны не существует. Аналогично ведут себя звуковые волны от разных независимых источников. В каждой точке среды колебания, вызванные волнами, просто складываются. Результирующее смещение любой частицы среды представляет собой алгебраичес-

кую сумму смещений, которые происходили бы при распространении одной из волн в отсутствие другой.

Если одновременно в двух точках O_1 и O_2 возбудить в воде две когерентные гармонические волны, то будут наблюдаться гребни и впадины на поверхности воды, не меняющиеся со временем, т. е. возникнет *интерференция*.

Условием возникновения максимума интенсивности в некоторой точке M , находящейся на расстояниях d_1 и d_2 от источников волн O_1 и O_2 , расстояние между которыми $l \ll d_1$ и $l \ll d_2$ (рис. 1.75), будет:

$$\Delta d = k\lambda,$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$, а λ — длина волны.

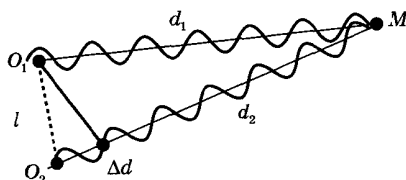


Рис. 1.75

Амплитуда колебаний среды в данной точке максимальна, если разность хода двух волн, возбуждающих колебания в этой точке, равна целому числу длин волн и при условии, что фазы колебаний двух источников совпадают.

Под разностью хода Δd здесь понимают геометрическую разность путей, которые проходят волны от двух источников до рассматриваемой точки: $\Delta d = d_2 - d_1$. При разности хода $\Delta d = k\lambda$ разность фаз двух волн равна четному числу π , и амплитуды колебаний будут складываться (рис. 1.76).

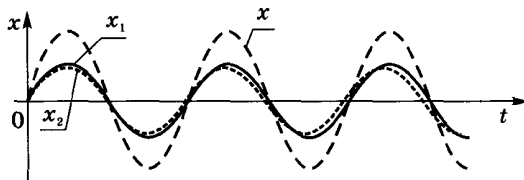


Рис. 1.76

Условием минимума является:

$$\Delta d = (2k + 1)\lambda/2.$$

Амплитуда колебаний среды в данной точке минимальна, если разность хода двух волн, возбуждающих колебания в этой точке, равна нечетному числу полуволен и при условии, что фазы колебаний двух источников совпадают.

Разность фаз волн в этом случае равна нечетному числу π , т. е. колебания происходят в противофазе, следовательно, гасятся; амплитуда результирующего колебания равна нулю (рис. 1.77).

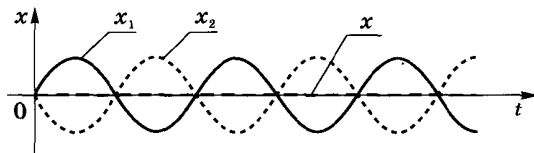


Рис. 1.77

Распределение энергии при интерференции

Вследствие интерференции происходит перераспределение энергии в пространстве. Она концентрируется в максимумах за счет того, что в минимумы не поступает совсем.

1.5.18. Дифракция волн

Дифракция волн (от лат. *diffractus* — разломанный) — в первоначальном узком смысле — огибание волнами препятствий, в современном — более широком — любые отклонения при распространении волн от законов геометрической оптики.

Дифракция волн проявляется особенно отчетливо в случаях, когда размеры препятствий меньше длины волны или сравнимы с ней.

Способность волн огибать препятствия можно наблюдать на морских волнах, легко огибающих камень, размеры которого малы по сравнению с длиной волны. Звуковые волны также способны огибать препятствия, благодаря чему мы слышим, например, сигнал машины, находящейся за углом дома.

Явление дифракции волн на поверхности воды можно наблюдать, если поставить на пути волн экран с узкой щелью, размеры которой меньше длины волны (рис. 1.78). За экраном распространяется круговая волна, как если бы в отверстии экрана располагалось колеблющееся тело — источник волн. Согласно принципу Гюйгенса–Френеля, так и должно быть. Вторичные источники в узкой щели располагаются столь близко друг к другу, что их можно рассматривать как один точечный источник.

Если размеры щели велики по сравнению с длиной волны, то волна проходит сквозь щель, почти не меняя своей формы, лишь по краям видны еле заметные искривления волновой поверхности, благодаря которым волна проникает и в пространство за экраном (рис. 1.79).



Рис. 1.78



Рис. 1.79

Примеры заданий ЕГЭ по теме 1.5. «Механические колебания и волны»

Часть 1

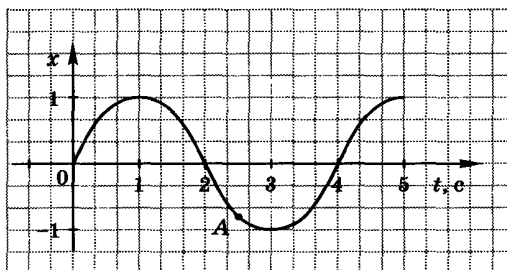
При выполнении заданий уровня А нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

1 2 3 4

- A1. Амплитуда, частота и начальная фаза колебаний математического маятника равны 5 м, 10 с^{-1} и 0 соответственно. Уравнение колебаний имеет вид
1) $x = 2\sin 10$ 2) $x = 5\sin 5\pi$ 3) $x = 5\sin 20\pi$ 4) $x = \sin 5$

1 2 3 4

- A2. Фаза колебания φ_A в точке А (см. рисунок) и период T равны



- 1) $\varphi_A = 0,8\pi$, $T = 4 \text{ с}$ 3) $\varphi_A = 0,8\pi$, $T = 2 \text{ с}$
2) $\varphi_A = \pi$, $T = 2 \text{ с}$ 4) $\varphi_A = 1,25\pi$, $T = 4 \text{ с}$

1 2 3 4

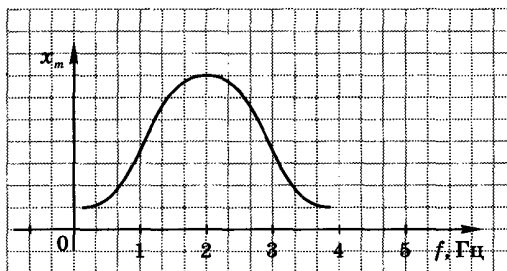
- A3. Длину нити математического маятника увеличили. Как нужно изменить массу грузика, чтобы уменьшить частоту колебаний маятника?
1) увеличить 3) оставить без изменений
2) уменьшить 4) невозможно выполнить задачу

1 2 3 4

- A4. Массу груза пружинного маятника увеличили вдвое. Как нужно изменить жесткость пружины, чтобы собственная частота его колебаний не изменилась?
1) уменьшить в 2 раза 3) оставить без изменений
2) увеличить в 2 раза 4) увеличить в 4 раза

1 2 3 4

- A5. На рисунке представлена резонансная кривая вынужденных колебаний некоторой системы. Какова собственная частота колебаний этой системы?



- 1) 1 Гц 2) 3 Гц 3) 2 Гц 4) 1,5 Гц

- A6.** Длина волны λ , ее скорость v и период T связаны соотношением
 1) $\lambda = v / T$ 2) $\lambda = v \cdot T$ 3) $\lambda = v - T$ 4) $\lambda = T / v$

1 2 3 4 A6

Часть 2

Ответом к заданиям В1—В3 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

- В1.** Определите смещение точки, совершающей гармонические колебания с частотой 10 Гц и амплитудой 1 см, в момент времени $t = 100$ с от начала колебания?
- В2.** Какова длина звуковой волны, создаваемой человеческим голосом с частотой колебаний 200 Гц в воде?
- В3.** В упругой среде распространяются две когерентные волны с $\lambda = 5$ см. Разность расстояний от источников этих волн до некоторой точки составляет 1 м. Будет ли в этой точке наблюдаться максимум интерференции этих волн? Ответ дать в виде цифры: 1 — да, 2 — нет.

В1

В2

В3

В заданиях В4–В5 на установление соответствия требуется указать последовательность цифр, соответствующих правильному ответу.

- В4.** Установите соответствие между описанием характеристик и параметров колебательного процесса (левый столбец) и их названием (правый столбец).
- | | |
|--|----------------------------|
| А) Максимальное отклонение колеблющейся величины от положения равновесия | 1) смещение; |
| Б) Время, в течение которого система возвращается в исходную точку, совершив одно полное колебание | 2) гармонические колебания |
| В) Число колебаний в единицу времени | 3) амплитуда |
| Г) Аргумент функции, описывающей периодический колебательный процесс | 4) частота |
| Д) Колебания, описываемые функцией синуса или косинуса | 5) фаза |
| | 6) период |

В4

Впишите во вторую строку таблицы номера правильных ответов.

А	Б	В	Г	Д

- В5.** Установите соответствие между характеристикой волны (левый столбец) и ее названием (правый столбец).
- | | |
|--|----------------------|
| А) Возмущения, распространяющиеся в среде, в которой действуют силы упругости | 1) плоская волна |
| Б) Направление колебаний совпадает с направлением их распространения в пространстве | 2) упругая волна |
| В) Направление распространения колебаний в среде перпендикулярно направлению самих колебаний | 3) продольная волна |
| Г) Волна, фронт распространения которой представляет собой сферу | 4) сферическая волна |
| Д) Волна, волновые поверхности которой представляют собой ряд параллельных плоскостей | 5) поперечная волна |

В5

Впишите во вторую строку таблицы номера правильных ответов.

А	Б	В	Г	Д

Тренировочный тест к разделу 1 «Механика»

Часть 1

При выполнении заданий этой части нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

A1 1 2 3 4

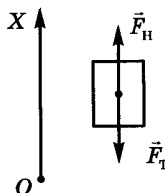
- A1. Ядро толкнули горизонтально с высоты 2 м над уровнем земли, и оно упало на землю на расстоянии 17 м по горизонтали от места броска. Если пренебречь сопротивлением воздуха, то начальная скорость ядра составляет
- | | |
|-------------|-------------|
| 1) 32,3 м/с | 3) 15,1 м/с |
| 2) 26,6 м/с | 4) 19,8 м/с |

A2 1 2 3 4

- A2. Чтобы высота полета шарика, брошенного с земли под некоторым углом к горизонту равнялась дальности полета, этот угол должен быть равным
- | | |
|---------|---------|
| 1) 76 ° | 3) 35 ° |
| 2) 50 ° | 4) 45 ° |

A3 1 2 3 4

- A3. Масса лифта с пассажирами равна 800 кг. С каким ускорением (по величине и направлению) движется изображенный на рисунке лифт, если натяжение троса равно 6 кН?



- | | |
|--------------------------|--------------------------|
| 1) +4,1 м/с ² | 3) -2,3 м/с ² |
| 2) +3 м/с ² | 4) -5 м/с ² |

A4 1 2 3 4

- A4. Автомобиль удерживается тормозами на склоне горы при уклоне не более 0,9 ($\operatorname{tg} \alpha \leq 0,9$). Какова длина тормозного пути этого автомобиля на горизонтальной поверхности при скорости 45 км/ч?
- | | |
|-----------|---------|
| 1) 8,9 м | 3) 7 м |
| 2) 10,5 м | 4) 11 м |

A5 1 2 3 4

- A5. На вращающемся горизонтальном столике лежит шайба на расстоянии 30 см от оси вращения. Коэффициент трения между шайбой и поверхностью столика равен 0,4. Угловая скорость вращения, при которой шайба начнет соскальзывать со столика, составляет
- | | |
|--------------|--------------|
| 1) 5,5 рад/с | 3) 3,6 рад/с |
| 2) 8,4 рад/с | 4) 7,2 рад/с |

A6 1 2 3 4

- A6. Чтобы остановить тело массой 1 кг, движущееся со скоростью 2 м/с, необходимо совершить работу
- | | |
|---------|-----------|
| 1) 1 Дж | 3) 4 Дж |
| 2) 2 Дж | 4) 3,5 Дж |

- A7.** Пуля массой 9,6 г, летящая со скоростью 800 м/с, пробивает стену толщиной 2 см и вылетает из нее со скоростью 400 м/с. Чему равна сила сопротивления стены при движении в ней пули (силу считать постоянной)?
 1) 400 кН 3) 115 кН
 2) 140 кН 4) 8000 Н
- A8.** Вагон массой 20 т движется равнозамедленно с начальной скоростью 54 км/ч. Под действием силы трения 5 кН он через некоторое время останавливается. Работа силы трения и расстояние, которое вагон проходит до остановки, составляют
 1) 800 кДж и 700 м 3) -17 МДж и 1500 м
 2) -1 МДж и 900 м 4) -2,25 МДж и 450 м
- A9.** Снаряд массой 100 кг, летящий со скоростью 500 м/с, попадает в неподвижный вагон с песком массой 10 т и застревает в нем. В результате этого вагон начнет двигаться со скоростью
 1) 1 м/с 3) 5 м/с
 2) 8 м/с 4) 10 м/с
- A10.** Единицей измерения амплитуды колебаний являются: А) метры, Б) радианы, м/с и другие единицы измерения. Какое из утверждений верно?
 1) только А 3) и А, и Б
 2) только Б 4) ни А, ни Б
- A11.** Точка массой 10 г совершает гармонические колебания по закону косинуса с периодом $T = 2$ с и начальной фазой $\varphi_0 = 0$. Полная энергия точки равна $0,1 \cdot 10^3$ Дж. Уравнение процесса имеет вид
 1) $S = 0,045 \cos \pi t$ 3) $S = 0,072 \cos(\pi/2) \cdot t$
 2) $S = 51 \cos 2\pi t$ 4) $S = 5 \cos(\pi/2)t$
- A12.** Амплитуда колебаний волны равна 10 см. Смещение точки, удаленной от источника колебаний на величину $0,75\lambda$, через время, равное $0,9T$ от начала колебаний, составляет
 1) 6,6 см 3) 8,1 см
 2) 4,5 см 4) 5,3 см.
- A13.** Длина волны колебания, распространяющегося со скоростью $2,8 \cdot 10^7$ м/с, и периодом колебаний 10^{-4} с, равна
 1) $1,2 \cdot 10^4$ м 3) $9,2 \cdot 10^3$ м
 2) $3,5 \cdot 10^2$ м 4) $2,8 \cdot 10^3$ м
- A14.** Две точки среды, расположенные на одном луче на расстоянии 0,8 м, колеблются с разностью фаз, равной $\pi/2$. При этом длина волны составляет
 1) 1,5 м 3) 9,3 м
 2) 3,2 м 4) 5 м
- A15.** Пружина жесткостью $k = 1$ кН/м была сжата на 4 см. Какую работу необходимо совершить, чтобы сжатие пружины увеличить до 18 см?
 1) 15,4 Дж 3) 5,5 Дж
 2) 10,8 Дж 4) 20,1 Дж

1 2 3 4 A7

1 2 3 4 A8

1 2 3 4 A9

1 2 3 4 A10

1 2 3 4 A11

1 2 3 4 A12

1 2 3 4 A13

1 2 3 4 A14

1 2 3 4 A15

A16 1 2 3 4

A16. Автомобиль массой 1 т начинает тормозить на расстоянии 25 м от препятствия. Сила трения колес о дорожное покрытие равна 3,84 кН. При какой предельной скорости движения автомобиль успеет остановиться перед препятствием?

- 1) 5 м/с
- 2) 31 м/с
- 3) 14 м/с
- 4) 25 м/с

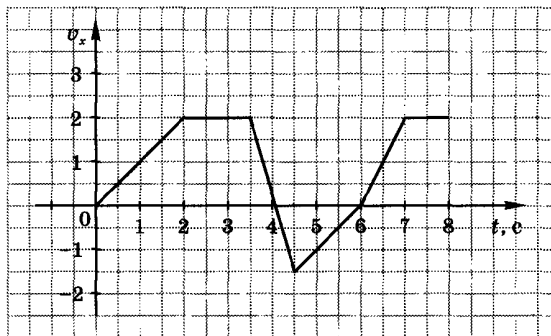
A17 1 2 3 4

A17. В упругой среде распространяется волна со скоростью 100 м/с. Минимальное расстояние между точками среды, колеблющимися в противофазе, равно 1 м. Частота колебаний составляет

- 1) 50 Гц
- 2) 30 Гц
- 3) 10 Гц
- 4) 20 Гц

A18 1 2 3 4

A18. На рисунке приведена зависимость скорости тела, движущегося по прямой, от времени. Чему равно перемещение тела между 2-й и 7-й секундами?



- 1) 3 м
- 2) 7 м
- 3) 11 м
- 4) 2 м

A19 1 2 3 4

A19. Тело поднимают вверх с помощью простого неподвижного блока. В чем практическая польза этого устройства?

- 1) выигрыш в силе
- 2) выигрыш в расстоянии
- 3) выигрыш в совершенной работе
- 4) изменение направления приложенной силы

A20 1 2 3 4

A20. Вес тела в воде в 5 раз меньше, чем в воздухе. Плотность материала, из которого изготовлено тело, равна

- 1) 1,5 г/см³
- 2) 1,8 г/см³
- 3) 1,25 г/см³
- 4) 1,45 г/см³

A21 1 2 3 4

A21. Скорость звука в воде 1450 м/с. На каком расстоянии находятся ближайшие точки, совершающие колебания в противоположных фазах, если частота колебаний 725 Гц?

- 1) 5 м
- 2) 1 м
- 3) 1,5 м
- 4) 3 м

A22 1 2 3 4

A22. Диапазон слышимых человеческим ухом звуковых частот составляет

- 1) 1 Гц–100 кГц
- 2) 10 кГц–800 МГц
- 3) 16 Гц–20 кГц
- 4) 5 кГц–700 кГц

A23. На каком расстоянии (в Мм) от Луны находится точка, в которой силы притяжения тела к Земле и к Луне взаимно уравновешиваются?

- 1) 38 Мм 3) 552 Мм
2) 41 Мм 4) 100 Мм

1 2 3 4 A23

A24. Какую работу необходимо совершить, чтобы на расстоянии 10 м увеличить скорость тела массой 1 кг от 2 м/с до 6 м/с, если коэффициент трения тела о поверхность равен 0,4?

- 1) 55,2 Дж 3) 60,5 Дж
2) 40 Дж 4) 15,3 Дж

1 2 3 4 A24

A25. Чему равен модуль скорости и ускорение точки, движущейся по закону $x = 2t^2 - 5t$; $y = 1,5t^2 - 3t$ (величины x , y , t даны в единицах СИ), в момент времени $t = 2,5$ с?

- 1) 71 м/с и 10 м/с²
2) 10 м/с и 8,3 м/с²
3) 6,7 м/с и 5 м/с²
4) 12,5 м/с и 9 м/с²

1 2 3 4 A25

Часть 2

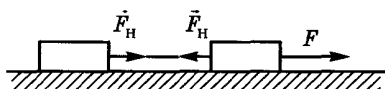
Ответом к заданиям В1—В4 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

В1. Тело массой 500 г, брошенное под углом к горизонту со скоростью 18 м/с с высоты 10 м над поверхностью земли, упало на землю со скоростью 22 м/с. Чему равна работа тела по преодолению сопротивления воздуха?

В1

В2. Два тела одинаковой массы, связанные нерастяжимой нитью, движутся под действием силы F по гладкой горизонтальной поверхности (см. рисунок). Нить выдерживает силу натяжения $F_n = 30$ Н. Какова должна быть сила F , чтобы нить порвалась?

В2



В3. При какой скорости поезда маятник длиной $l = 11$ см, подвешенный в вагоне, особенно сильно раскачивается, если длина рельс 12,5 м? Ответ дать в км/ч.

В3

В4. В неподвижном лифте висит маятник, период колебаний которого $T = 1$ с. С каким ускорением движется лифт, если период колебаний этого маятника стал равным 1,1 с?

В4

В задании В5 на установление соответствия требуется указать последовательность цифр, соответствующих правильному ответу.

- В5.** Установите соответствие между физической величиной (или физическим понятием) (правый столбец) и его определением (левый столбец).
- | | |
|---|--------------------------|
| А) Изменение положения тела относительно какого-либо другого тела, выбранного в качестве тела отсчета | 1) траектория |
| Б) Линия, которую описывает тело при движении относительно выбранного тела отсчета | 2) механическое движение |
| В) Длина участка траектории, пройденного материальной точкой за данный промежуток времени | 3) материальная точка |
| Г) Величина, равная отношению пути ко времени, за которое этот путь пройден | 4) путь |
| Д) Объект пренебрежимо малых размеров, имеющий массу | 5) тело отсчета |
| Е) Система координат X, Y, Z , тело, с которым она связана, и часы. | 6) система отсчета |
| Ж) Тело, относительно которого рассматривается изменение положения других тел в пространстве | 7) путевая скорость |

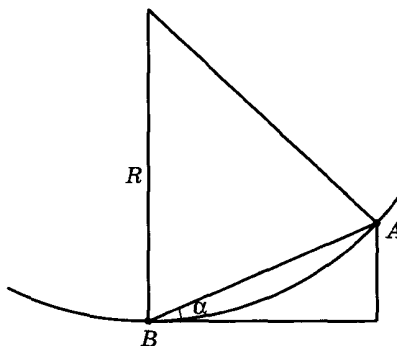
Впишите во вторую строку таблицы номера правильных ответов.

А	Б	В	Г	Д	Е	Ж

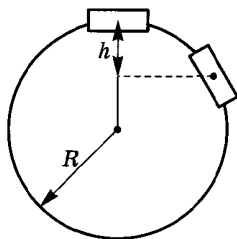
Часть 3

Полное правильное решение задач С1–С6 должно включать законы и формулы, применение которых необходимо и достаточно для решения задачи, а также математические преобразования, расчеты с численным ответом и, при необходимости, рисунок, поясняющий решение.

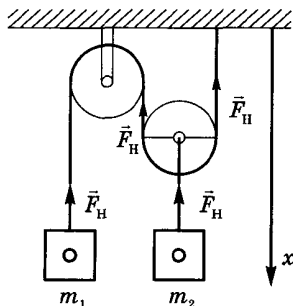
- С1.** В каком случае тело, находящееся в некоторой точке A внутри сферы радиусом R (см. рисунок) достигнет нижней точки сферы B быстрее: соскальзывая по поверхности сферы (потратив на это время t_1) или по наклонной плоскости AB (потратив на это время t_2)? Считаем, что $AB \ll R$, начальная скорость тела равна нулю, трением можно пренебречь.



- С2. Выведите формулу для периода обращения T спутника, который движется по круговой орбите на высоте h над поверхностью Земли.
- С3. Небольшое тело соскальзывает по сфере радиусом R с ее вершины (см. рисунок). На каком расстоянии h по вертикали от вершины тело оторвется от поверхности сферы и полетит вниз? Трением можно пренебречь.



- С4. Груз массой 3 кг подвешен на нити длиной 2,5 м, выдерживающей натяжение 50 Н. В натянутом состоянии нити груз отводят в сторону от положения равновесия и отпускают. На какую наибольшую высоту можно отвести груз, чтобы нить при его качании не оборвалась?
- С5. К подвижному и неподвижному блокам (см. рисунок) подвешены тела с массами m_1 и m_2 соответственно. Найдите ускорения a_1 и a_2 и силу натяжения нити F_n , если $m_1 = 4$ кг, $m_2 = 2$ кг. (Весом блоков и трением можно пренебречь).



- С6. Полый шар с внешним радиусом R_1 и внутренним радиусом R_2 , изготовленный из материала плотностью ρ_1 , плавает на поверхности жидкости с плотностью ρ_2 . Чему равна плотность вещества ρ , которым следует заполнить внутреннюю полость шара, чтобы он находился в безразличном равновесии внутри жидкости?



2.1. Молекулярная физика

2.1.1. Основы молекулярно-кинетической теории

Молекулярная физика описывает строение вещества с помощью молекулярно-кинетической теории.

Согласно *молекулярно-кинетической теории (МКТ)*, все тела состоят из отдельных частиц — молекул и атомов, то есть не являются сплошными.

Основные положения молекулярно-кинетической теории строения вещества заключаются в следующем:

- 1) вещество состоит из частиц (атомов и молекул);
- 2) эти частицы беспорядочно движутся;
- 3) частицы взаимодействуют друг с другом.

Атом — это наименьшая часть химического элемента, обладающая его свойствами и способная к самостоятельному существованию.

Каждому элементу соответствует определенный род атомов, обозначаемый химическим символом этого элемента. Например, атом кислорода обозначается символом О, водорода — Н, гелия — He и т. д.

Атомы могут существовать *в свободном состоянии* (в виде отдельных атомов) в газах. В жидкостях и твердых телах они существуют в виде молекул, в которых соединяются с атомами того же элемента или других химических элементов (или, как принято говорить, существуют в *связанном состоянии*).

Молекула — мельчайшая устойчивая частица вещества, состоящая из атомов одного или нескольких химических элементов, сохраняющая основные химические свойства этого вещества. Атомы можно рассматривать как одноатомные молекулы.

Размеры молекул

Для определения размеров молекул проводились различные опыты. Вот один из них.

В сосуд с водой помещают каплю масла, объем которой определяется заранее. (Объем капли V определяют с помощью мензурки, в которую при помощи пипетки капают несколько десятков капель масла, и измеряют их общий объем. Этот объем делят на количество капель). Масло начинает растекаться по поверхности воды, образуя тонкую пленку. После прекращения растекания пленки определяют ее площадь S . Если предположить, что образовалась пленка толщиной в одну молекулу (из-за чего и прекратилось растекание масла), то толщина пленки h будет равна диаметру молекулы. Толщина пленки равна отношению ее объема к площади:

$$h = \frac{V}{S}.$$

Полученное в этом опыте численное значение толщины составляло 0,00000016 см, или $1,6 \cdot 10^{-7}$ см. Этим числом выражается примерный размер молекул (размеры атомов составляют около 10^{-8} см).

Поскольку молекулы очень малы, в каждом физическом теле их содержится огромное количество. Так, в 1 см³ воздуха содержится около $27 \cdot 10^{18}$ молекул. Чтобы понять, насколько велико это число, представим себе, что через маленькое отверстие пропускают по миллиону молекул в секунду, тогда указанное количество молекул пройдет через отверстие за 840 000 лет.

Масса молекул

Масса молекул (за исключением молекул органических веществ, например, белков) очень мала. Так, масса молекулы воды составляет около $2,7 \cdot 10^{-23}$ г. Работать с такими малыми цифрами неудобно, поэтому в физике и химии принято выражать массы атомов и молекул в относительных единицах.

Атомная единица массы

Атомная единица массы (а.е.м.) — единица массы, равная 1/12 массы атома изотопа углерода ¹²C:

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Чтобы перевести значение массы атомов или молекул, выраженной в а.е.м., т. е. относительную молекулярную (или атомную) массу вещества M_r , в единицу массы СИ (кг), пользуются формулой:

$$m \text{ (кг)} = \frac{M_r \cdot 10^{-3} \text{ [моль}^{-1} \cdot \text{кг]}}{N_A \cdot \text{[моль}^{-1}]},$$

где N_A — постоянная Авогадро.

Атомная масса (относительная молекулярная масса)

Относительная молекулярная масса (атомная масса) — относительное значение массы молекулы (атома), выраженное в атомных единицах массы:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{\text{oc}}} \left(M_r = \frac{m_0}{1 \text{ а.е.м.}} \right),$$

где M_r — относительная молекулярная (атомная) масса; m_0 — масса молекулы (атома), выраженная в единицах СИ (кг); m_{oc} — масса молекулы изотопа углерода ¹²C, выраженная в тех же единицах, что и m_0 .

$$\frac{1}{12} m_{\text{oc}} = 1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Атомная масса была взята Д. И. Менделеевым за основную характеристику элемента при открытии им периодической системы элементов. Атомная масса — дробная величина, в отличие от массового числа — количества нуклонов в атоме.

Относительная молекулярная масса вещества складывается из относительных атомных масс (а.м.) входящих в молекулу элементов. Например: $M_r(\text{H}_2\text{O}) = 2 \cdot 1 + 16 = 18$; $M_r(\text{CO}_2) = 12 + 2 \cdot 16 = 48$.

Атомные массы всех химических элементов точно измерены.

Моль. Постоянная Авогадро

Моль — количество вещества, масса которого, выраженная в граммах, численно равна относительной атомной (молекулярной) массе.

Моль — единица количества вещества в СИ (одна из основных единиц СИ).

В 1 моле содержится столько молекул (атомов или других частиц вещества), сколько атомов содержится в 0,012 кг нуклида углерода ^{12}C с атомной массой 12.

Из этого определения следует, что в одном моле любого вещества содержится одно и то же число атомов или молекул.

Число это называется *постоянной Авогадро* и обозначается N_A :

$$N_A = 6,022054(32) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Постоянная Авогадро (число Авогадро) — это число атомов (молекул, или других структурных элементов вещества), содержащихся в 1 моле.

Постоянная Авогадро — одна из фундаментальных физических констант. Она входит в некоторые другие постоянные, например, в постоянную Больцмана.

Количество вещества

Количество вещества — это число частиц вещества (атомов, молекул), выраженное в молях. Учитывая определение моля и числа Авогадро, можно сказать, что количество вещества ν равно отношению числа молекул N в данном теле к постоянной Авогадро N_A , т. е. к числу молекул в 1 моле вещества:

$$\nu = \frac{N}{N_A}. \quad (2.1)$$

Молярная масса

Молярной массой вещества M называют массу вещества, взятого в количестве 1 моль:

$$M = m_0 N_A, \quad (2.2)$$

где m_0 — масса молекулы данного вещества.

Поскольку для любого тела его масса m связана с количеством молекул N в нем соотношением

$$m = m_0 N, \quad (2.3)$$

то из (2.1), (2.2) и (2.3) получим:

$$\nu = \frac{m}{M}. \quad (2.4)$$

Количество вещества равно отношению массы вещества к его молярной массе.

Из (2.4) и (2.1) получаем:

$$N = N_A \cdot \nu = N_A \cdot \frac{m}{M}$$

выражение для числа молекул в теле с массой m и молярной массой M .

2.1.2. Обоснования молекулярно-кинетической теории

Диффузия, растворимость и броуновское движение могут быть объяснены только на основе представления о молекулярном строении веществ и являются убедительными обоснованиями первого и второго положений молекулярно-кинетической теории.

Броуновское движение

Броуновское движение (брауновское движение) — беспорядочное движение малых частиц, взвешенных в жидкости или газе, происходящее под действием ударов молекул окружающей среды.

Впервые такое движение исследовал и описал в 1827 г. английский ботаник Р. Браун при изучении под микроскопом взвешенной в воде цветочной пыльцы. Он обнаружил, что частички пыльцы находятся в непрерывном беспорядочном движении, как бы исполняя дикий фантастический танец. Он писал: «Это движение, как я убежден, обусловлено не потоками жидкости, не постепенным ее испарением, а принадлежит самим частицам».

Наблюдаемые (броуновские) частицы размером ~ 1 мкм и менее совершают неупорядоченные независимые движения, описывая сложные зигзагообразные траектории (рис. 2.1).

Подобный опыт можно проделать, пользуясь краской или тушью, предварительно растертой до таких мельчайших крупинок, которые видны лишь в микроскоп. Можно увидеть, что крупинки краски непрерывно движутся. Самые мелкие из них беспорядочно перемещаются с одного места в другое, более крупные лишь беспорядочно колеблются.

Броуновское движение можно наблюдать и в газе. Например, в воздухе его совершают взвешенные там частицы пыли или дыма.

Броуновское движение никогда не прекращается! В капле воды (если не давать ей высохнуть) движение крупинок можно наблюдать в течение многих дней, месяцев, лет. Оно не прекращается ни летом, ни зимой, ни днем, ни ночью. В кусках кварца, пролежавших в земле тысячи лет, попадают иногда капельки воды, замурованные в минерале. В этих капельках тоже наблюдали броуновское движение плавающих в воде частиц.

Интенсивность броуновского движения увеличивается с повышением температуры, уменьшением вязкости среды, уменьшением размера частиц. Оно не зависит от химической природы частиц и времени наблюдения.

Броуновское движение служит доказательством существования еще более мелких частиц — молекул жидкости, невидимых даже в самые сильные оптические микроскопы.

Броуновское движение объясняется тем, что благодаря случайной неодинаковости количества ударов молекул жидкости о частицу с разных направлений возникает равнодействующая сила определенного направления. Поскольку подобные флуктуации (флуктуация — случайное отклонение физической величины от ее среднего значения) очень кратковременны, то в следующий миг направление равнодействующей меняется и, следовательно, изменится направление перемещения частицы. Отсюда наблюдающаяся хаотичность броуновского движения, которая отражает хаотичность молекулярного движения.

Открытие броуновского движения имело большое значение для изучения строения вещества. Оно показало, что тела действительно состоят из отдельных частиц — молекул — и что молекулы находятся в непрерывном беспорядочном движении.

Полная теория броуновского движения была разработана Эйнштейном и Смолуховским в 1905–1906 гг. и экспериментально подтверждена Ж. Перреном. Выводы теории показали, что *среднее значение квадрата смещения броуновской частицы за определенный промежуток времени пропорционально этому промежутку времени, температуре и постоянной Больцмана*.

Эксперименты Ж. Перрена, в которых он определял положение одной определенной частицы через каждые 30 с, подтвердили выводы теории. Перрен проводил также опыты по проверке зависимости концентрации молекул газа от высоты и барометрической формулы — зависимости атмосферного давления от высоты. Он предположил, что броуновские частицы, являясь своего рода большими молекулами, должны подчиняться тем же законам, что и молекулы атмосферы, а, следовательно, их концентрация с высотой должна падать. Его эксперименты полностью подтвердили теорию. Они позволили ему определить постоянную Авогадро, значение которой совпало с уже известным.

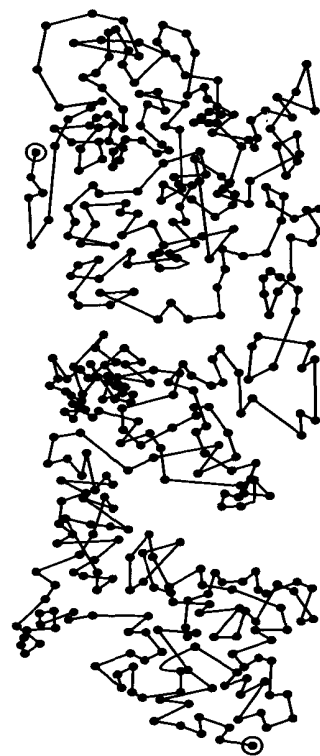


Рис. 2.1

Таким образом, броуновское движение является самым ярким подтверждением теплового движения молекул — одного из положений молекулярно-кинетической теории.

Диффузия

Явление, при котором происходит взаимное проникновение молекул одного вещества между молекулами другого, называется диффузией.

Явление это объясняется свойством молекул находиться в непрерывном движении.

Подтверждением движения молекул газа является всем известное распространение запаха какого-либо пахучего вещества, внесенного в комнату.

В жидкостях наблюдать взаимное проникновение одного вещества в другое можно, если в крепкий раствор медного купороса осторожно добавить воду. Вначале резкая граница между темно-голубым медным купоросом и бесцветной водой со временем исчезает. Механизм проникновения молекул следующий. Сначала вследствие движения отдельные молекулы воды и медного купороса, находящиеся около границы между ними, обмениваются местами. Молекулы медного купороса попадают в нижний слой воды, а молекулы воды — в верхний слой медного купороса. Граница между жидкостями из-за этого расплывается. Проникнув в слой «чужой» жидкости, молекулы начинают обмениваться местами с ее частицами, находящимся во все более глубоких слоях. Граница между жидкостями становится все более расплывчатой. Благодаря непрерывному и беспорядочному движению молекул этот процесс, в конце концов, приводит к тому, что вся жидкость становится однородной.

В твердых телах также наблюдается диффузия. Так, в одном из опытов гладко отшлифованные пластины свинца и золота положили друг на друга и сжали грузом. Через пять лет золото и свинец проникли друг в друга на 1 мм.

Скорость диффузии зависит от агрегатного состояния вещества и температуры тела. В газах, где расстояние между молекулами очень велико по сравнению с их размерами и движение молекул хаотично, скорость диффузии наибольшая. В жидкостях она меньше, так как и расстояние между молекулами меньше, и движение молекул чуть более упорядочено. В твердых телах, где наблюдается строгий порядок в расположении атомов (или молекул), а сами они совершают лишь небольшие колебательные движения около своих мест, скорость диффузии наименьшая.

Скорость протекания диффузии увеличивается с ростом температуры.

Взаимодействие частиц вещества

Третье положение МКТ о взаимодействии молекул является очевидным. Достаточно вспомнить, сколько усилий требуется, чтобы сломать, скажем, деревянную палку.

Твердые тела и жидкости не распадаются на отдельные молекулы, несмотря на то, что их молекулы разделены промежутками и находятся в непрерывном беспорядочном движении.

Более того, твердое тело, например, трудно растянуть или сжать. Чем же объяснить, что молекулы в телах не только удерживаются друг около друга, но и в некоторых случаях промежутки между ними трудно увеличить?

Дело в том, что молекулы взаимодействуют друг с другом, и природа этого взаимодействия — электрическая. Молекула состоит из заряженных частиц — электронов и ядер. Заряженные частицы одной молекулы при соответствующих расстояниях взаимодействуют (притягиваются или отталкиваются) с заряженными частицами других молекул.

На расстояниях, превышающих 2–3 диаметра молекул, результирующая сила взаимодействия определяется силами притяжения. Вклад последних по мере уменьшения расстояния между молекулами сначала растет, затем убывает. Силы взаимодействия обращаются в нуль, когда расстояние между молекулами становится равным сумме радиусов молекул.

Дальнейшее уменьшение расстояния приводит к перекрыванию электронных оболочек, что вызывает быстрое нарастание сил отталкивания.

2.1.3. Модели строения газов, жидкостей и твердых тел в МКТ

Газ

Французское слово *gaz* (газ) произошло от греческого слова «хаос», что означает «полный беспорядок», «неразбериха» (в древнегреческой мифологии хаос — зияющая бездна, наполненная туманом и мраком, якобы существовавшая до сотворения мира).

Термин «газ» был введен в начале XVII в. Я. Б. ван Гельмонтом. Действительно, модель молекулярного хаоса оказалась весьма плодотворной и сохранила свое значение для современных исследований.

Газ — это агрегатное состояние вещества, в котором составляющие его атомы и молекулы почти свободно и хаотически движутся в промежутках между столкновениями. Во время столкновения молекулы резко меняют скорость и направление своего движения. Время столкновения молекул намного меньше промежутка времени между двумя столкновениями.

Объем, занимаемый газом, значительно сильнее зависит от давления и температуры, чем объем жидкостей и твердых тел.

Газ можно сжать так, что его объем уменьшится в несколько раз. Это значит, что расстояние между молекулами l намного больше размеров самих молекул: $l \gg d$. На таких расстояниях молекулы очень слабо притягиваются друг к другу. По этой причине газы не имеют собственной формы и постоянного объема. Нельзя заполнить газом, например, половину бутылки или стакана.

В отличие от жидкостей и твердых тел газы не образуют свободной поверхности и заполняют весь доступный им объем.

Газообразное состояние — самое распространенное состояние вещества Вселенной (межзвездное вещество, туманности, звезды, атмосферы планет). По химическим свойствам газы и их смеси очень разнообразны — от малоактивных инертных газов до взрывчатых смесей.

Давление газа. Бесперывно и хаотически двигаясь, молекулы газа сталкиваются не только друг с другом, но и со стенками сосуда, в котором находится газ. Молекул в газе много, потому и число их ударов очень велико. Например, число ударов молекул воздуха, находящегося в комнате, о поверхность площадью 1 см^2 за 1 с , выражается двадцатитрехзначным числом. Хотя сила удара одной молекулы мала, но действие всех молекул на стенки сосуда значительно, оно и составляет давление газа.

Итак, давление газа на стенки сосуда и на помещенное в газ тело вызывается ударами молекул газа.

Жидкость

Жидкость — вещество в состоянии, промежуточном между твердым и газообразным. Это агрегатное состояние вещества, в котором молекулы (или атомы) связаны между собой настолько, что это позволяет ему сохранять свой объем, но недостаточно сильно, чтобы сохранять и форму.

Свойства жидкостей. Жидкости легко меняют свою форму, но сохраняют объем. В обычных условиях они принимают форму сосуда, в котором находятся.

Поверхность жидкости, не соприкасающаяся со стенками сосуда, называется *свободной поверхностью*. Она образуется в результате действия силы тяжести на молекулы жидкости.

Строение жидкостей. Свойства жидкостей объясняются тем, что промежутки между их молекулами малы: молекулы в жидкостях упакованы так плотно, что расстояние между каждыми двумя молекулами меньше размеров молекул. Объяснение поведения жидкостей на основе характера молекулярного движения жидкости было дано советским ученым Я. И. Френкелем. Оно заключается в следующем. Молекула жидкости колеблется около положения временного равновесия, сталкиваясь с другими молекулами из ближайшего окружения. Время от времени ей удается совершить «прыжок», чтобы покинуть своих соседей из ближайшего окружения и продолжать совершать колебания уже среди других соседей. Время оседлой жизни молекулы воды, т. е. вре-

мая колебания около одного положения равновесия при комнатной температуре, равно в среднем 10^{-11} с. Время одного колебания значительно меньше — 10^{-12} – 10^{-13} с.

Поскольку расстояния между молекулами жидкости малы, то попытка уменьшить объем жидкости приводит к деформации молекул, они начинают отталкиваться друг от друга, чем и объясняется малая сжимаемость жидкости. Текучесть жидкости объясняется тем, что «прыжки» молекул из одного оседлого положения в другое происходят по всем направлениям с одинаковой частотой. Внешняя сила не меняет заметным образом число «прыжков» в секунду, она лишь задает их преимущественное направление, чем и объясняется текучесть жидкости и то, что она принимает форму сосуда.

Твердое тело. Кристаллические и аморфные тела

Твердое тело — агрегатное состояние вещества, характеризующееся постоянством формы и характером движения атомов, которые совершают малые колебания около положений равновесия.

Кристаллические тела. Твердое тело в обычных условиях трудно сжать или растянуть. Для придания твердым телам нужной формы или объема на заводах и фабриках их обрабатывают на специальных станках: токарных, строгальных, шлифовальных.

В отсутствие внешних воздействий твердое тело сохраняет свою форму и объем.

Это объясняется тем, что притяжение между атомами (или молекулами) у них больше, чем у жидкостей (и тем более газов). Оно достаточно, чтобы удерживать атомы около положений равновесия.

Молекулы или атомы большинства твердых тел, таких, как лед, соль, алмаз, металлы, расположены в определенном порядке. Такие твердые тела называют *кристаллическими*. Хотя частицы этих тел и находятся в движении, движения эти представляют собой колебания около определенных точек (положений равновесия). Частицы не могут уйти далеко от этих точек, поэтому твердое тело сохраняет свою форму и объем.

Кроме того, в отличие от жидкостей, точки положений равновесия атомов или ионов твердого тела, будучи соединенными, располагаются в вершинах правильной пространственной решетки, которая называется *кристаллической*.

Положения равновесия, относительно которых происходят тепловые колебания частиц, называются *узлами кристаллической решетки*.

Монокристалл — твердое тело, частицы которого образуют единую кристаллическую решетку (одионый кристалл).

Анизотропия монокристаллов. Одним из главных свойств монокристаллов, которым они отличаются от жидкостей и газов, является анизотропия их физических свойств. Под *анизотропией* понимают зависимость физических свойств от направления в кристалле. Анизотропными являются механические свойства (например, известно, что слюду легко расслоить в одном направлении и очень трудно — в перпендикулярном), электрические свойства (электропроводность многих кристаллов зависит от направления), оптические свойства (явление двойного лучепреломления, и дихроизма — анизотропии поглощения; так, например, монокристалл турмалина «окрашен» в разные цвета — зеленый и бурый, в зависимости от того, с какой стороны на него посмотреть).

Поликристалл — твердое тело, состоящее из беспорядочно ориентированных монокристаллов. Поликристаллическими являются большинство твердых тел, с которыми мы имеем дело в быту — соль, сахар, различные металлические изделия. Беспорядочная ориентация сросшихся микрокристалликов, из которых они состоят, приводит к исчезновению анизотропии свойств.

Аморфные тела. Кроме кристаллических, к твердым телам относят также аморфные тела. Аморфный в переводе с греческого означает «бесформенный».

Аморфные тела — это твердые тела, для которых характерно неупорядоченное расположение частиц в пространстве.

В этих телах молекулы (или атомы) колеблются около хаотически расположенных точек и, подобно молекулам жидкости, имеют определенное время оседлой жизни. Но, в отличие от жидкостей, время это у них очень велико.

К аморфным телам относятся стекло, янтарь, различные другие смолы, пластмассы. Хотя при комнатной температуре эти тела сохраняют свою форму, но при повышении температуры они постепенно размягчаются и начинают течь, как жидкости: *у аморфных тел нет определенной температуры плавления*.

Этим они отличаются от кристаллических тел, которые при повышении температуры переходят в жидкое состояние не постепенно, а скачком (при вполне определенной температуре — *температуре плавления*).

Все аморфные тела *изотропны*, т. е. имеют одинаковые физические свойства по разным направлениям. При ударе они ведут себя как твердые тела — раскалываются, а при очень длительном воздействии — текут.

В настоящее время есть много веществ в аморфном состоянии, полученных искусственным путем, например, аморфные и стеклообразные полупроводники, магнитные материалы и даже металлы.

2.1.4. Модель идеального газа в МКТ

Идеальный газ — это теоретическая модель газа, в которой пренебрегают размерами и взаимодействиями частиц газа и учитывают лишь их упругие столкновения.

Другими словами, предполагается, что внутренняя энергия идеального газа определяется лишь кинетической энергией его частиц (т. е. потенциальной энергией взаимодействия молекул пренебрегают).

Модель идеального газа была предложена в 1847 г. Дж. Герепатом. На основе этой модели были теоретически выведены газовые законы (закон Бойля–Мариотта, закон Гей–Люссака, закон Шарля, закон Авогадро), которые ранее были установлены экспериментально. Модель идеального газа была положена в основу молекулярно-кинетической теории газа.

Основными законами идеального газа являются *уравнение состояния* и *закон Авогадро*, в которых впервые были связаны макрохарактеристики газа (давление, температура, масса) с массой молекулы (уравнение Менделеева–Клапейрона, или уравнение состояния идеального газа).

В современной физике ее используют также для описания ансамблей любых слабо взаимодействующих частиц. Модель идеального газа справедлива для реальных классических газов при достаточно высоких температурах и разрежениях, когда среднее расстояние между молекулами много больше размеров самих молекул. В этом случае силами притяжения можно пренебречь. Силы же отталкивания проявляются лишь при столкновении друг с другом в течение ничтожно малых интервалов времени.

В простейшей модели газа молекулы рассматриваются как очень маленькие твердые шарики, обладающие массой. Движение отдельных молекул подчиняется законам механики Ньютона. Конечно, не все процессы в разреженных газах можно объяснить с помощью такой модели, однако давление газа вычислить с ее помощью можно.

2.1.5. Основное уравнение МКТ (давление газа)

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории устанавливает связь между давлением идеального газа и средней кинетической энергией его молекул.

Вывод основного уравнения МКТ основывается на допущениях модели идеального газа и утверждении: *давление газа является результатом ударов молекул о стенку сосуда*.

Определим давление газа на стенку площадью S сосуда $ABCD$ (рис. 2.2).

Каждая молекула массой m_0 , отскакивая от стенки после упругого соударения со стенкой, передает ей импульс $2m_0v_x$, где v_x — проекция скоро-

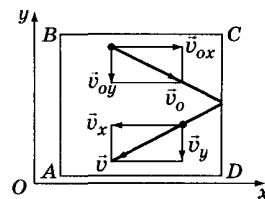


Рис. 2.2

сти молекулы $\vec{v}$ на ось Ox , перпендикулярную стенке. Всего за одну секунду суммарный импульс, получаемый стенкой от всех молекул, равен $2m_0v_xZ$, где Z — число таких столкновений (за 1 с) всех молекул. Очевидно, что $Z \sim n = \frac{N}{V}$, где n — концентрация молекул в единице объема; N — число всех молекул. Число Z пропорционально также скорости молекул v_x и площади стенки S : $Z \sim nv_xS$. Поскольку все направления при хаотичном движении молекул газа равновероятны, то из всех молекул, имеющих составляющую скорости v_x , только половина движется в сторону стенки CD , вторая половина — в сторону AB (т. е. в обратную). Поэтому $Z = \frac{1}{2}nv_xS$, а полный импульс, переданный стенке за 1 с, равен $2m_0v_xZ = m_0nv_x^2S$. Поскольку изменение импульса точки (тела) за единицу времени равно действующей на него силе $F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t}$, то $F = m_0nv_x^2S$. В действительности, поскольку речь идет о большом количестве молекул, движущихся с разными скоростями, силу следует усреднить: $\bar{F} = \overline{m_0nv_x^2S}$.

Сила эта зависит, таким образом, от среднего квадрата скорости $\overline{v_x^2}$.

Поскольку вследствие хаотичности движения все направления равноправны, то:

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}. \quad (2.5)$$

С другой стороны, известно, что квадрат модуля любого вектора равен сумме квадратов его проекций на оси координат, поэтому:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2.$$

Усредняя это выражение по всем молекулам и учитывая (2.5), получим:

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2} = 3\overline{v_x^2}.$$

Отсюда:

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}.$$

С учетом последней формулы $\bar{F} = \frac{1}{3}nm_0\overline{v^2}S$.

Следовательно, давление на стенку сосуда равно:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{1}{3}m_0n\overline{v^2}. \quad (2.6)$$

Это основное уравнение молекулярно-кинетической теории. Это уравнение — первое количественное соотношение, полученное в МКТ.

Уравнение (2.6) позволяет получить связь между давлением и средней кинетической энергией

$$\text{молекул } \bar{E}_k = \frac{m_0\overline{v^2}}{2};$$

$$p = \frac{2}{3}n\bar{E}_k. \quad (2.7)$$

Давление идеального газа равно двум третям средней кинетической энергии поступательного движения молекул, содержащихся в единице объема.

Важно подчеркнуть, что здесь речь идет о средней кинетической энергии молекул газа. Это означает, что давление газа — величина, органически связанная с тем, что газ состоит из боль-

шого числа молекул. Нет смысла говорить о давлении, создаваемом несколькими молекулами. Давление газа — понятие, имеющее статистический характер (так называют понятия, имеющие смысл только для систем с очень большим числом частиц).

2.1.6. Температура и ее измерение

Температура — физическая величина, характеризующая тепловое состояние тел.

В окружающем нас мире происходят различные явления, связанные с нагреванием и охлаждением тел. Их называют *тепловыми явлениями*. Так, при нагревании холодная вода сначала становится теплой, а затем горячей; вынутая из пламени металлическая деталь постепенно охлаждается и т. д. Степень нагретости тела, или его тепловое состояние, мы обозначаем словами «теплый», «холодный», «горячий». Для количественной оценки этого состояния и служит *температура*.

Температура — один из макроскопических параметров системы. В физике тела, состоящие из очень большого числа атомов или молекул, называют *макроскопическими*. Размеры макроскопических тел во много раз превышают размеры атомов. Все окружающие тела — от стола или газа в воздушном шарике до песчинки — макроскопические тела.

Величины, характеризующие состояние макроскопических тел без учета их молекулярного строения, называют *макроскопическими параметрами*. К ним относятся объем, давление, температура, концентрация частиц, масса, плотность, намагниченность и т. д. Температура — один из важнейших макроскопических параметров системы (газа, в частности).

Температура — характеристика теплового равновесия системы.

Известно, что для определения температуры среды следует поместить в эту среду термометр и подождать до тех пор, пока температура термометра не перестанет изменяться, приняв значение, равное температуре окружающей среды. Другими словами, необходимо некоторое время для установления между средой и термометром теплового равновесия.

Тепловым, или термодинамическим, равновесием называют такое состояние, при котором все макроскопические параметры сколь угодно долго остаются неизменными. Это означает, что не меняются объем и давление в системе, не происходят фазовые превращения, не меняется температура.

Однако микроскопические процессы при тепловом равновесии не прекращаются: скорости молекул меняются, они перемещаются, сталкиваются.

Любое макроскопическое тело или группа макроскопических тел — *термодинамическая система* — может находиться в различных состояниях теплового равновесия. В каждом из этих состояний температура имеет свое вполне определенное значение. Другие величины могут иметь разные (но постоянные) значения. Например, давление сжатого газа в баллоне будет отличаться от давления в помещении и при температурном равновесии всей системы тел в этом помещении.

Температура характеризует состояние теплового равновесия макроскопической системы: во всех частях системы, находящихся в состоянии теплового равновесия, температура имеет одно и то же значение (это единственный макроскопический параметр, обладающий таким свойством).

Если два тела имеют одинаковую температуру, между ними не происходит теплообмен, если разную — теплообмен происходит, причем тепло передается от более нагретого тела к менее нагретому до полного выравнивания температур.

Измерение температуры основано на зависимости какой-либо физической величины (например, объема) от температуры. Эта зависимость и используется в температурной шкале термометра — прибора, служащего для измерения температуры.

Действие термометра основано на тепловом расширении вещества. При нагревании столбик используемого в термометре вещества (например, ртути или спирта) увеличивается, при охлаждении — уменьшается. Используемые в быту термометры позволяют выразить температуру вещества в градусах Цельсия (°C).

А. Цельсий (1701–1744) — шведский ученый, предложивший использовать стоградусную шкалу температур. В температурной шкале Цельсия за нуль (с середины XVIII в.) принимается

температура тающего льда, а за 100 градусов — температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении.

Поскольку различные жидкости расширяются с повышением температуры по-разному, то температурные шкалы в термометрах с разными жидкостями различны.

Поэтому в физике используют *идеальную газовую шкалу температур*, основанную на зависимости объема (при постоянном давлении) или давления (при постоянном объеме) газа от температуры.

2.1.7. Шкала абсолютных температур

Согласно основному уравнению МКТ, давление p прямо пропорционально средней кинетической энергии $\bar{E}$ поступательного движения молекул:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}, \quad (2.8)$$

где n — объемная концентрация молекул. Заменив в (2.8) n отношением числа молекул N к объему газа V $\left(n = \frac{N}{V} \right)$, получим:

$$\frac{pV}{N} = \frac{2}{3} \bar{E}. \quad (2.9)$$

В состоянии теплового равновесия при постоянном объеме средняя кинетическая энергия данной массы газа должна иметь вполне определенное значение, как и температура. Согласно формуле (2.9), это означает, что отношение $\frac{pV}{N}$ для данной температуры должно быть одним и тем же для любых идеальных газов. То, что это действительно так, было подтверждено экспериментально для разных газов, находящихся в условиях теплового равновесия при постоянном объеме (изменялось давление).

Абсолютная температура

Таким образом, величина $\Theta = \frac{pV}{N}$, которую, в отличие от микропараметра $\bar{E}$, легко измерить, является вполне однозначной характеристикой теплового состояния газа, как и температура. Измеряется Θ (как и энергия) в джоулях. Зависит она только от температуры и может рассматриваться как естественная мера температуры. Однако в силу укоренившейся привычки измерять температуру в градусах был введен коэффициент пропорциональности k между температурой Θ , выраженной в энергетических единицах, и температурой T , выраженной в градусах:

$$\Theta = kT, \quad (2.10)$$

или

$$\frac{pV}{N} = kT. \quad (2.11)$$

Температура T , определяемая равенством (2.10), называется *абсолютной температурой*.

Абсолютный нуль температуры

Значения температуры, определенной по формуле (2.9), всегда положительны в силу положительности $\Theta = \frac{pV}{N}$ (ни давление, ни объем, ни число частиц отрицательными быть не могут).

Поэтому минимальным значением температуры является нуль. Температура может равняться нулю, если давление либо объем равны нулю. Из принятого определения температуры следует, что нулем температуры является температура, при которой прекращается хаотическое движение молекул. Она называется *абсолютным нулем температуры*.

Температура, как и давление, определяется средней кинетической энергией молекул идеального газа. Поэтому температура, как и давление, является *статистической* величиной (статистической называется величина, имеющая смысл только для систем, содержащих очень большое число частиц). Нельзя говорить о температуре одной или нескольких молекул.

Абсолютную шкалу температур ввел английский ученый У. Кельвин в 1850 г. Нулевая температура по абсолютной шкале (ее называют также шкалой Кельвина) соответствует абсолютному нулю, а каждая единица температуры по этой шкале равна градусу по шкале Цельсия.

Единица абсолютной температуры является одной из семи основных единиц СИ и измеряется в *кельвинах* (обозначается буквой К).

Связь между температурами, измеренными по шкалам Цельсия t и Кельвина T , описывается формулой:

$$T(\text{К}) = t(^{\circ}\text{С}) + 273,15 \text{ К}.$$

Абсолютный нуль равен $-273,15^{\circ}\text{С}$. Как правило, при расчетах пользуются округленным значением абсолютного нуля (-273°С).

Постоянная Больцмана

Коэффициент пропорциональности k в формуле (2.10) называется постоянной Больцмана в честь Л. Больцмана, одного из основателей молекулярно-кинетической теории газа. Этот коэффициент *составляет* $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Постоянная Больцмана связывает температуру Θ в энергетических единицах с температурой T в кельвинах. Это одна из наиболее важных постоянных в молекулярно-кинетической теории.

2.1.8. Температура как мера кинетической энергии

Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории, записанного в форме (2.9)

$$\frac{pV}{N} = \frac{2}{3} \bar{E},$$

и определения абсолютной температуры согласно (2.11)

$$\frac{pV}{N} = kT,$$

получим:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT.$$

Средняя кинетическая энергия хаотического поступательного движения молекул газа пропорциональна абсолютной температуре.

Из полученного результата однозначно следует, что *абсолютная температура есть мера средней кинетической энергии движения молекул*.

Соотношение между температурой и кинетической энергией справедливо не только для разреженных газов (идеальных газов), но также для любых тел, подчиняющихся законам механики Ньютона. Оно справедливо и для жидкостей, и для твердых тел, атомы которых колеблются около положения равновесия.

Из формулы (2.7) может быть получена зависимость давления газа от абсолютной температуры T и концентрации его молекул, если воспользоваться выражением для средней кинетической энергии:

$$p = nkT, \quad (2.12)$$

где k — постоянная Больцмана.

Из формулы (2.12) очевидно, что при одинаковых давлениях и температурах концентрация молекул у всех газов одинакова.

Отсюда следует известный **закон Авогадро**: *в равных объемах газов при одинаковых температурах и давлениях содержится одинаковое число молекул.*

Средняя скорость теплового движения молекул может быть также выражена через абсолютную температуру, если в формуле

$$\overline{E} = \frac{3}{2} kT.$$

заменить $\overline{E}$ на $\frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$:

$$\frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT \rightarrow \overline{v^2} = 3 \frac{kT}{m_0}.$$

Квадратный корень из этой величины называется *средней квадратичной скоростью*:

$$\overline{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

2.1.9. Уравнение Менделеева-Клапейрона (уравнение состояния идеального газа)

Уравнение состояния идеального газа — это зависимость между параметрами идеального газа — давлением p , объемом V и абсолютной температурой T , определяющими его состояние:

$$pV = \nu RT, \quad (2.13)$$

где ν зависит от массы газа m и его молекулярной массы M . В таком виде уравнения впервые получено в 1834 г. французским ученым Б. П. Э. Клапейроном и называется уравнением Клапейрона.

В 1874 г. Д. И. Менделеев вывел уравнение состояния для одного моля идеального газа: $pV = RT$, где R — универсальная газовая постоянная. Если молярная масса газа — M , то:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (2.14)$$

Уравнение состояния в форме (2.14) называется *уравнением Клапейрона–Менделеева*. Оно объединяет газовые законы Гей-Люссака, Бойля–Мариотта, Авогадро, Шарля.

Уравнение состояния (2.14) может быть получено из зависимости давления от температуры $p = nkT$ (2.12), если в нее подставить концентрацию молекул n из выражения

$$n = \frac{N}{V} = \frac{1}{V} \cdot \frac{m}{M} N_A, \quad (2.15)$$

где N_A — постоянная Авогадро, N — число молекул в теле.

В результате получим:

$$pV = \frac{m}{M} k N_A T, \quad (2.16)$$

где $kN_A = R$ — универсальная газовая постоянная, равная $8,31 \cdot 10^{-23}$ Дж/моль·К; k — постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Заменяя в (2.16) kN_A на R , получаем уравнение состояния в виде (2.14). Отношение уравнений (2.14) или (2.13) при двух наборах параметров p_1, V_1, T_1 и p_2, V_2, T_2 дает:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{const.}$$

2.1.10. Изопроцессы в газах

Изопроцессами называются процессы, протекающие при неизменном значении одного из параметров: давления (p), объема (V), температуры (T).

В идеальном газе эти процессы подчиняются газовым законам.

Газовыми законами называются количественные зависимости между двумя параметрами газа при фиксированном значении третьего параметра.

Закон Бойля-Мариотта

Закон Бойля-Мариотта — один из основных газовых законов, он описывает изотермические процессы в газе.

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянной температуре называется *изотермическим*.

Закон гласит:

Для данной массы произведение давления газа на его объем постоянно, если температура газа не меняется.

$$pV = \text{const при } T = \text{const.}$$

Этот закон был экспериментально открыт английским ученым Р. Бойлем в 1662 г., в 1676 г. его сформулировал также французский ученый Э. Мариотт.

Закон строго выполняется только для идеальных газов. Для реальных газов он выполняется достаточно хорошо при небольших давлениях и высоких температурах. Так, при давлении 100 атм и температуре 0°C отклонение измеренного значения pV от расчетного составляет 7%. Закон Бойля-Мариотта, как и другие газовые законы, является следствием уравнения состояния идеального газа.

Графики зависимости $p(V)$ при $T = \text{const}$ ($p = \text{const}/V$) называются *изотермами* и представляют собой равнобочные гиперболы (площади $S_1 = S_2$). Чем выше температура, тем выше лежит соответствующая ей изотерма (рис. 2.3).

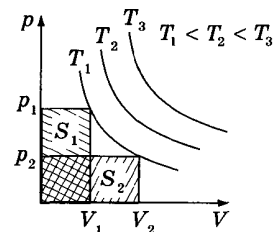


Рис. 2.3

Закон Шарля

Давление p данной массы газа при постоянном объеме пропорционально температуре.

$$p = \text{const } T \text{ при } V = \text{const.} \quad (2.17)$$

Закон был открыт французским физиком Ж. Шарлем в 1787 году.

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном объеме называется *изохорным* (от греч. *hora* — пространство).

Закон Шарля, как и другие газовые законы, является следствием *уравнения состояния идеального газа*:

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

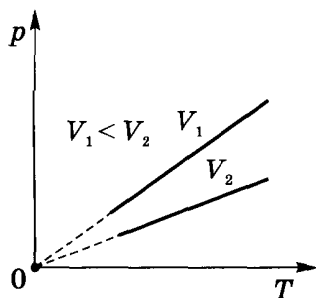


Рис. 2.4

Закон Гей-Люссака

При постоянном давлении p объем V идеального газа меняется линейно с температурой.

То есть

$$V = V_0 (1 + \alpha t), \quad (2.18)$$

где V_0 — начальный объем, t — разность начальной и конечной температур. Коэффициент теплового расширения идеальных газов $\alpha = (1/273,15)K^{-1}$ одинаков для всех газов.

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном давлении называется *изобарным* (от греч. *baros* — вес, тяжесть).

Закон открыт французским ученым Ж. Гей-Люссаком в 1802 г. и независимо от него Дж. Далтоном в 1801 г.

Закон Гей-Люссака, как и другие газовые законы, является следствием уравнения состояния идеального газа. Это становится очевидным, если в (2.18) заменить t на абсолютную температуру $T = t + 273,15$, а коэффициент расширения α — его численным значением $1/273,15$:

$$V = V_0 \frac{T}{273,15}$$

или

$$\frac{V}{T} = \text{const} \quad \text{при } p = \text{const}. \quad (2.19)$$

Для газа данной массы отношение объема к температуре постоянно, если давление газа не меняется.

Согласно (2.19), объем газа линейно зависит от температуры при постоянном давлении:

$$V = \text{const } T.$$

Эта зависимость графически изображается прямой, которая называется *изобарой* (рис. 2.5).

Различным давлениям соответствуют разные изобары. С ростом давления объем газа при постоянной температуре, согласно закону Бойля–Мариотта, уменьшается, поэтому изобара, соответствующая более высокому давлению p_2 , лежит ниже изобары, соответствующей более низкому давлению p_1 .

В области низких температур все изобары идеального газа сходятся в точке $T = 0$, но это не означает, что объем реального газа действительно обращается в нуль. При низких температурах все газы обращаются в жидкости, а к жидкостям уравнение состояния не применимо.

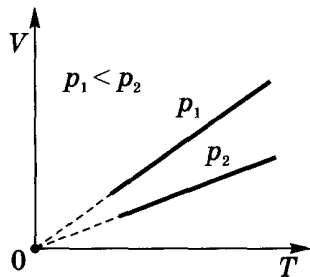


Рис. 2.5

2.1.11. Свойства тел в разных агрегатных состояниях

Агрегатные состояния вещества (от лат. *aggrego* — присоединяю) — это состояния одного и того же вещества в различных интервалах (промежутках) температур и давлений.

Агрегатными состояниями принято считать *газообразное, жидкое и твердое*.

Самыми простыми примерами существования одного и того же вещества в этих трех агрегатных состояниях, которые наблюдаются в повседневной жизни, являются лед, вода и водяной пар. Невидимый водяной пар всегда присутствует и в окружающем нас воздухе. Вода существует в интервале температур от 0°C до 100°C , лед — при температуре ниже 0°C . При температуре выше 100°C и нормальном атмосферном давлении молекулы воды существуют только в газообразном состоянии — в виде водяного пара. Вода, лед и водяной пар — это одно и то же вещество с химической формулой H_2O .

Многие вещества в обыденной жизни мы наблюдаем только в одном из агрегатных состояний. Так, кислород в окружающем нас воздухе представляет собой газ. Но при температуре -193°C он превращается в жидкость. Охладив эту жидкость до -219°C , мы получим твердый кислород. И наоборот, железо в обычных условиях твердое. Однако при температуре 1535°C железо плавится и превращается в жидкость. Над расплавленным железом будет находиться газ — пар из атомов железа.

Различные агрегатные состояния существуют у каждого вещества. Отличаются эти вещества не молекулами, а тем, как эти молекулы расположены и как движутся. Расположение молекул воды в трех агрегатных состояниях показано на рис. 2.6.

Переход из одного агрегатного состояния в другое. При определенных условиях вещества могут переходить из одного агрегатного состояния в другое. Все возможные при этом превращения отображены на рис. 2.7.

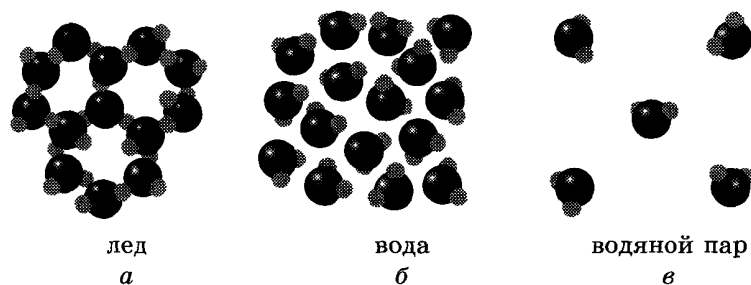


Рис. 2.6

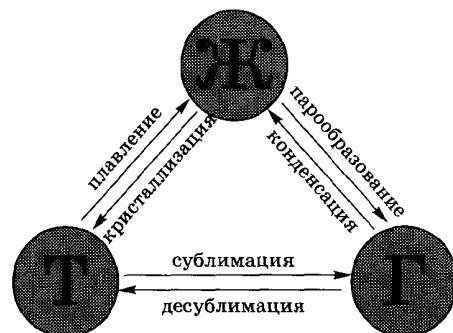


Рис. 2.7

Всего различают шесть процессов, при которых происходят агрегатные превращения вещества.

Переход вещества из твердого (кристаллического) состояния в жидкое называется *плавлением*, обратный процесс называется *кристаллизацией*, или *отвердеванием*. Пример плавления — таяние льда, обратный процесс происходит при замерзании воды.

Переход вещества из жидкого состояния в газообразное называется *парообразованием*, обратный процесс называется *конденсацией*. Пример парообразования — испарение воды, обратный процесс можно наблюдать при выпадении росы.

Переход вещества из твердого состояния сразу в газообразное (минуя жидкое) называется *сублимацией*, или *возгонкой*, обратный процесс называется *десублимацией*. Например, графит можно нагреть до тысячи, двух тысяч и даже трех тысяч градусов и, тем не менее, в жидкость он не превратится: он будет сублимироваться, т. е. из твердого состояния сразу переходить в газообразное. Непосредственно в газообразное состояние (минуя жидкое) переходит и так называемый сухой лед (твердый оксид углерода CO_2), который можно увидеть в контейнерах для транспортировки мороженого. Все запахи, которыми обладают твердые тела (например, нафталин), также обусловлены возгонкой: вылетая из твердого тела, молекулы образуют над ним газ (или пар), обладающий запахом.

Примером десублимации является образование на окнах зимой узоров из кристалликов льда. Эти красивые узоры образуются при десублимации водяного пара, находящегося в воздухе.

Переходы вещества из одного агрегатного состояния в другое играют важную роль не только в природе, но и в технике. Так, воду, превращенную в пар, можно использовать в паровых турбинах на электростанциях. Из расплавленных металлов на заводах получают различные сплавы: сталь, чугун, латунь и т. д. Для понимания этих процессов надо знать, что происходит с веществом при изменении его агрегатного состояния и при каких условиях это изменение возможно.

2.1.12. Испарение и конденсация

Испарение

Испарение — это переход вещества из жидкого состояния в газообразное (пар), происходящее со свободной поверхности жидкости.

Сублимацию, или возгонку, т. е. переход вещества из твердого состояния в газообразное, также называют испарением.

Из повседневных наблюдений известно, что количество любой жидкости (бензина, эфира, воды), находящейся в открытом сосуде, постепенно уменьшается. Жидкость не исчезает бесследно — она превращается в пар. Испарение — это один из видов *парообразования*. Другой вид — это кипение.

Механизм испарения. Как происходит испарение? Молекулы любой жидкости находятся в непрерывном и беспорядочном движении, причем чем выше температура жидкости, тем больше кинетическая энергия молекул. Среднее значение кинетической энергии имеет определенную величину. Но у каждой молекулы кинетическая энергия может быть как больше, так и меньше средней. Если вблизи поверхности окажется молекула с кинетической энергией, достаточной для преодоления сил межмолекулярного притяжения, она вылетит из жидкости. То же самое повторится с другой быстрой молекулой, со второй, третьей и т. д. Вылетая наружу, эти молекулы образуют над жидкостью пар. Образование этого пара и есть испарение.

Поглощение энергии при испарении. Поскольку при испарении из жидкости вылетают более быстрые молекулы, средняя кинетическая энергия оставшихся в жидкости молекул становится все меньше и меньше. Это значит, что внутренняя энергия испаряющейся жидкости уменьшается. Поэтому если нет притока энергии к жидкости извне, температура испаряющейся жидкости понижается, жидкость охлаждается (именно поэтому, в частности, человеку в мокрой одежде холоднее, чем в сухой, особенно при ветре).

Однако при испарении воды, налитой в стакан, мы не замечаем понижения ее температуры. Чем это объяснить? Дело в том, что испарение в данном случае происходит медленно, и температура воды поддерживается постоянной за счет теплообмена с окружающим воздухом, из которого в жидкость поступает необходимое количество теплоты. Значит, *чтобы испарение жидкости происходило без изменения ее температуры, жидкости необходимо сообщать энергию.*

Количество теплоты, которое необходимо сообщить жидкости для образования единицы массы пара при постоянной температуре, называется *теплотой парообразования*.

Скорость испарения жидкости. В отличие от *кипения* испарение происходит при любой температуре, однако с повышением температуры жидкости скорость испарения возрастает. Чем выше температура жидкости, тем больше быстро движущихся молекул имеет достаточную кинетическую энергию, чтобы преодолеть силы притяжения соседних частиц и вылететь за пределы жидкости, и тем быстрее идет испарение.

Скорость испарения зависит от рода жидкости. Быстро испаряются летучие жидкости, у которых силы межмолекулярного взаимодействия малы (например, эфир, спирт, бензин). Если капнуть такой жидкостью на руку, мы ощутим холод. Испаряясь с поверхности руки, такая жидкость будет охлаждаться и отбирать у нее некоторое количество теплоты.

Скорость испарения жидкости зависит от площади ее свободной поверхности. Это объясняется тем, что жидкость испаряется с поверхности, и чем больше площадь свободной поверхности жидкости, тем большее количество молекул одновременно вылетает в воздух.

В открытом сосуде масса жидкости вследствие испарения постепенно уменьшается. Это связано с тем, что большинство молекул пара рассеивается в воздухе, не возвращаясь в жидкость (в отличие от того, что происходит в закрытом сосуде). Но небольшая часть их возвращается в жидкость, замедляя тем самым испарение. Поэтому при ветре, который уносит молекулы пара, испарение жидкости происходит быстрее.

Применение в технике. Испарение играет важную роль в энергетике, холодильной технике, в процессах сушки, испарительного охлаждения. Например, в космической технике быстроиспаряющимися веществами покрывают спускаемые аппараты. При прохождении через атмосферу планеты корпус аппарата в результате трения нагревается, и покрывающее его вещество начинает испаряться. Испаряясь, оно охлаждает космический аппарат, спасая его тем самым от перегрева.

Конденсация

Конденсация (от лат. *condensatio* — уплотнение, сгущение) — переход вещества из газообразного состояния (пара) в жидкое или твердое состояние.

Известно, что при наличии ветра жидкость испаряется быстрее. Почему? Дело в том, что одновременно с испарением с поверхности жидкости идет и конденсация. Конденсация происходит из-за того, что часть молекул пара, беспорядочно перемещаясь над жидкостью, снова возвращается в нее. Ветер же выносит вылетевшие из жидкости молекулы и не дает им возвращаться.

Конденсация может происходить и тогда, когда пар не соприкасается с жидкостью. Именно конденсацией объясняется, например, образование облаков: молекулы водяного пара, поднимающиеся над землей, в более холодных слоях атмосферы группируются в мельчайшие капельки воды, скопления которых и представляют собой облака. Следствием конденсации водяного пара в атмосфере являются также дождь и роса.

При испарении жидкость охлаждается и, став более холодной, чем окружающая среда, начинает поглощать ее энергию. При конденсации же, наоборот, происходит выделение некоторого количества теплоты в окружающую среду, и ее температура несколько повышается. Количество теплоты, выделяющееся при конденсации единицы массы, равно теплоте испарения.

2.1.13. Насыщенные и ненасыщенные пары

Насыщенный пар

При испарении одновременно с переходом молекул из жидкости в пар происходит и обратный процесс. Беспорядочно двигаясь над поверхностью жидкости, часть молекул, покинувших ее, снова возвращается в жидкость.

Если испарение происходит в закрытом сосуде, то сначала число молекул, вылетевших из жидкости, будет больше числа молекул, возвратившихся обратно в жидкость. Поэтому плотность пара в сосуде будет постепенно увеличиваться. С увеличением плотности пара увеличивается и число молекул, возвращающихся в жидкость. Довольно скоро число молекул, вылетающих из жидкости, станет равным числу молекул пара, возвращающихся обратно в жидкость. С этого момента число молекул пара над жидкостью будет постоянным. Для воды при комнатной температуре это число приблизительно равно 10^{22} молекул за 1 с на 1 см^2 площади поверхности. Наступает так называемое *динамическое равновесие* между паром и жидкостью.

Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называется насыщенным паром.

Это означает, что в данном объеме при данной температуре не может находиться большее количество пара.

При динамическом равновесии масса жидкости в закрытом сосуде не изменяется, хотя жидкость продолжает испаряться. Точно так же не изменяется и масса насыщенного пара над этой жидкостью, хотя пар продолжает конденсироваться.

Давление насыщенного пара. При сжатии насыщенного пара, температура которого поддерживается постоянной, равновесие сначала начнет нарушаться: плотность пара возрастет, и вследствие этого из газа в жидкость будет переходить больше молекул, чем из жидкости в газ; продолжаться это будет до тех пор, пока концентрация пара в новом объеме не станет прежней, соответствующей концентрации насыщенного пара при данной температуре (и равновесие восстановится). Объясняется это тем, что число молекул, покидающих жидкость за единицу времени, зависит только от температуры.

Итак, концентрация молекул насыщенного пара при постоянной температуре не зависит от его объема.

Поскольку давление газа пропорционально концентрации его молекул, то и давление насыщенного пара не зависит от занимаемого им объема. Давление p_0 , при котором жидкость находится в равновесии со своим паром, называют *давлением насыщенного пара*.

При сжатии насыщенного пара большая его часть переходит в жидкое состояние. Жидкость занимает меньший объем, чем пар той же массы. В результате объем пара при неизменной его плотности уменьшается.

Зависимость давления насыщенного пара от температуры. Для идеального газа справедлива линейная зависимость давления от температуры при постоянном объеме. Применительно к насыщенному пару с давлением p_0 эта зависимость выражается равенством:

$$p_0 = nkT. \quad (2.20)$$

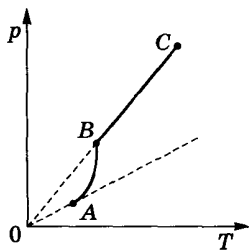


Рис. 2.8

Так как давление насыщенного пара не зависит от объема, то, следовательно, оно зависит только от температуры.

Экспериментально определенная зависимость $p_0(T)$ отличается от зависимости (2.20) для идеального газа (рис. 2.8). С увеличением температуры давление насыщенного пара растет быстрее, чем давление идеального газа (участок кривой AB на рис. 2.8). Это становится особенно очевидным, если провести изохору через точку A (пунктирная прямая). Происходит это потому, что при нагревании жидкости часть ее превращается в пар, и плотность пара растет. Поэтому, согласно формуле (2.20), *давление насыщенного пара растет не только в результате повышения температуры жидкости, но и вследствие увеличения концентрации молекул (плотности) пара*. Главное различие в поведении идеального газа и насыщенного пара заключается в изменении массы пара при изменении температуры при неизменном объеме (в закрытом сосуде) или при изменении объема при постоянной температуре. С идеальным газом ничего подобного происходить не может (МКТ идеального газа не предусматривает фазового перехода газа в жидкость).

После испарения всей жидкости поведение пара будет соответствовать поведению идеального газа (участок BC кривой на рис. 2.8).

Ненасыщенный пар

Если в пространстве, содержащем пары какой-либо жидкости, может происходить дальнейшее испарение этой жидкости, то пар, находящийся в этом пространстве, является *ненасыщенным*.

Пар, не находящийся в состоянии равновесия со своей жидкостью, называется ненасыщенным.

Ненасыщенный пар можно простым сжатием превратить в жидкость. Как только это превращение началось, пар, находящийся в равновесии с жидкостью, становится насыщенным.

2.1.14. Кипение жидкости

Кипение — это интенсивный переход жидкости в пар, происходящий с образованием пузырьков пара по всему объему жидкости при определенной температуре.

В отличие от испарения, которое происходит при любой температуре жидкости, другой вид парообразования — кипение — возможен лишь при совершенно определенной (при данном давлении) температуре — *температуре кипения*.

При нагревании воды в открытом стеклянном сосуде можно увидеть, что по мере увеличения температуры стенки и дно сосуда покрываются мелкими пузырьками. Они образуются в результате расширения мельчайших пузырьков воздуха, которые существуют в углублениях и микротрещинах не полностью смачиваемых стенок сосуда.

Пары жидкости, которые находятся внутри пузырьков, являются насыщенными. С ростом температуры давление насыщенных паров возрастает, и пузырьки увеличиваются в размерах. С увеличением объема пузырьков растет и действующая на них выталкивающая (архимедова) сила. Под действием этой силы наиболее крупные пузырьки отрываются от стенок сосуда и поднимаются вверх. Если верхние слои воды еще не успели нагреться до 100°C , то в такой (более холодной) воде часть водяного пара внутри пузырьков конденсируется и уходит в воду; пузырьки при этом сокращаются в размерах, и сила тяжести заставляет их снова опускаться вниз. Здесь они опять увеличиваются и вновь начинают всплывать вверх. Попеременное увеличение и уменьшение пузырьков внутри воды сопровождается возникновением в ней характерных звуковых волн: закипающая вода шумит.

Когда вся вода прогреется до 100°C , поднявшиеся вверх пузырьки уже не сокращаются в размерах, а лопаются на поверхности воды, выбрасывая пар наружу. Возникает характерное бульканье — вода кипит.

Кипение начинается после того, как давление насыщенного пара внутри пузырьков сравнивается с давлением в окружающей жидкости.

Во время кипения температура жидкости и пара над ней не меняется. Она сохраняется неизменной до тех пор, пока вся жидкость не выкипит. Это происходит потому, что вся подводимая к жидкости энергия уходит на превращение ее в пар.

Температура, при которой кипит жидкость, называется *температурой кипения*.

Температура кипения зависит от давления, оказываемого на свободную поверхность жидкости. Это объясняется зависимостью давления насыщенного пара от температуры. Пузырек пара растет, пока давление насыщенного пара внутри него немного превосходит давление в жидкости, которое складывается из внешнего давления и гидростатического давления столба жидкости.

Чем больше внешнее давление, тем больше температура кипения.

Все известно, что вода кипит при температуре 100°C . Но не следует забывать, что это справедливо лишь при нормальном атмосферном давлении (примерно 101 кПа). При увеличении давления температура кипения воды возрастает. Так, например, в кастрюлях-скороварках пищу варят под давлением около 200 кПа . Температура кипения воды при этом достигает 120°C . В воде такой температуры процесс варки происходит значительно быстрее, чем в обычном кипятке. Этим и объясняется название «скороварка».

И наоборот, уменьшая внешнее давление, мы тем самым понижаем температуру кипения. Например, в горных районах (на высоте 3 км , где давление составляет 70 кПа) вода кипит при температуре 90°C . Поэтому жителям этих районов, использующим такой кипяток, требуется значительно больше времени для приготовления пищи, чем жителям равнин. А сварить в этом кипятке, например, куриное яйцо вообще невозможно, так как при температуре ниже 100°C белок не сворачивается.

У каждой жидкости своя температура кипения, которая зависит от давления насыщенного пара. *Чем выше давление насыщенного пара, тем ниже температура кипения* соответствующей жидкости, т. е. при меньших температурах давление насыщенного пара становится равным атмосферному. Например, при температуре кипения 100°C давление насыщенных паров воды равно $101\,325\text{ Па}$ (760 мм рт. ст.), а паров ртути — всего лишь 117 Па ($0,88\text{ мм рт. ст.}$). Кипит ртуть при 357°C при нормальном давлении.

Теплота парообразования

Теплота парообразования (теплота испарения) — количество теплоты, которое необходимо сообщить веществу (при постоянном давлении и постоянной температуре) для полного превращения жидкого вещества в пар.

Теплота парообразования равна количеству теплоты, выделяющемуся при конденсации пара в жидкость.

Превращение жидкости в пар при постоянной температуре не ведет к увеличению кинетической энергии молекул, но сопровождается увеличением их потенциальной энергии, т. к. расстояние между молекулами существенно увеличивается.

Удельная теплота парообразования и конденсации. Опытами установлено, что для полного обращения в пар 1 кг воды (при температуре кипения) необходимо затратить 2,3 МДж энергии. Для обращения в пар других жидкостей требуется иное количество теплоты. Например, для спирта оно составляет 0,9 МДж.

Физическая величина, показывающая, какое количество теплоты необходимо, чтобы обратить жидкость массой 1 кг в пар без изменения температуры, называется удельной теплотой парообразования.

Удельную теплоту парообразования обозначают буквой r и измеряют в джоулях на килограмм (Дж/кг).

Количество теплоты, необходимое для парообразования (или выделяющееся при конденсации). Чтобы вычислить количество теплоты Q , необходимое для превращения в пар жидкости любой массы, взятой при температуре кипения, нужно удельную теплоту парообразования r умножить на массу m :

$$Q = rm.$$

При конденсации пара происходит выделение такого же количества теплоты:

$$Q = -rm.$$

2.1.15. Влажность воздуха

Влажность воздуха — это содержание в воздухе водяного пара.

Окружающий нас атмосферный воздух вследствие непрерывного испарения воды с поверхности океанов, морей, водоемов, влажной почвы и растений всегда содержит в себе водяные пары. Чем больше водяных паров находится в определенном объеме воздуха, тем ближе пар к состоянию насыщения. С другой стороны, чем выше температура воздуха, тем большее количество водяных паров требуется для его насыщения.

В зависимости от количества водяных паров, находящихся при данной температуре в атмосфере, воздух бывает различной степени влажности.

Количественная оценка влажности

Для того чтобы количественно оценить влажность воздуха, пользуются, в частности, понятиями *абсолютной* и *относительной влажности*.

Абсолютная влажность — это количество граммов водяного пара, содержащееся в 1 м³ воздуха при данных условиях, т. е. это плотность водяного пара ρ , выраженная в г/м³.

Относительная влажность воздуха φ — это отношение абсолютной влажности воздуха ρ к плотности ρ_0 насыщенного пара при той же температуре.

Относительную влажность выражают в процентах:

$$\varphi = (\rho/\rho_0) \cdot 100 \, \%.$$

Концентрация пара связана с давлением ($p_0 = nkT$), поэтому относительную влажность можно определить как процентное отношение *парциального давления* p пара в воздухе к давлению p_0 насыщенного пара при той же температуре:

$$\varphi = (p/p_0) \cdot 100 \, \%.$$

Под *парциальным давлением* понимают давление водяного пара, которое он производил бы, если бы все другие газы в атмосферном воздухе отсутствовали.

Если влажный воздух охлаждать, то при некоторой температуре находящийся в нем пар можно довести до насыщения. При дальнейшем охлаждении водяной пар начнет конденсироваться в виде росы.

2.1.16. Плавление и кристаллизация

Переход вещества из твердого кристаллического состояния в жидкое называется **плавлением**. Чтобы расплавить твердое кристаллическое тело, его нужно нагреть до определенной температуры, т. е. подвести тепло.

Температура, при которой вещество плавится, называется *температурой плавления вещества*.

Обратный процесс — переход из жидкого состояния в твердое — происходит при понижении температуры, т. е. тепло отводится.

Переход вещества из жидкого состояния в твердое называется *отвердеванием*, или *кристаллизацией*.

Температура, при которой вещество кристаллизуется, называется *температурой кристаллизации*.

Опыт показывает, что любое вещество кристаллизуется и плавится при одной и той же температуре.

На рис. 2.9 представлен график зависимости температуры кристаллического тела (льда) от времени нагревания (от точки *A* до точки *D*) и времени охлаждения (от точки *D* до точки *K*). На нем по горизонтальной оси отложено время, а по вертикальной — температура.

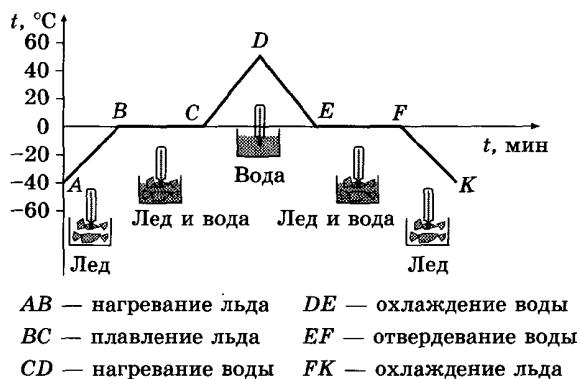


Рис. 2.9

Из графика видно, что наблюдение за процессом началось с момента, когда температура льда была -40°C , или, как принято говорить, температура в начальный момент времени $t_{\text{нач}} = -40^{\circ}\text{C}$ (точка *A* на графике). При дальнейшем нагревании температура льда растет (на графике это участок *AB*). Увеличение температуры происходит до 0°C — температуры плавления льда. При 0°C лед начинает плавиться, а его температура перестает расти. В течение всего времени плавления (т. е. пока весь лед не расплавится) температура льда не меняется, хотя горелка продолжает гореть и тепло, следовательно, подводится. Процессу плавления соответствует горизонтальный участок графика *BC*. Только после того как весь лед расплавится и превратится в воду, температура снова начинает подниматься (участок *CD*). После того, как температура воды достигнет $+40^{\circ}\text{C}$, горелку гасят и воду начинают охлаждать, т. е. тепло отводят (для этого можно сосуд с водой поместить в другой, больший сосуд со льдом). Температура воды начинает снижаться (участок *DE*).

При достижении температуры 0°C температура воды перестает снижаться, несмотря на то, что тепло по-прежнему отводится. Это идет процесс кристаллизации воды — образования льда (горизонтальный участок EF). Пока вся вода не превратится в лед, температура не изменится. Лишь после этого начинает уменьшаться температура льда (участок FK).

Вид рассмотренного графика объясняется следующим образом. На участке AB благодаря подводимому теплу средняя кинетическая энергия молекул льда увеличивается, и температура его повышается. На участке BC вся энергия, получаемая содержимым колбы, тратится на разрушение кристаллической решетки льда: упорядоченное пространственное расположение его молекул сменяется неупорядоченным, меняется расстояние между молекулами, т. е. происходит перестройка молекул таким образом, что вещество становится жидким. Средняя кинетическая энергия молекул при этом не меняется, поэтому неизменной остается и температура. Дальнейшее увеличение температуры расплавленного льда-воды (на участке CD) означает увеличение кинетической энергии молекул воды вследствие подводимого горелкой тепла.

При охлаждении воды (участок DE) часть энергии у нее отбирается, молекулы воды движутся с меньшими скоростями, их средняя кинетическая энергия падает — температура уменьшается, вода охлаждается. При 0°C (горизонтальный участок EF) молекулы начинают выстраиваться в определенном порядке, образуя кристаллическую решетку. Пока этот процесс не завершится, температура вещества не изменится, несмотря на отводимое тепло, а это означает, что при отвердевании жидкость (вода) выделяет энергию. Это как раз та энергия, которую поглотил лед, превращаясь в жидкость (участок BC). Внутренняя энергия у жидкости больше, чем у твердого тела. При плавлении (и кристаллизации) внутренняя энергия тела меняется скачком.

Металлы, плавящиеся при температуре выше 1650°C , называют *тугоплавкими* (титан, хром, молибден и др.). Самая высокая температура плавления среди них у вольфрама — около 3400°C . Тугоплавкие металлы и их соединения используют в качестве жаропрочных материалов в самолетостроении, ракетостроении и космической технике, атомной энергетике.

Подчеркнем еще раз, что при плавлении вещество поглощает энергию. При кристаллизации оно, наоборот, отдает ее в окружающую среду. Получая определенное количество теплоты, выделяющееся при кристаллизации, среда нагревается. Это хорошо известно многим птицам. Недаром их можно заметить зимой в морозную погоду сидящими на льду, который покрывает реки и озера. Из-за выделения энергии при образовании льда воздух над ним оказывается на несколько градусов теплее, чем в лесу на деревьях, и птицы этим пользуются.

Плавление аморфных веществ

Наличие определенной точки плавления — это важный признак кристаллических веществ. Именно по этому признаку их можно легко отличить от аморфных тел, которые также относят к твердым телам. К ним, в частности, относятся стекла, очень вязкие смолы, пластмассы.

Аморфные вещества (в отличие от кристаллических) не имеют определенной температуры плавления — они не плавятся, а размягчаются. При нагревании кусок стекла, например, сначала становится из твердого мягким, его легко можно гнуть или растягивать; при более высокой температуре кусок начинает менять свою форму под действием собственной тяжести. По мере нагревания густая вязкая масса принимает форму того сосуда, в котором лежит. Эта масса сначала густая, как мед, затем — как сметана и наконец становится почти такой же маловязкой жидкостью, как вода. Однако указать определенную температуру перехода твердого тела в жидкое здесь невозможно, поскольку ее нет.

Причины этого лежат в коренном отличии строения аморфных тел от строения кристаллических. Атомы в аморфных телах расположены беспорядочно. Аморфные тела по своему строению напоминают жидкости. Уже в твердом стекле атомы расположены беспорядочно. Значит, повышение температуры стекла лишь увеличивает размах колебаний его молекул, дает им постепенно все большую и большую свободу перемещения. Поэтому стекло размягчается постепенно и не обнаруживает резкого перехода «твердое—жидкое», характерного для перехода от расположения молекул в строгом порядке к беспорядочному.

Теплота плавления

Теплота плавления — это количество теплоты, которое необходимо сообщить веществу при постоянном давлении и постоянной температуре, равной температуре плавления, чтобы полностью перевести его из твердого кристаллического состояния в жидкое.

Теплота плавления равна тому количеству теплоты, которое выделяется при кристаллизации вещества из жидкого состояния.

При плавлении вся подводимая к веществу теплота идет на увеличение потенциальной энергии его молекул. Кинетическая энергия не меняется, поскольку плавление идет при постоянной температуре.

Изучая на опыте плавление различных веществ одной и той же массы, можно заметить, что для превращения их в жидкость требуется разное количество теплоты. Например, для того чтобы расплавить один килограмм льда, нужно затратить 332 Дж энергии, а для того чтобы расплавить 1 кг свинца — 25 кДж.

Физическая величина, показывающая, какое количество теплоты необходимо сообщить кристаллическому телу массой 1 кг, чтобы при температуре плавления полностью перевести его в жидкое состояние, называется удельной теплотой плавления.

Удельную теплоту плавления измеряют в джоулях на килограмм (Дж/кг) и обозначают греческой буквой λ (лямбда).

Удельная теплота кристаллизации равна удельной теплоте плавления, поскольку при кристаллизации выделяется такое же количество теплоты, какое поглощается при плавлении. Так, например, при замерзании воды массой 1 кг выделяются те же 332 Дж энергии, которые нужны для превращения такой же массы льда в воду.

Чтобы найти количество теплоты, необходимое для плавления кристаллического тела произвольной массы, или *теплоту плавления*, надо удельную теплоту плавления этого тела умножить на его массу:

$$Q = \lambda m.$$

Количество теплоты, выделяемое телом, считается отрицательным. Поэтому при расчете количества теплоты, выделяющегося при кристаллизации вещества массой m , следует пользоваться той же формулой, но со знаком «минус»:

$$-Q = \lambda m.$$

Теплота сгорания

Теплота сгорания (или теплотворная способность, калорийность) — это количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании топлива.

Для нагревания тел часто используют энергию, выделяющуюся при сгорании топлива. Обычное топливо (уголь, нефть, бензин) содержит углерод. При горении атомы углерода соединяются с атомами кислорода, содержащегося в воздухе, в результате чего образуются молекулы углекислого газа. Кинетическая энергия этих молекул оказывается большей, чем у исходных частиц. Увеличение кинетической энергии молекул в процессе горения называют выделением энергии. *Энергия, выделяющаяся при полном сгорании топлива, и есть теплота сгорания этого топлива.*

Теплота сгорания топлива зависит от вида топлива и его массы. Чем больше масса топлива, тем больше количество теплоты, выделяющейся при его полном сгорании.

Физическая величина, показывающая, какое количество теплоты выделяется при полном сгорании топлива массой 1 кг, называется удельной теплотой сгорания топлива.

Удельную теплоту сгорания обозначают буквой q и измеряют в джоулях на килограмм (Дж/кг).

Количество теплоты Q , выделяющееся при сгорании m кг топлива, определяют по формуле:

$$Q = qm.$$

Чтобы найти количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании топлива произвольной массы, нужно удельную теплоту сгорания этого топлива умножить на его массу.

Примеры заданий ЕГЭ по теме 2.1. «Молекулярная физика»

Часть 1

При выполнении заданий уровня А нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

A1 1 2 3 4

A1. Под количеством вещества понимают:

- 1) массу вещества
- 2) количество частиц, его составляющих (молекул, атомов)
- 3) количество молей
- 4) количество всех атомов

A2 1 2 3 4

A2. Во сколько раз масса и объем изделия из свинца больше массы и объема аналогичного изделия из олова, при условии, что в них содержится равное количество вещества?

- 1) в 1,5 и 2 раза
- 2) в 3 и 2 раза
- 3) в 1,7 и 1,1 раза
- 4) в 2 и 1,9 раза

A3 1 2 3 4

A3. В сосуд с чистой водой осторожно влили каплю черной туши. Через некоторое время содержимое сосуда приобрело равномерный серый цвет. Это произошло благодаря

- 1) притяжению частиц туши к Земле
- 2) диффузии
- 3) перемещению более теплых слоев жидкости вверх

A4 1 2 3 4

A4. Как изменится давление газа, если концентрация его молекул увеличится в 3 раза, а средняя скорость уменьшится в 3 раза?

- 1) увеличится в 3 раза
- 2) уменьшится в 2 раза
- 3) не изменится
- 4) уменьшится в 3 раза

A5 1 2 3 4

A5. Температура 300 °С по шкале Цельсия соответствует температуре по шкале Кельвина, равной

- | | |
|----------|----------|
| 1) 600 К | 3) -27 К |
| 2) 573 К | 4) 873 К |

A6 1 2 3 4

A6. Какова средняя кинетическая энергия молекул идеального газа при 300 °С

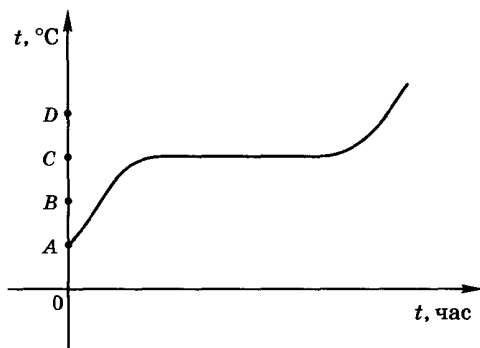
- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| 1) $1,2 \cdot 10^{-20}$ | 3) $1,5 \cdot 10^{-20}$ |
| 2) $2 \cdot 10^{-21}$ | 4) $0,8 \cdot 10^{-20}$ |

A7 1 2 3 4

A7. Как изменится температура идеального газа заданной массы, если его объем уменьшить вдвое, а давление увеличить вдвое?

- 1) увеличится в 2 раза
- 2) не изменится
- 3) увеличится в 1,5 раза
- 4) увеличится в 2,5 раза

- A8.** На рисунке изображена зависимость температуры от времени некоторого вещества, в начальный момент времени находящегося в твердом состоянии. Количество подводимого тепла в единицу времени постоянно. Исходя из этого рисунка, можно сделать вывод, что значению температуры плавления соответствует точка на оси ординат



- 1) A 2) B 3) C 4) D

- A9.** Укажите среднеквадратичную скорость движения молекул неона при температуре 150 К.

- 1) 250 м/с
2) 105 м/с
3) 312 м/с
4) 432 м/с

Часть 2

Ответом к заданиям В1—В2 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

- В1.** В сосуде содержится 10^{25} молекул воды. Какова масса воды?
- В2.** Определите давление двух молей идеального газа, занимающего объем 2 л при температуре 10 К.

В задании В3 на установление соответствия требуется указать последовательность цифр, соответствующих правильному ответу.

- В3.** Установите соответствие между некоторыми свойствами вещества (левый столбец) и его агрегатным состоянием (правый столбец).

- | | |
|--|-------------------|
| А) Расстояние между молекулами намного больше размеров самих молекул | 1) жидкость |
| Б) Атомы (молекулы) совершают малые колебания около положения равновесия | 2) газ |
| В) Вещество принимает форму сосуда, в который его помещают | 3) твердое тело |
| | 4) плазма |
| | 5) аморфное тело. |

Впишите во вторую строку таблицы номера правильных ответов.

А	Б	В

1 2 3 4

A8

1 2 3 4

A9

B1

B2

B3

2.2. Термодинамика

Термодинамика — наука о наиболее общих тепловых свойствах макроскопических тел.

В термодинамике не вводятся упрощенные модели изучаемых явлений, поэтому выводы термодинамики имеют универсальный характер.

В частности, в термодинамике не учитывается молекулярное строение тел.

Термодинамика возникла при изучении оптимальных условий использования теплоты для совершения работы.

Основные понятия термодинамики:

- *макроскопическая система* — система, состоящая из большого числа частиц, причем чем большее число частиц входит в термодинамическую систему, тем точнее описание свойств системы;
- *замкнутая система* — это система, изолированная от любых внешних воздействий;
- *телом* в термодинамике называют макроскопическую систему, заключенную в определенный объем;
- *равновесное состояние* — это состояние макроскопической системы, при котором *параметры*, характеризующие ее *состояние*, остаются неизменными во всех частях системы, т. е. отсутствуют потоки (импульса, энергии, массы и т. д.) между ее частями;
- *равновесное состояние* термодинамической системы *однозначно определяется несколькими параметрами состояния*, или термодинамическими параметрами. К ним относятся, в первую очередь, температура, объем и давление. В равновесном состоянии параметры состояния не зависят от времени и координат. Связь между параметрами равновесных термодинамических систем определяется уравнением состояния;
- *процессом* в термодинамике называется изменение состояния тела со временем. Важными характеристиками процесса являются поглощенное телом количество теплоты Q , совершенная над ним работа A .

Главное содержание термодинамики состоит в двух ее началах (законах) — первом и втором; первое распространяет закон сохранения энергии на тепловые явления, второе же указывает направление возможных энергетических превращений в природе.

Как уже было сказано, термодинамика не учитывает молекулярное строение вещества при изучении тепловых свойств макроскопических тел и в этом смысле является макроскопической теорией.

2.2.1. Внутренняя энергия

Внутреннюю энергию тела составляют кинетическая энергия всех его молекул и потенциальная энергия их взаимодействия.

Внутренняя энергия входит в *баланс энергетических превращений в природе*. После открытия внутренней энергии был сформулирован *закон сохранения и превращения энергии*. Рассмотрим взаимное превращение механической и внутренней энергий. Пусть на свинцовой плите лежит свинцовый шар. Поднимем его вверх и отпустим. Когда мы подняли шар, то сообщили ему потенциальную энергию. При падении шара она уменьшается, т. к. шар опускается все ниже и ниже. Но с увеличением скорости постепенно увеличивается кинетическая энергия шара. Происходит превращение потенциальной энергии шара в кинетическую. Но вот шар ударился о свинцовую плиту и остановился. И кинетическая, и потенциальная энергии его относительно плиты стали равными нулю. Рассматривая шар и плиту после удара, мы увидим, что их состояние изменилось: шар немного сплюснулся, и на плите образовалась небольшая вмятина; измерив же их температуру, мы обнаружим, что они нагрелись.

Нагрев означает увеличение средней кинетической энергии молекул тела. При деформации изменяется взаимное расположение частиц тела, поэтому изменяется и их потенциальная энергия.

Таким образом, можно утверждать, что в результате удара шара о плиту происходит превращение механической энергии, которой обладал в начале опыта шар, во *внутреннюю энергию тела*.

Нетрудно наблюдать и обратный переход внутренней энергии в механическую.

Например, если взять толстостенный стеклянный сосуд и накачать в него воздух через отверстие в пробке, то спустя какое-то время пробка из сосуда вылетит. В этот момент в сосуде образуется туман. Появление тумана означает, что воздух в сосуде стал холоднее и, следовательно, его внутренняя энергия уменьшилась. Объясняется это тем, что находившийся в сосуде сжатый воздух, выталкивая пробку (т. е. расширяясь), совершил работу за счет уменьшения своей внутренней энергии. Кинетическая энергия пробки увеличилась за счет внутренней энергии сжатого воздуха.

Таким образом, одним из способов изменения внутренней энергии тела является работа, совершаемая молекулами тела (или другими телами) над данным телом. Способом изменения внутренней энергии без совершения работы является теплопередача.

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа

Поскольку молекулы идеального газа не взаимодействуют друг с другом, их потенциальная энергия считается равной нулю. Внутренняя энергия идеального газа определяется только кинетической энергией беспорядочного поступательного движения его молекул. Для ее вычисления

нужно умножить среднюю кинетическую энергию одного атома $\bar{E} = \frac{3}{2} kT$ на число атомов $N = \frac{m}{M} N_A$. Учитывая, что $k N_A = R$, получим значение внутренней энергии идеального газа:

$$U = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} RT. \quad (2.21)$$

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа прямо пропорциональна его температуре.

Если воспользоваться уравнением Клапейрона–Менделеева, то выражение для внутренней энергии идеального газа можно представить в виде:

$$U = \frac{3}{2} pV.$$

Следует отметить, что, согласно выражению для средней кинетической энергии одного атома $\left(\bar{E} = \frac{3}{2} kT\right)$ и в силу хаотичности движения, на каждое из трех возможных направлений движения, или каждую *степень свободы*, по оси X , Y и Z приходится одинаковая энергия $\frac{kT}{2}$.

Число степеней свободы — это число возможных независимых направлений движения молекулы.

Газ, каждая молекула которого состоит из двух атомов, называется двухатомным. Каждый атом может двигаться по трем направлениям, поэтому общее число возможных направлений движения — 6. За счет связи между молекулами число степеней свободы уменьшается на одну, поэтому *число степеней свободы для двухатомной молекулы равно пяти*.

Средняя кинетическая энергия двухатомной молекулы равна $\frac{5}{2} kT$. Соответственно внутренняя энергия идеального двухатомного газа равна:

$$U = \frac{5}{2} \cdot \frac{m}{M} RT = \frac{5}{2} pV.$$

Формулы для внутренней энергии идеального газа можно обобщить:

$$U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} RT = \frac{i}{2} pV,$$

где i — число степеней свободы молекул газа ($i = 3$ для одноатомного и $i = 5$ для двухатомного газа).

Для идеальных газов внутренняя энергия зависит только от одного макроскопического параметра — температуры и не зависит от объема, т. к. потенциальная энергия равна нулю (объем определяет среднее расстояние между молекулами).

Для реальных газов потенциальная энергия не равна нулю. Поэтому внутренняя энергия в термодинамике в общем случае однозначно определяется параметрами, характеризующими состояние этих тел: объемом (V) и температурой (T).

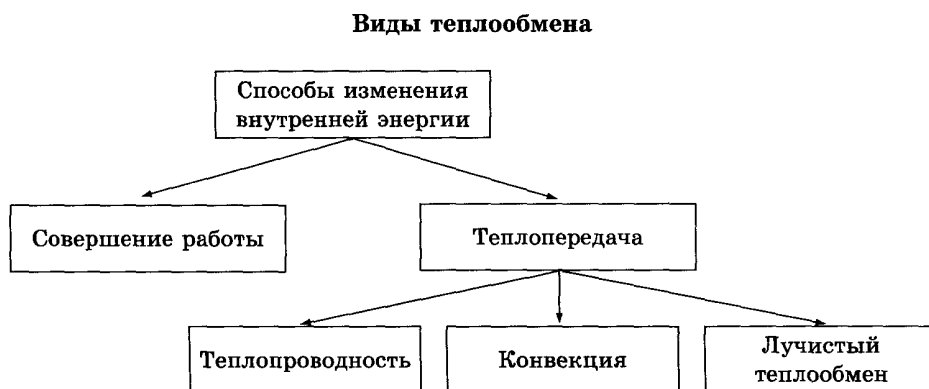
2.2.2. Теплообмен

Теплообмен — это самопроизвольный (т. е. совершаемый без принуждения) процесс передачи теплоты, происходящий между телами с разной температурой.

Можно сказать, что теплообмен — один из способов изменения внутренней энергии тела.

Различают три вида теплопередачи: теплопроводность, конвекцию и лучистый теплообмен.

Схема 2.1



Теплопроводность

Теплопроводность — это вид теплопередачи, при котором происходит непосредственная передача энергии от частиц (молекул, атомов) более нагретой части тела к частицам его менее нагретой части.

Рассмотрим ряд опытов с нагревом твердого тела, жидкости и газа.

Закрепим в штативе толстую медную проволоку, а к проволоке прикрепим воском или пластилином несколько гвоздиков. При нагревании свободного конца проволоки в пламени спиртовки воск плавится, и гвоздики постепенно отпадают от проволоки. Причем сначала отпадают те, что находятся ближе к пламени, затем по очереди все остальные. Объясняется это следующим образом. Сначала увеличивается скорость движения тех частиц металла, которые находятся ближе к пламени. Температура проволоки в этом месте повышается. При взаимодействии этих частиц с соседними скорость последних также увеличивается, в результате чего повышается температура следующей части проволоки. Затем увеличивается скорость движения следующих частиц и т. д., пока не прогреется вся проволока.

Следует помнить, что при теплопроводности само вещество не перемещается вдоль тела, переносится лишь энергия.

Рассмотрим теперь теплопроводность жидкостей. Возьмем пробирку с водой. Положим в нее кусочек льда и станем нагревать верхнюю часть пробирки. Вода у поверхности скоро закипит. Лед же на дне пробирки за это время почти не растает. Значит, у жидкостей теплопроводность невелика, за исключением ртути и жидких металлов.

Это объясняется тем, что в жидкостях молекулы расположены на больших расстояниях друг от друга, чем в твердых телах.

Исследуем теплопроводность газов. Сухую пробирку наденем на палец и нагреем в пламени спиртовки донышко. Палец при этом долго не чувствует тепла.

Это связано с тем, что расстояние между молекулами газа еще больше, чем у жидкостей и твердых тел. Следовательно, теплопроводность газов еще меньше.

Итак, теплопроводность различных веществ различна.

Наибольшей теплопроводностью обладают металлы, особенно серебро и медь. Если теплопроводность различных веществ сравнивать с теплопроводностью меди, то окажется, что у железа она меньше примерно в 5 раз, у воды — в 658 раз, у пористого кирпича — в 848 раз, у свежевыпавшего снега — почти в 4000 раз, у ваты, древесных опилок и овечьей шерсти — почти в 10 000 раз, а у воздуха она меньше примерно в 20 000 раз. Плохой теплопроводностью обладают также волосы, перья, бумага, пробка и другие пористые тела. Это связано с тем, что между волокнами этих веществ содержится воздух. Самой низкой теплопроводностью обладает *вакуум* (освобожденное от воздуха пространство). Объясняется это тем, что теплопроводность — это перенос энергии от одной части тела к другой, который происходит при взаимодействии молекул или других частиц. В пространстве, где нет частиц, теплопроводность осуществляться не может.

Если возникает необходимость предохранить тело от охлаждения или нагревания, то применяют вещества с малой теплопроводностью. Так, ручки для кастрюль, сковородок изготавливают из пластмассы. Дома строят из бревен или кирпича, обладающих плохой теплопроводностью, а значит, предохраняют помещения от охлаждения. На применении вакуума в качестве теплоизоляционного «материала» основано устройство термоса, или *сосуда Дьюара*, который был изобретен в 1892 г. английским ученым Джеймсом Дьюаром.

Конвекция. Конвективный теплообмен

Конвекция (от лат. *convectio* — доставка) — это перенос массы в результате перемещения газа или жидкости.

Существуют различные виды конвекции. Мы рассмотрим свободную и вынужденную конвекции.

Свободная конвекция в газе или жидкости возникает тогда, когда имеются небольшие области, в которых плотность отличается от плотности основной окружающей их массы вещества. Тогда в условиях земного тяготения под действием силы Архимеда эти области начинают перемещаться. Примером свободной конвекции является всем известное движение воздуха в помещении, в котором топится печь, имеется радиатор или другой источник тепла.

Поясним сказанное на примерах.

Поместив руку над горячей плитой или горячей электрической лампочкой, можно почувствовать, что над ними поднимаются теплые струи воздуха. Небольшая бумажная вертушка, поставленная над пламенем свечи или электрической лампочкой, под действием поднимающегося нагретого воздуха начинает вращаться.

Это явление можно объяснить таким образом. Часть воздуха, которая соприкасается с теплой лампой, нагревается, расширяется и становится менее плотной, чем окружающий ее более холодный воздух. Под действием архимедовой (выталкивающей) силы эта более теплая часть воздуха начинает подниматься вверх. Ее место заполняет холодный воздух. Через некоторое время, прогревшись, этот слой воздуха также поднимается вверх, уступая место следующей порции воздуха, и т. д. Это и есть *конвекция*. В результате перемещения более теплых слоев воздуха происходит перенос тепла (т. е. энергии), или *конвективный теплообмен*.

Точно так же переносится энергия и при нагревании жидкости. Нагретые слои жидкости, менее плотные и поэтому более легкие, вытесняются вверх более тяжелыми, холодными слоями. Холодные слои жидкости, опустившись вниз, в свою очередь, нагреваются от источника тепла и вновь вытесняются менее нагретой жидкостью. Благодаря такому движению жидкость равномерно прогревается. Это становится наглядным, если на дно колбы с водой бросить несколько кристалликов марганцовокислого калия, который окрашивает воду в фиолетовый цвет.

Вынужденная конвекция вызывается внешним механическим воздействием на среду. Примерами ее являются обычное перемешивание жидкости ложечкой, движение воздуха в комнате под

действием вентилятора, течение жидкости в трубе под действием гидронасоса и т. д. Физические процессы, происходящие при вынужденной конвекции, связанной с движением тел с большими скоростями в атмосфере, моделируются в аэродинамических трубах, где воспроизводится обтекание неподвижных моделей потоком воздуха.

Таким образом, **конвективный теплообмен** может осуществляться в газообразной и жидкой среде при условии, что имеется разность температур между частями этой среды. Для осуществления эффективного конвективного теплообмена в земных условиях в жидкостях и газах их следует прогревать снизу. Если их прогревать сверху, конвекция не происходит, ведь теплые слои и так находятся сверху и опуститься ниже холодных, более тяжелых, они не могут.

В отсутствие силы тяжести (в ракете, спутнике, межпланетном корабле) конвекция наблюдаться не будет. Следовательно, пользоваться там, например, спичками и газовыми горелками нельзя: продукты сгорания заглушат пламя.

Конвекция в твердых телах происходить не может, поскольку частицы в них колеблются около определенной точки, удерживаемые сильным взаимным притяжением. В связи с этим при нагревании твердых тел потоки вещества в них образовываться не могут. Энергия в твердых телах передается теплопроводностью.

Лучистый теплообмен

Лучистый теплообмен — это теплообмен, при котором энергия переносится различными лучами.

Это могут быть солнечные лучи, а также лучи, испускаемые нагретыми телами, находящимися вокруг нас.

Так, например, сидя около костра, мы чувствуем, как тепло передается от огня нашему телу. Однако причиной такой теплопередачи не может быть ни теплопроводность (которая у воздуха, находящегося между пламенем и телом, очень мала), ни конвекция (так как конвекционные потоки всегда направлены вверх). Здесь имеет место третий вид теплообмена — *лучистый теплообмен*.

Возьмем небольшую, закупоренную с одной стороны, колбу (рис. 2.10). Через пробку в нее вставим изогнутую под прямым углом стеклянную трубку. В эту трубку, имеющую узкий канал, введем подкрашенную жидкость. Укрепив на трубке шкалу, получим прибор — *термоскоп*. Этот прибор позволяет обнаружить даже незначительное нагревание воздуха в закупоренной колбе.

Если к темной поверхности термоскопа поднести кусок металла, нагретый до высокой температуры, то столбик жидкости переместится вправо. Очевидно, воздух в колбе нагрелся и расширился. Быстрое нагревание воздуха в термоскопе можно объяснить лишь передачей ему энергии от нагретого тела. Как и в случае с костром, энергия здесь передалась не теплопроводностью и не конвективным теплообменом. Энергия в данном случае передалась с помощью невидимых лучей, испускаемых нагретым телом. Эти лучи называют *тепловым излучением*.

Лучистый теплообмен может происходить в полном вакууме. Этим он отличается от других видов теплообмена.

Излучают энергию все тела: и сильно нагретые, и слабо, например, тело человека, печь, электрическая лампочка. Но чем выше температура тела, тем сильнее его тепловое излучение. Излученная энергия, достигнув других тел, частично поглощается ими, а частично отражается. При поглощении энергия теплового излучения превращается во внутреннюю энергию тел, и они нагреваются.

Светлые и темные поверхности поглощают энергию по-разному. Так, если в опыте с термоскопом повернуть колбу к нагретому телу сначала закупоренной, а затем светлой стороной, то столбик жидкости в первом случае переместится на большее расстояние, чем во втором (рис. 2.10). Из этого следует, что тела с темной поверхностью лучше поглощают энергию (и, следовательно, сильнее нагреваются), чем тела со светлой или зеркальной поверхностью.

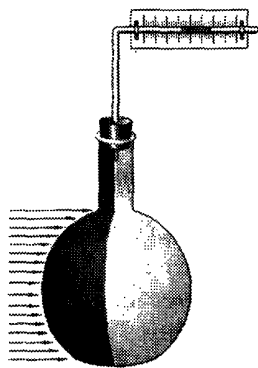


Рис. 2.10

Тела с темной поверхностью не только лучше поглощают, но и лучше излучают энергию.

Способность по-разному поглощать энергию излучения находит широкое применение в технике. Например, воздушные шары и крылья самолетов часто красят серебристой краской, чтобы они меньше нагревались солнечными лучами.

Если же нужно использовать солнечную энергию (например, для нагревания некоторых приборов, установленных на искусственных спутниках), то эти устройства окрашивают в темный цвет.

2.2.3. Количество теплоты. Удельная теплоемкость вещества

Количеством теплоты называют количественную меру изменения внутренней энергии тела при теплообмене (или теплопередаче).

Количество теплоты — это энергия, которую тело отдает при теплообмене (без совершения работы). Количество теплоты, как и энергия, измеряется в джоулях (Дж).

Удельная теплоемкость вещества

Теплоемкость — это количество теплоты, поглощаемой телом при нагревании на 1 градус.

Теплоемкость тела обозначается заглавной латинской буквой C .

От чего зависит теплоемкость тела? Прежде всего, от его массы. Ясно, что для нагрева, например, 1 килограмма воды потребуется больше тепла, чем для нагрева 200 граммов.

А от рода вещества? Проведем опыт. Возьмем два одинаковых сосуда и, налив в один из них воду массой 400 г, а в другой — растительное масло массой 400 г, начнем их нагревать с помощью одинаковых горелок. Наблюдая за показаниями термометров, мы увидим, что масло нагревается быстрее. Чтобы нагреть воду и масло до одной и той же температуры, воду следует нагревать дольше. Но чем дольше мы нагреваем воду, тем большее количество теплоты она получает от горелки.

Таким образом, для нагревания одной и той же массы разных веществ до одинаковой температуры требуется разное количество теплоты. *Количество теплоты, необходимое для нагревания тела и, следовательно, его теплоемкость зависят от рода вещества, из которого состоит это тело.*

Так, например, чтобы увеличить на 1°C температуру воды массой 1 кг, требуется количество теплоты, равное 4200 Дж, а для нагревания на 1°C такой же массы подсолнечного масла необходимо количество теплоты, равное 1700 Дж.

Физическая величина, показывающая, какое количество теплоты требуется для нагревания 1 кг вещества на 1°C , называется удельной теплоемкостью этого вещества.

У каждого вещества своя удельная теплоемкость, которая обозначается латинской буквой c и измеряется в джоулях на килограмм-градус (Дж/(кг $\cdot$ $^\circ\text{C}$)).

Удельная теплоемкость одного и того же вещества в разных агрегатных состояниях (твердом, жидком и газообразном) различна. Например, удельная теплоемкость воды равна 4200 Дж/(кг $\cdot$ $^\circ\text{C}$), а удельная теплоемкость льда 2100 Дж/(кг $\cdot$ $^\circ\text{C}$); алюминий в твердом состоянии имеет удельную теплоемкость, равную 920 Дж/(кг $\cdot$ $^\circ\text{C}$), а в жидком — 1080 Дж/(кг $\cdot$ $^\circ\text{C}$).

Заметим, что вода имеет очень большую удельную теплоемкость. Поэтому вода в морях и океанах, нагреваясь летом, поглощает из воздуха большое количество тепла. Благодаря этому в тех местах, которые расположены вблизи больших водоемов, лето не бывает таким жарким, как в местах, удаленных от воды.

Расчет количества теплоты, необходимого для нагревания тела или выделяемого им при охлаждении

Из вышеизложенного ясно, что количество теплоты, необходимое для нагревания тела, зависит от рода вещества, из которого состоит тело (т. е. его удельной теплоемкости), и от массы тела. Ясно также, что количество теплоты зависит от того, на сколько градусов мы собираемся увеличить температуру тела.

Итак, чтобы определить количество теплоты, необходимое для нагревания тела или выделяемое им при охлаждении, нужно удельную теплоемкость тела умножить на его массу и на разность между его конечной и начальной температурами:

$$Q = cm(t_2 - t_1),$$

где Q — количество теплоты, c — удельная теплоемкость, m — масса тела, t_1 — начальная температура, t_2 — конечная температура.

При нагревании тела $t_2 > t_1$ и, следовательно, $Q > 0$. При охлаждении тела $t_2 < t_1$ и, следовательно, $Q < 0$.

В случае, если известна теплоемкость всего тела C , Q определяется по формуле:

$$Q = C(t_2 - t_1).$$

2.2.4. Работа в термодинамике

В термодинамике, в отличие от механики, рассматривается не движение тела как целого, а лишь относительное изменение частей термодинамической системы, в результате которого меняется ее объем.

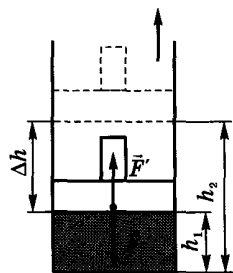


Рис. 2.11

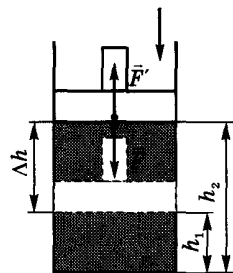


Рис. 2.12

Работа в термодинамике равна изменению внутренней энергии тела.

Вычислим работу, совершаемую газом при его действии на поршень с силой $\vec{F}'$, равной по величине и противоположной по направлению силе $\vec{F}$, действующей на газ со стороны поршня (рис. 2.11): $\vec{F}' = -\vec{F}$ (согласно третьему закону Ньютона), $F' = pS$, где p — давление газа, а S — площадь поверхности поршня. Если перемещение поршня Δh в результате расширения мало, то давление газа можно считать постоянным и работа газа равна:

$$A' = F' \Delta h = pS \Delta h = p \Delta V. \quad (2.22)$$

Если газ расширяется, он совершает положительную работу, так как перемещение поршня совпадает по направлению с силой $\vec{F}'$. Если газ сжимается, то работа газа отрицательна, поскольку перемещение поршня противоположно силе $\vec{F}'$. В формуле (2.22) появится знак «минус»: $\Delta V < 0$, поскольку $\Delta h < 0$ (см. рис. 2.12). Работа внешних сил A , наоборот, положительна при сжатии газа и отрицательна при расширении:

$$A = -A' = -p \Delta V.$$

Совершая над газом положительную работу, внешние тела передают ему часть своей энергии. При расширении газа внешние тела отбирают у газа часть его энергии — работа внешних сил отрицательна.

На графике зависимости давления от объема $p(V)$ работа определяется как площадь, ограниченная кривой $p(V)$, осью V и отрезками ab и cd , равными давлениям p_1 в начальном (V_1) и p_2 в конечном (V_2) состояниях, как для изобарного, так и для изотермического процессов (рис. 2.13 а, б).

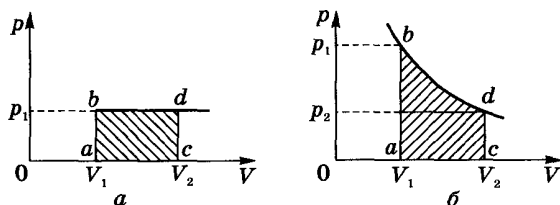


Рис. 2.13

2.2.5. Первый закон термодинамики

Первое начало (первый закон) термодинамики — это закон сохранения и превращения энергии для термодинамической системы.

Согласно первому началу термодинамики, работа может совершаться только за счет теплоты или какой-либо другой формы энергии. Следовательно, работу и количество теплоты измеряют в одних единицах — джоулях (как и энергию).

Первое начало термодинамики было сформулировано немецким ученым Ю. Л. Майером в 1842 г. и подтверждено экспериментально английским ученым Дж. Джоулем в 1843 г.

Первый закон термодинамики формулируется так:

Изменение внутренней энергии системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе:

$$\Delta U = A + Q, \quad (2.23)$$

где ΔU — изменение внутренней энергии, A — работа внешних сил, Q — количество теплоты, переданной системе.

Из (2.23) следует *закон сохранения внутренней энергии*. Если систему изолировать от внешних воздействий, то $A = 0$ и $Q = 0$, а следовательно, и $\Delta U = 0$.

При любых процессах, происходящих в изолированной системе, ее внутренняя энергия остается постоянной.

Если работу совершает система, а не внешние силы, то уравнение (2.23) записывается в виде:

$$Q = \Delta U + A', \quad (2.24)$$

где A' — работа, совершаемая системой ($A' = -A$).

Количество теплоты, переданное системе, идет на изменение ее внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними телами.

Первое начало термодинамики может быть сформулировано как невозможность существования вечного двигателя первого рода, который совершал бы работу, не черпая энергию из какого-либо источника (т. е. только за счет внутренней энергии).

Действительно, если к телу не поступает теплота ($Q = 0$), то работа A' , согласно уравнению (2.24), совершается только за счет убыли внутренней энергии $A' = -\Delta U$. После того, как запас энергии окажется исчерпанным, двигатель перестает работать.

Следует помнить, что как работа, так и количество теплоты, являются характеристиками процесса изменения внутренней энергии, поэтому нельзя говорить, что в системе содержится определенное количество теплоты или работы. Система в любом состоянии обладает лишь определенной внутренней энергией.

Применение первого закона термодинамики к различным процессам

Рассмотрим применение первого закона термодинамики к различным термодинамическим процессам.

Изохорный процесс. Зависимость $p(T)$ на термодинамической диаграмме изображается *изохорой* (см. рис. 2.4.)

Изохорный (изохорический) процесс — термодинамический процесс, происходящий в системе при постоянном объеме.

Изохорный процесс можно осуществить в газах и жидкостях, заключенных в сосуд с постоянным объемом.

При изохорном процессе объем газа не меняется ($\Delta V = 0$), и, согласно первому началу термодинамики (см. уравнение (2.24)),

$$\Delta U = Q,$$

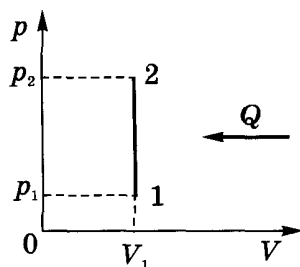


Рис. 2.14

т. е. изменение внутренней энергии равно количеству переданного тепла, т. к. работа ($A = p\Delta V = 0$) газом не совершается (рис. 2.14).

Если газ нагревается, то $Q > 0$ и $\Delta U > 0$, его внутренняя энергия увеличивается. При охлаждении газа $Q < 0$ и $\Delta U < 0$, внутренняя энергия уменьшается.

Изотермический процесс графически изображается *изотермой*, (см. рис. 2.3).

Изотермический процесс — это термодинамический процесс, происходящий в системе при постоянной температуре.

Поскольку при изотермическом процессе внутренняя энергия газа не меняется, см. формулу (2.21), ($T = \text{const}$), то все переданное газу количество теплоты идет на совершение работы:

$$Q = A'.$$

При получении газом теплоты ($Q > 0$) он совершает положительную работу ($A' > 0$). Если газ отдает тепло окружающей среде $Q < 0$ и $A' < 0$. В этом случае над газом совершается работа внешними силами. Для внешних сил работа положительна. Геометрически работа при изотермическом процессе определяется площадью под кривой $p(V)$ (см. рис. 2.13, б).

Изобарный процесс на термодинамической диаграмме изображается *изобарой* (см. рис. 2.5).

Изобарный (изобарический) процесс — термодинамический процесс, происходящий в системе с постоянным давлением p .

Примером изобарного процесса является расширение газа в цилиндре со свободно ходящим нагруженным поршнем.

При изобарном процессе, согласно формуле (2.24), передаваемое газу количество теплоты идет на изменение его внутренней энергии ΔU и на совершение им работы A' при постоянном давлении:

$$Q = \Delta U + A'.$$

Работа идеального газа определяется по графику зависимости $p(V)$ для изобарного процесса (рис. 2.13, а) ($A' = p\Delta V$).

Для идеального газа при изобарном процессе объем пропорционален температуре, в реальных газах часть теплоты расходуется на изменение средней энергии взаимодействия частиц.

Адиабатический процесс

Адиабатический процесс (адиабатный процесс) — это термодинамический процесс, происходящий в системе без теплообмена с окружающей средой ($Q = 0$).

Адиабатическая изоляция системы приближенно достигается в сосудах Дьюара, в так называемых адиабатных оболочках. На адиабатически изолированную систему не оказывает влияния изменение температуры окружающих тел. Ее внутренняя энергия U может меняться только за счет работы, совершаемой внешними телами над системой, или самой системой.

Согласно первому началу термодинамики ($\Delta U = A + Q$), в адиабатной системе

$$\Delta U = A,$$

где A — работа внешних сил.

При адиабатном расширении газа $A < 0$.

Следовательно,

$$\Delta U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} R \Delta T < 0,$$

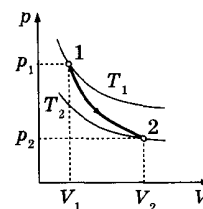


Рис. 2.15

что означает уменьшение температуры при адиабатном расширении. Оно приводит к тому, что давление газа уменьшается более резко, чем при изотермическом процессе. На рис. 2.15 адиабата 1–2, проходящая между двумя изотермами, наглядно иллюстрирует сказанное. Площадь под адиабатой численно равна работе, совершаемой газом при его адиабатическом расширении от объема V_1 до V_2 .

Адиабатное сжатие приводит к повышению температуры газа, т. к. в результате упругих соударений молекул газа с поршнем их средняя кинетическая энергия возрастает, в отличие от расширения, когда она уменьшается (в первом случае скорости молекул газа увеличиваются, во втором — уменьшаются).

Резкое нагревание воздуха при адиабатическом сжатии используется в двигателях Дизеля.

Уравнение теплового баланса

В замкнутой (изолированной от внешних тел) термодинамической системе изменение внутренней энергии какого-либо тела системы ΔU_i не может приводить к изменению внутренней энергии всей системы. Следовательно,

$$\Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \dots + \Delta U_n = \sum_i^n \Delta U_i = 0. \quad (2.25)$$

Если внутри системы не совершается работа никакими телами, то, согласно первому закону термодинамики, изменение внутренней энергии любого тела происходит только за счет обмена теплом с другими телами этой системы: $\Delta U_i = Q_i$. Учитывая (2.25), получим:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n = \sum_i^n Q_i = 0$$

Это уравнение называется уравнением теплового баланса. Здесь Q_i — количество теплоты, полученное или отданное i -ым телом. Любое из количеств теплоты Q_i может означать теплоту, выделяемую или поглощаемую при плавлении какого-либо тела, сгорании топлива, испарении или конденсации пара, если такие процессы происходят с различными телами системы, и будут определяться соответствующими соотношениями.

Уравнение теплового баланса является математическим выражением закона сохранения энергии при теплообмене.

2.2.6. Второй закон термодинамики

Необратимый процесс

Необратимым называется физический процесс, который может самопроизвольно протекать только в одном определенном направлении.

В обратном направлении такие процессы могут протекать только как одно из звеньев более сложного процесса.

Необратимыми являются практически все процессы, происходящие в природе. Это связано с тем, что в любом реальном процессе часть энергии рассеивается за счет излучения, трения и т. д. Например, тепло, как известно, всегда переходит от более горячего тела к более холодному — это наиболее типичный пример необратимого процесса (хотя обратный переход не противоречит закону сохранения энергии).

Также висящий на легкой нити шарик (маятник) никогда самопроизвольно не увеличит амплитуду своих колебаний, наоборот, приведенный однажды в движение посторонней силой, он обязательно, в конце концов, остановится в результате сопротивления воздуха и трения нити о подвес. Таким образом, сообщенная маятнику механическая энергия переходит во внутреннюю энергию хаотического движения молекул (воздуха, материала подвеса).

Математически необратимость механических процессов выражается в том, что уравнение движения макроскопических тел изменяется с изменением знака времени: они *не инвариантны* при замене t на $-t$. При этом ускорение и силы, зависящие от расстояний, не изменяют свои знаки. Знак при замене t на $-t$ меняется у скорости $\left(v = \frac{\Delta s}{\Delta t}\right)$. Соответственно знак меняет сила, зависящая от скорости, — сила трения. Именно поэтому при совершении работы силами трения кинетическая энергия тела необратимо переходит во внутреннюю.

Направленность процессов в природе указывает *второй закон термодинамики*.

Второй закон термодинамики

Второй закон термодинамики — один из основных законов термодинамики, устанавливающий **необратимость реальных термодинамических процессов**.

Второй закон термодинамики был сформулирован как закон природы Н. Л. С. Карно в 1824 г., затем У. Томсоном (Кельвином) в 1841 г. и Р. Клаузиусом в 1850 г. Формулировки закона различны, но эквивалентны.

Немецкий ученый Р. Клаузиус формулировал закон так: *невозможно перевести теплоту от более холодной системы к более горячей при отсутствии других одновременных изменений в обеих системах или окружающих телах*. Это означает, что теплота не может самопроизвольно переходить от более холодного тела к более горячему (*принцип Клаузиуса*).

Согласно формулировке Томсона процесс, при котором работа переходит в тепло без каких-либо иных изменений состояния системы, необратим, т. е. невозможно преобразовать в работу все тепло, взятое от тела, не производя никаких других изменений состояния системы (*принцип Томсона*).

2.2.7. Принцип действия тепловых двигателей

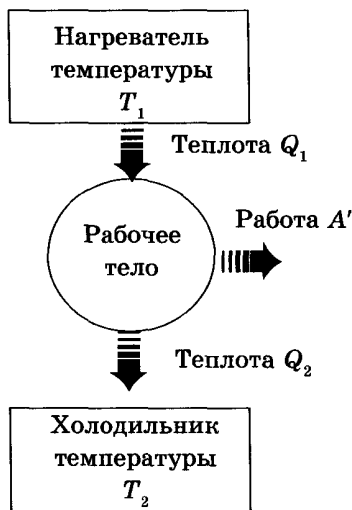


Рис. 2.16

Тепловой двигатель — это устройство, преобразующее внутреннюю энергию топлива в механическую энергию.

Согласно второму началу термодинамики, тепловой двигатель может непрерывно совершать периодически повторяющуюся механическую работу за счет охлаждения окружающих тел, если он не только получает теплоту от более горячего тела (нагревателя), но при этом отдает теплоту менее нагретому телу (холодильнику). Следовательно, на совершение работы идет не все количество теплоты, полученное от нагревателя, а только часть ее.

Таким образом, основными элементами любого теплового двигателя являются:

- 1) рабочее тело (газ или пар), совершающее работу;
- 2) нагреватель, сообщаящий энергию рабочему телу;
- 3) холодильник, поглощающий часть энергии от рабочего тела, рис. 2.16.

2.2.8. Коэффициент полезного действия теплового двигателя

Согласно закону сохранения энергии, работа, совершаемая двигателем, равна:

$$A' = |Q_1| - |Q_2|,$$

где Q_1 — количество теплоты, полученное от нагревателя, Q_2 — количество теплоты, отданное холодильнику.

Коэффициентом полезного действия (КПД) теплового двигателя называется отношение работы A' , совершаемой двигателем, к количеству теплоты, полученному от нагревателя:

$$\eta = \frac{A'}{|Q_1|} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}.$$

Так как у всех двигателей некоторое количество теплоты передается холодильнику, то $\eta < 1$.

КПД теплового двигателя пропорционален разности температур нагревателя и холодильника. При $T_1 - T_2 = 0$ двигатель не может работать.

Цикл Карно

Цикл Карно — это круговой обратимый процесс, состоящий из двух изотермических и двух адиабатических процессов.

Впервые этот процесс был рассмотрен французским инженером и ученым Н. Л. С. Карно в 1824 г. в книге «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу».

Целью исследований Карно было выяснение причин несовершенства тепловых машин того времени (они имели КПД $\leq 5\%$) и поиски путей их усовершенствования.

Выбор двух изотермических и двух адиабатических процессов был обусловлен тем, что работа газа при изотермическом расширении совершается за счет внутренней энергии нагревателя, а при адиабатном процессе — за счет внутренней энергии расширяющегося газа. В этом цикле исключен контакт тел с разной температурой, следовательно, исключена теплопередача без совершения работы.

Цикл Карно — самый эффективный из всех возможных. Его КПД максимален.

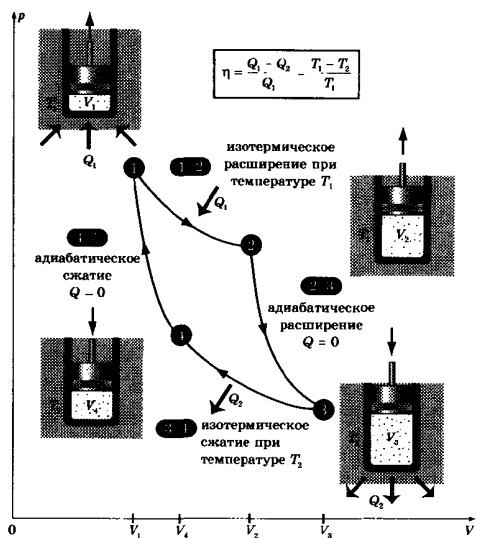


Рис. 2.17

На рис. 2.17 изображены термодинамические процессы цикла. В процессе изотермического расширения (1–2) при температуре T_1 работа совершается за счет изменения внутренней энергии нагревателя, т. е. за счет подведения к газу количества теплоты Q_1 :

$$A_{12} = Q_1.$$

Охлаждение газа перед сжатием (3–4) происходит при адиабатном расширении (2–3). Изменение внутренней энергии ΔU_{23} при адиабатном процессе ($Q = 0$) полностью преобразуется в механическую работу:

$$A_{23} = -\Delta U_{23}.$$

Температура газа в результате адиабатического расширения (2–3) понижается до температуры холодильника $T_2 < T_1$. В процессе (3–4) газ изотермически сжимается, передавая холодильнику количество теплоты Q_2 :

$$A_{34} = Q_2,$$

Цикл завершается процессом адиабатического сжатия (4–1), при котором газ нагревается до температуры T_1 .

Максимальное значение КПД тепловых двигателей, работающих на идеальном газе, по циклу Карно:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (2.26)$$

Суть формулы (2.26) выражена в доказанной С. Карно теореме о том, что КПД любого теплового двигателя не может превышать КПД цикла Карно, осуществляемого при той же температуре нагревателя и холодильника.

Примеры заданий ЕГЭ по теме 2.2. «Термодинамика»

Часть 1

При выполнении заданий уровня А нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

А1 1 2 3 4

А1. В каком из перечисленных ниже случаев система находится в состоянии термодинамического равновесия?

- 1) в закрытое теплоизолированное помещение только что внесли с улицы (на улице мороз) несколько баллонов со сжатым до нескольких атмосфер воздухом
- 2) тот же случай, что и в п. 1), но спустя длительное время
- 3) в помещении топится печь, но при этом открыто окно
- 4) в сосуд с водой опустили кипятильник и включили его

А2 1 2 3 4

А2. Если молярную массу идеального одноатомного газа увеличить в 2 раза, а температуру уменьшить в 2 раза, то его внутренняя энергия:

- 1) возрастет в 2 раза
- 2) уменьшится в 4 раза
- 3) не изменится
- 4) невозможно определить

А3 1 2 3 4

А3. Раскаленная докрасна железная болванка нагревает воздух в помещении благодаря

- 1) конвективному теплообмену
- 2) теплопроводности воздуха
- 3) лучистому теплообмену
- 4) как лучистому, так и конвективному теплообменам

А4 1 2 3 4

А4. Для увеличения температуры тела на 10°C ему передали энергию 420 Дж. Теплоемкость этого тела составляет:

- 1) 4200 Дж/К
- 2) 210 Дж/К
- 3) 42 Дж/К
- 4) 120 Дж/К

А5 1 2 3 4

А5. При кристаллизации 100 г жидкости было выделено 0,17 Дж. Определите удельную теплоту плавления этого вещества

- 1) 1,7 Дж/кг 2) 170 Дж/кг 3) 0,85 Дж/кг 4) 1,5 кДж/кг

А6 1 2 3 4

А6. Газ некоторой массы перевели из состояния с давлением $p = 5$ атм и объемом $V = 2$ л в состояние с $p = 20$ атм и $V = 1$ л. Как при этом изменилась его внутренняя энергия?

- | | |
|---------------------------|--------------------------|
| 1) увеличилась в 2 раза | 3) увеличилась в 1,2 раз |
| 2) уменьшилась в 1,5 раза | 4) невозможно определить |

A7. Какую работу совершает идеальный газ, если количество подведенного к нему тепла равно 2 кДж, а его внутренняя энергия увеличилась на 1 кДж?

- 1) 5 кДж 2) 2,5 кДж 3) 3 кДж 4) 1 кДж

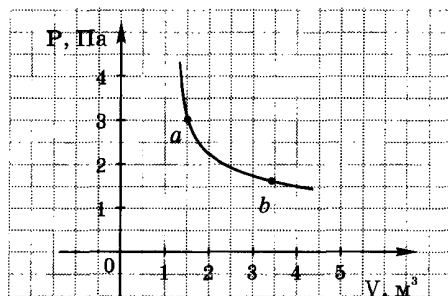
A8. В результате изотермического процесса газом совершена работа 5 Дж. Каково количество тепла, подведенного к газу?

- 1) 5 Дж 2) 2,5 Дж 3) 3 Дж 4) 1 Дж

Часть 2

Ответом к заданиям В1—В2 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

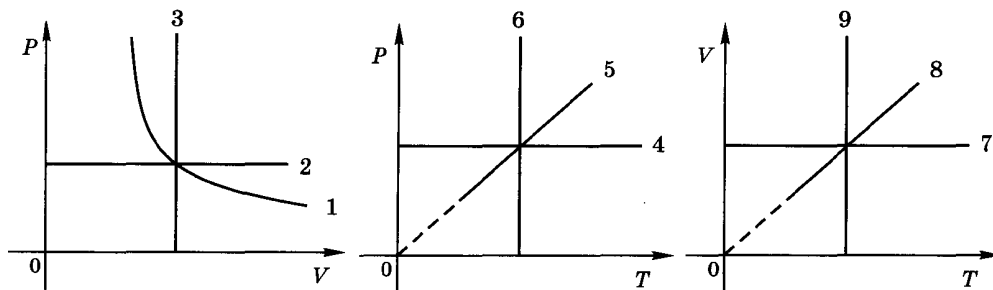
В1. Определите по графику, изображенному на рисунке, примерное значение работы, совершенной газом при изотермическом расширении на участке между точками *a* и *b*.



В2. В термостат с 2 л воды при температуре 90 °С опустили кусок льда в медном ведре. Масса льда 0,2 кг, температура –10 °С, масса ведерка 100 г, его температура считается комнатной (+20 °С). Какой будет температура содержимого термостата после установления термодинамического равновесия? Ответ дайте в °С.

В задании В3 на установление соответствия требуется указать последовательность цифр, соответствующих правильному ответу.

В3. Установите соответствие между названием изопроцесса и его графиками, данными в координатах $p(V)$, $p(T)$, $V(T)$ на рисунках записав в таблице под названием процесса номера соответствующих ему графиков.



Впишите во вторую строку таблицы номера правильных ответов.

Изобарный	Изохорный	Изотермический

1 2 3 4 A7

1 2 3 4 A8

61

62

63

Тренировочный тест к разделу 2
«Молекулярная физика. Термодинамика»

Часть 1

При выполнении заданий этой части нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

1 2 3 4

A1. Какой объем занимает один моль идеального газа при давлении 305 кПа и температуре 400 К?

- 1) 0,05 м³ 2) 0,011 м³ 3) 10 м³ 4) 0,7 м³

1 2 3 4

A2. Давление 4 кг кислорода, заключенного в сосуд емкостью 2 м³, при температуре 30°C составляет

- 1) 100 кПа 2) 150 МПа 3) 157 кПа 4) 90 Па

1 2 3 4

A3. Каков объем газа при нормальных условиях, если при давлении 95 кПа и температуре 20 °С он занимает объем 0,164 л?

- 1) 0,25 л 2) 0,15 л 3) 0,05л 4) 1 л

1 2 3 4

A4. Концентрация молекул идеального газа при нормальных условиях равна:

- 1) $2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ 2) $4 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ 3) $5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ 4) $5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$

1 2 3 4

A5. Сколько молекул азота находится в сосуде емкостью 10^{-3} м^3 при давлении 0,127 мПа?

- 1) $3 \cdot 10^{18}$ 2) $2 \cdot 10^{20}$ 3) $5 \cdot 10^{15}$ 4) $1 \cdot 10^{27}$

1 2 3 4

A6. На сколько градусов повышается температура воды у подножия пятидесяти-метрового водопада? Всеми видами теплоотдачи можно пренебречь.

- 1) на 5,2 °С 2) на 1,5 °С 3) на 0, 12 °С 4) на 0,3 °С

1 2 3 4

A7. Цикл Карно — это круговой обратимый процесс, состоящий из

- 1) двух изобарных и двух изохорных процессов
2) двух изотермических и двух изобарных процессов
3) двух изотермических и двух адиабатических процессов
4) двух изохорных и двух адиабатических процессов

1 2 3 4

A8. Какой из перечисленных ниже процессов является обратимым?

- 1) падение воды с вершины горы (водопад)
2) процесс теплообмена между телами в изолированной системе
3) раскачивание детских качелей
4) колебания идеального математического маятника

1 2 3 4

A9. Плотность ацетилена C_2H_2 при нормальных условиях составляет:

- 1) 2,03 кг/м³ 2) 1,51 кг/м³ 3) 1,15 кг/м³ 4) 3 кг/м³

- A10.** Зависимость между плотностью идеального газа и абсолютной температурой при изобарном процессе
- 1) прямо пропорциональная
 - 2) квадратичная
 - 3) обратно пропорциональная
 - 4) кубическая
- A11.** Для увеличения КПД теплового двигателя необходимо: А) уменьшить температуру холодильника; Б) увеличить температуру нагревателя. Какое из утверждений верно?
- 1) только А
 - 2) только Б
 - 3) и А, и Б
 - 4) ни А, ни Б
- A12.** Образовавшаяся в горячей воде пленка парафина объемом 1 мм^3 имеет площадь 1 м^2 . Считая толщину пленки равной диаметру молекулы парафина d , можно сказать, что d равно
- 1) $1 \cdot 10^{-9} \text{ м}$
 - 2) $3 \cdot 10^{-8} \text{ м}$
 - 3) $5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$
 - 4) $2 \cdot 10^{-7} \text{ м}$
- A13.** Идеальный тепловой двигатель получает от нагревателя $7,2 \text{ МДж}$ в секунду, а отдает в холодильник $6,4 \text{ МДж}$. КПД такого двигателя составляет
- 1) 15%
 - 2) 25%
 - 3) 11%
 - 4) 8%
- A14.** Температура нагревателя и холодильника равны соответственно 150°C и 20°C . От нагревателя взято $1 \cdot 10^5 \text{ кДж}$. Если считать машину идеальной, то работа, произведенная машиной, равна
- 1) $5 \cdot 10^3 \text{ кДж}$
 - 2) $7,2 \cdot 10^4 \text{ кДж}$
 - 3) $4 \cdot 10^5 \text{ кДж}$
 - 4) $3,1 \cdot 10^4 \text{ кДж}$
- A15.** В откачанном до высокого вакуума сосуде осталось несколько молекул газа. Как определить температуру этого газа?
- 1) с помощью термопары
 - 2) используя ртутный термометр
 - 3) с помощью газового термометра
 - 4) принципиально невозможно определить
- A16.** Какое количество теплоты выделится при конденсации 20 г водяного пара при 100°C и охлаждении полученной воды до 20°C ?
- 1) 40 кДж
 - 2) 52 кДж
 - 3) $0,1 \text{ МДж}$
 - 4) 10 кДж
- A17.** В электрочайнике с неисправной системой автоматического отключения вода нагревается от 0°C до кипения за 10 мин . За какой промежуток времени после этого вся вода выкипит?
- 1) 54 мин
 - 2) 105 мин
 - 3) 60 мин
 - 4) 70 мин
- A18.** Абсолютная влажность 5 м^3 воздуха, в котором содержится 80 г водяного пара, составляет
- 1) 16 г/м^3
 - 2) 20 г/м^3
 - 3) 40 г/м^3
 - 4) 35 г/м^3
- A19.** Скорость испарения жидкости зависит от: А) температуры, площади свободной поверхности и рода жидкости; Б) массы жидкости. Какое из утверждений верно?
- 1) только А
 - 2) и А, и Б
 - 3) только Б
 - 4) ни А, ни Б

1 2 3 4

1 2 3 4

1 2 3 4

1 2 3 4

1 2 3 4

1 2 3 4

1 2 3 4

1 2 3 4

1 2 3 4

1 2 3 4

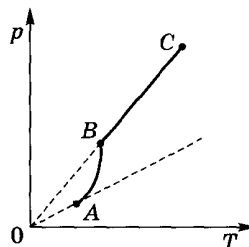
1234

A20. Насыщенный пар характеризуется тем, что: А) его давление не зависит от температуры; Б) концентрация молекул при постоянной температуре не зависит от объема. Какое из утверждений верно?

- 1) только А 2) только Б 3) и А, и Б 4) ни А, ни Б

1234

A21. Экспериментальная зависимость давления насыщенного пара от температуры (см. рисунок) на участке АВ отличается от зависимости $p = nkT$ для идеального газа по причине



- 1) слишком больших давлений
2) большой массы жидкости
3) очень высоких температур
4) фазового перехода жидкость $\leftrightarrow$ газ

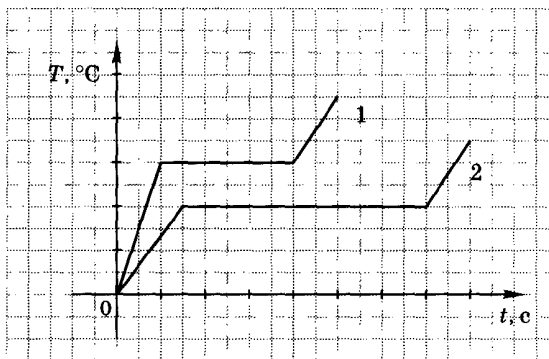
1234

A22. Кристаллические тела отличаются от аморфных тем, что

- 1) являются более твердыми, чем аморфные
2) имеют бóльшую плотность
3) имеют меньшие коэффициенты теплового расширения
4) имеют определенную температуру плавления

1234

A23. На рисунке приведены графики изменения температуры двух тел одинаковой массы при нагревании. Условия нагревания одинаковы. Отношения теплоемкостей $\frac{c_1}{c_2}$, температур плавления $\frac{T_1}{T_2}$ и удельных температур плавления $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ этих тел таковы



- 1) $\frac{c_1}{c_2} < 1$; $\frac{T_1}{T_2} > 1$; $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} < 1$ 3) $\frac{c_1}{c_2} > 1$; $\frac{T_1}{T_2} < 1$; $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} > 1$
2) $\frac{c_1}{c_2} < 1$; $\frac{T_1}{T_2} < 1$; $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} < 1$ 4) $\frac{c_1}{c_2} > 1$; $\frac{T_1}{T_2} > 1$; $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} > 1$

- A24.** У идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно, температура нагревателя равна 400 К, а температура холодильника — 300 К. КПД машины равен
- 1) 20%
 - 2) 25%
 - 3) 40%
 - 4) 30%

1 2 3 4 A24

- A25.** На диаграмме зависимости насыщенного пара от температуры в закрытом объеме (см. рисунок к A21) жидкость присутствует
- 1) только на участке AB
 - 2) только на участке BC
 - 3) и на участке AB , и на участке BC
 - 4) отсутствует и на участке AB , и на участке BC

1 2 3 4 A25

Часть 2

Ответом к заданиям В1—В2 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

- В1.** Из баллона со сжатым водородом емкостью 10 л вследствие неисправности вентиля утекает газ. При температуре 7 °С давление было равно 5 МПа. Через некоторое время при температуре 17 °С манометр показал такое же давление. Сколько газа утекло? Ответ дать в г и округлить до одного знака после запятой.
- В2.** В сосуде емкостью 10 л находится кислород под давлением 101,3 кПа. Стенки сосуда могут выдержать давление до 1,013 МПа. Какое максимальное количество теплоты можно сообщить газу?

В1

В2

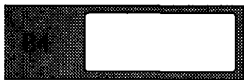
В заданиях В3–В5 на установление соответствия требуется указать последовательность цифр, соответствующих правильному ответу.

- В3.** 100 г кислорода нагревают от 10 °С до 60 °С. Установите соответствие между типом процесса, при котором происходит нагревание (левый столбец), и изменением внутренней энергии газа (правый столбец).
- | | |
|-------------------|-------------|
| А) Изохорный | 1) 3,25 кДж |
| Б) Изобарный | 2) 7 кДж |
| В) Адиабатический | 3) 2 кДж |

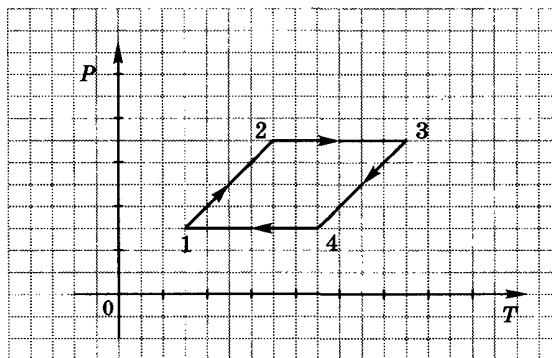
В3

Впишите во вторую строку таблицы номера правильных ответов.

А	Б	В



- В4. На рисунке приведен замкнутый термодинамический цикл, произведенный с некоторой массой идеального газа. Установите соответствие между номером участка процесса (левый столбец) и изменением объема газа на этом участке (правый столбец).



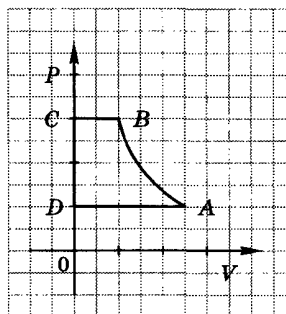
- | | |
|---------|--------------------------------------|
| А) 1–2 | 1) увеличивается |
| Б) 2–3 | 2) уменьшается |
| В) 3–4 | 3) не изменяется |
| Г) 4–1. | 4) увеличивается пропорционально T |
| | 5) уменьшается пропорционально T |

Впишите во вторую строку таблицы номера правильных ответов.

А	Б	В	Г



- В5. На рисунке приведена диаграмма работы компрессора двойного действия. Установите соответствие между участками диаграммы (левый столбец) и частями рабочего цикла работы компрессора (правый столбец).



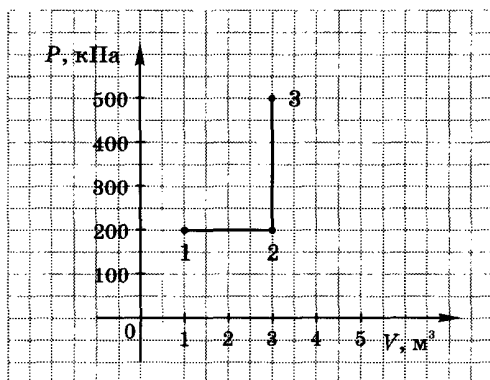
- | | |
|-------|--|
| А) AB | 1) проталкивание воздуха в резервуар (при постоянном давлении) |
| Б) BC | 2) мгновенное понижение давления в цилиндре компрессора при закрытии выпускного клапана и открытии впускного |
| В) CD | 3) впуск воздуха при давлении в 1 атм. |
| Г) DA | 4) изотермическое сжатие воздуха |

Впишите во вторую строку таблицы номера правильных ответов.

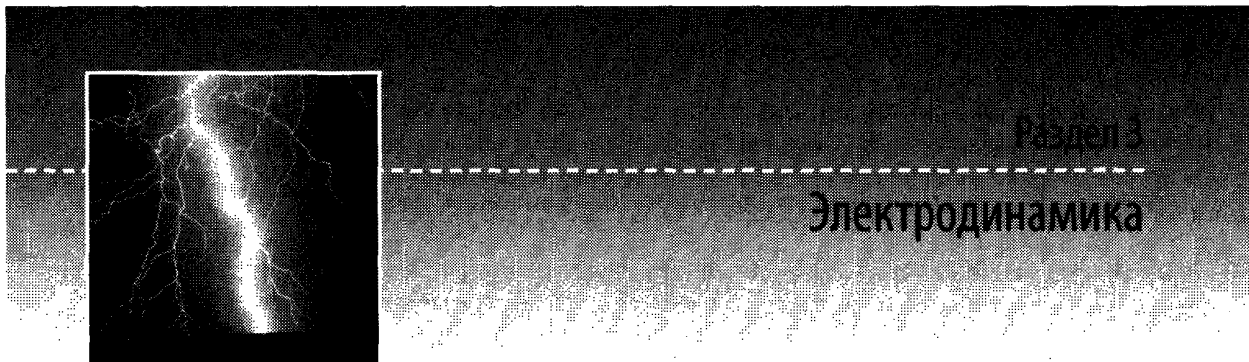
А	Б	В	Г

Полное правильное решение задач С1–С6 должно включать законы и формулы, применение которых необходимо и достаточно для решения задачи, а также математические преобразования, расчеты с численным ответом и, при необходимости, рисунок, поясняющий решение.

- С1. В баллоне емкостью $V_1 = 20$ л находится сжатый воздух. При температуре $T_1 = 20^\circ\text{C}$ манометр показывает давление $P_1 = 12$ МПа (избыточное над атмосферным, равным $P_a = 0,1$ МПа). Какой объем воды V_2 (в литрах) можно вытеснить из цистерны подводной лодки воздухом этого баллона, если вытеснение происходит на глубине $h = 30$ м при температуре $T_2 = 5^\circ\text{C}$?
- С2. Баллон емкостью $V = 10$ л с кислородом при давлении $P = 8$ МПа и температуре $T_1 = 7^\circ\text{C}$ нагревается до $T_2 = 15,5^\circ\text{C}$. Какое количество теплоты при этом поглощается газом?
- С3. Какой должна быть скорость свинцового шарика в момент удара о стальную плиту, чтобы он расплавился, если его температура до удара была равна 27°C ? Всеми видами теплоотдачи можно пренебречь.
- С4. На P - V -диаграмме (см. рисунок) изображены термодинамические процессы перехода $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ некоторого количества кислорода, осуществленные путем его нагрева. Определите приращение внутренней энергии газа, совершенную им работу и количество переданного газу тепла.



- С5. Оболочку аэростата емкостью 50 м^3 заполняют газом с помощью компрессора. Сколько качаний должен сделать компрессор, чтобы давление газа в оболочке при температуре 40°C достигло $0,2$ МПа, если при каждом качании компрессор захватывает 25 л газа при давлении $0,1$ МПа и температуре 20°C ?
- С6. Найдите увеличение внутренней энергии гелия в результате изобарического расширения от объема 5 л до объема 10 л. Процесс происходит при 200 кПа. Ответ дайте в кДж.



Раздел 3

Электродинамика

Электродинамика — это область физики, в которой изучаются свойства и закономерности поведения электромагнитного поля и движение электрических зарядов, взаимодействующих друг с другом посредством этого поля.

Структура Вселенной формируется гравитационным притяжением тел, однако наличие лишь сил притяжения привело бы к неограниченному их гравитационному сжатию. Чтобы существовали тела неизменных размеров, должны действовать также и силы отталкивания между телами. Такими силами являются силы электромагнитного взаимодействия. Эти силы могут вызывать как притяжение, так и отталкивание заряженных частиц. Силы электромагнитного взаимодействия частиц тела на много порядков превосходят гравитационные силы, поэтому структура тел определяется электромагнитным взаимодействием.

Среди четырех типов взаимодействий — гравитационных, электромагнитных, сильных (ядерных) и слабых — электромагнитные взаимодействия занимают первое место по широте и разнообразию применения. От силы наших мышц до света в нашем окне (не говоря уж о свете электрических лампочек) — все является результатом проявления электромагнитных взаимодействий.

Электродинамика возникла в результате многочисленных исследований, начиная с обнаружения способности янтаря, потертого о шерсть, притягивать к себе легкие предметы и кончая гипотезой великого английского ученого Дж. К. Максвелла о порождении магнитного поля переменным электрическим полем.

Развитие науки электродинамики явилось примером практической целесообразности «чистой» науки — здесь научные исследования и создание теории предшествовали ее практическому применению. Изобретение радио А. С. Поповым и Г. Маркони стало возможным лишь после создания теории электродинамики Дж. К. Максвеллом.

Электродинамика включает в себя *электростатику*, посвященную изучению неподвижных электрически заряженных тел.

3.1. Электростатика

3.1.1. Электризация тел

Еще в глубокой древности было известно, что если потереть янтарь о шерсть, он начинает притягивать к себе легкие предметы. Позднее это же свойство было обнаружено у других веществ (стекло, эбонит и др.). Это явление называется *электризацией*; тела же, способные притягивать к себе после натирания другие предметы, — *наэлектризованными*. Явление электризации объяснялось на основании гипотезы о существовании *зарядов*, которые приобретает наэлектризованное тело.

3.1.2. Взаимодействие зарядов. Два вида электрических зарядов

Простые опыты по электризации различных тел иллюстрируют следующие положения.

1. Существуют заряды двух видов: положительные (+) и отрицательные (–). Положительный заряд возникает при трении стекла о кожу или шелк, а отрицательный — при трении янтаря (или эбонита) о шерсть.

2. Заряды (или заряженные тела) взаимодействуют друг с другом. Одноименные заряды отталкиваются, а разноименные заряды притягиваются.

3. Состояние электризации можно передать от одного тела к другому, что связано с переносом электрического заряда. При этом телу можно передать больший или меньший заряд, т. е. заряд имеет величину. При электризации трением заряд приобретают оба тела, причем одно — положительный, а другое — отрицательный. Следует подчеркнуть, что абсолютные величины зарядов наэлектризованных трением тел равны, что подтверждается многочисленными измерениями зарядов с помощью электрометров.

Объяснить, почему тела электризуются (т. е. заряжаются) при трении, стало возможным после открытия электрона и изучения строения атома. Как известно, все вещества состоят из атомов; атомы, в свою очередь, состоят из элементарных частиц — отрицательно заряженных *электронов*, положительно заряженных *протонов* и нейтральных частиц — *нейтронов*. Электроны и протоны являются носителями элементарных (минимальных) электрических зарядов.

Элементарный электрический заряд (e) — это наименьший электрический заряд, положительный или отрицательный, равный величине заряда электрона:

$$e = 1,6021892(46) \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Заряженных элементарных частиц существует много, и почти все они обладают зарядом $+e$ или $-e$, однако эти частицы весьма недолговечны. Они живут меньше миллионной доли секунды. Только электроны и протоны существуют в свободном состоянии неограниченно долго.

Протоны и нейтроны (нуклоны) составляют положительно заряженное ядро атома, вокруг которого вращаются отрицательно заряженные электроны, число которых равно числу протонов, так что атом в целом электронейтрален.

В обычных условиях тела, состоящие из атомов (или молекул), электрически нейтральны. Однако в процессе трения часть электронов, покинувших свои атомы, может перейти с одного тела на другое. Перемещения электронов при этом не превышают размеров межатомных расстояний. Но если тела после трения разъединить, то они окажутся заряженными: тело, которое отдало часть своих электронов, будет заряжено положительно, а тело, которое их приобрело, — отрицательно.

Итак, тела электризуются, т. е. получают электрический заряд, когда они теряют или приобретают электроны. В некоторых случаях электризация обусловлена перемещением ионов. Новые электрические заряды при этом не возникают. Происходит лишь разделение имеющихся зарядов между электризующимися телами: часть отрицательных зарядов переходит с одного тела на другое.

Определение заряда

Следует особо подчеркнуть, что *заряд является неотъемлемым свойством частицы*. Частицу без заряда представить себе можно, но заряд без частицы — нельзя.

Проявляют себя заряженные частицы в притяжении (разноименные заряды) либо в отталкивании (одноименные заряды) с силами, на много порядков превышающими гравитационные. Так, сила электрического притяжения электрона к ядру в атоме водорода в 10^{39} раз больше силы гравитационного притяжения этих частиц. Взаимодействие между заряженными частицами называется *электромагнитным взаимодействием*, а электрический заряд определяет интенсивность электромагнитных взаимодействий.

В современной физике так определяют заряд:

Электрический заряд — это физическая величина, являющаяся источником электрического поля, посредством которого осуществляется взаимодействие частиц, обладающих зарядом.

3.1.3. Закон сохранения электрического заряда

Закон сохранения электрического заряда гласит, что алгебраическая сумма электрических зарядов всех частиц изолированной системы не меняется при происходящих в ней процессах.

Электрический заряд любой частицы или системы частиц является целым кратным *элементарному электрическому заряду* (равному по величине заряду электрона) или нулевым.

Одним из подтверждений закона сохранения электрического заряда служит строгое равенство (по абсолютной величине) электрических зарядов электрона и протона. Изучение движения атомов (молекул) и микроскопических тел в электрических полях подтверждает электронейтральность вещества и, соответственно, равенство зарядов электрона и протона (и электронейтральность нейтрона) с точностью до 10^{-21} .

Закон сохранения заряда подтверждается и простыми опытами по электризации тел. Укрепим на стержне электромера металлический диск и, положив на него прослойку из сукна, поставим сверху еще один такой же диск, но с ручкой из диэлектрика. Совершив несколько движений верхним диском по изоляционной прослойке, уберем его в сторону. Мы увидим, что стрелка электромера отклонится, свидетельствуя о появлении на сукне и соприкасающемся с ним диске электрического заряда. Далее прикоснемся вторым диском (которым мы терли о сукно) к стержню второго электромера. Стрелка этого электромера отклонится примерно на такой же угол, что и стрелка первого электромера. Это означает, что при электризации оба диска получили одинаковый по модулю заряд. Что можно сказать о знаках этих зарядов? Для ответа на этот вопрос завершим опыт, соединив электромеры металлическим стержнем. Мы увидим, как стрелки приборов опустятся вниз. Нейтрализация зарядов свидетельствует о том, что они были равны по модулю, но противоположны по знаку (и, следовательно, в сумме давали нуль).

Этот и другие опыты показывают, что в процессе электризации общий (суммарный) заряд тел сохраняется: если он был равен нулю до электризации, то таким он останется и после нее.

Полный электрический заряд сохраняется и в том случае, если первоначальные заряды тел были отличны от нуля. Если обозначить первоначальные заряды тел как q_1 и q_2 , а заряд тех же тел после их взаимодействия как q'_1 и q'_2 , то можно записать:

$$q'_1 + q'_2 = q_1 + q_2.$$

При любых взаимодействиях тел их полный электрический заряд остается неизменным.

В этом заключается фундаментальный закон природы — *закон сохранения электрического заряда*.

Закон сохранения заряда был установлен в 1750 г. американским ученым и видным политическим деятелем Бенджамином Франклином. Он же ввел понятие о положительных и отрицательных зарядах, обозначив их знаками «+» и «-».

Закон сохранения заряда имеет глубокий смысл. Он очевиден, когда число элементарных частиц не меняется. Однако элементарные частицы могут возникать (рождаться) и исчезать, т. е. претерпевать различные превращения. Возникают и исчезают элементарные частицы всегда парами (с противоположными зарядами). Многочисленные наблюдения превращений элементарных частиц подтверждают закон сохранения заряда. Этот закон выражает одно из фундаментальных свойств электрического заряда.

Таким образом, электрический заряд во Вселенной сохраняется, а полный электрический заряд Вселенной, скорее всего, равен нулю.

3.1.4. Закон Кулона

Закон Кулона — это один из основных законов электростатики. Он определяет величину и направление силы взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами.

Под точечным зарядом понимают заряженное тело, размер которого много меньше расстояния его возможного воздействия на другие тела. В таком случае ни форма, ни размеры заряженных тел не влияют практически на взаимодействие между ними.

Закон Кулона экспериментально впервые был доказан приблизительно в 1773 г. Кавендишем, который использовал для этого сферический конденсатор. Он показал, что внутри заряженной сферы электрическое поле отсутствует. Это означало, что сила электростатического взаимодействия меняется обратно пропорционально квадрату расстояния, однако результаты Кавендиша не были опубликованы.

В 1785 г. закон был установлен Ш. О. Кулоном с помощью специальных крутильных весов.

Опыты Кулона позволили установить закон, поразительно напоминающий закон всемирного тяготения.

Сила взаимодействия двух точечных неподвижных заряженных тел в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей заряда и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

В аналитическом виде закон Кулона имеет вид:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2},$$

где $|q_1|$ и $|q_2|$ — модули зарядов; r — расстояние между ними; k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц. Сила взаимодействия направлена по прямой, соединяющей заряды, причем одноименные заряды отталкиваются, а разноименные — притягиваются.

Сила взаимодействия между зарядами зависит также от среды между заряженными телами.

В воздухе сила взаимодействия почти не отличается от таковой в вакууме. Закон Кулона выражает взаимодействие зарядов в вакууме.

Кулон — единица электрического заряда. Кулон (Кл) — единица СИ количества электричества (электрического заряда). Она является производной единицей и определяется через единицу силы тока — 1 ампер (А), которая входит в число основных единиц СИ.

За единицу электрического заряда принимают заряд, проходящий через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А за 1 с.

То есть 1 Кл = 1 А·с.

Заряд в 1 Кл очень велик. Сила взаимодействия двух точечных зарядов по 1 Кл каждый, расположенных на расстоянии 1 км друг от друга, чуть меньше силы, с которой земной шар притягивает груз массой 1 т. Сообщить такой заряд небольшому телу невозможно (отталкиваясь друг от друга, заряженные частицы не могут удержаться в теле). А вот в проводнике (который в целом электронейтрален) привести в движение такой заряд просто (ток в 1 А — вполне обычный ток, протекающий по проводам в наших квартирах).

Коэффициент k в законе Кулона при его записи в СИ выражается в Н·м²/Кл². Его численное значение, определенное экспериментально по силе взаимодействия двух известных зарядов, находящихся на заданном расстоянии, составляет:

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

Часто его записывают в виде $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, где $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ Кл}^2 / \text{Н} \cdot \text{м}^2$ — электрическая постоянная. В среде с диэлектрической проницаемостью ϵ закон Кулона имеет вид:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2}.$$

3.1.5. Электрическое поле. Действие электрического поля на электрические заряды

Электрическое поле — это особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие электрически заряженных частиц.

Введение понятия электрического поля понадобилось для объяснения взаимодействия электрических зарядов, т. е. для получения ответа на вопросы: *почему* возникают силы, действующие на заряды, и *как* они передаются от одного заряда к другому?

Понятия электрического и магнитного полей ввел великий английский физик Майкл Фарадей. Согласно идее Фарадея, электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждый из них создает в окружающем пространстве *электрическое поле*. Поле одного заряда действует на другой заряд, и наоборот. По мере удаления от заряда поле ослабевает.

С введением понятия поля в физике утвердилась *теория близкогодействия*, главным отличием которой от теории дальнегодействия является идея о *существовании определенного процесса в пространстве между взаимодействующими телами, который длится конечное время*.

Идея эта получила подтверждение в работах великого английского физика Дж. К. Максвелла, который теоретически доказал, что электромагнитные взаимодействия должны распространяться в пространстве с конечной скоростью — c , равной скорости света в вакууме (300 000 км/с). Экспериментальным доказательством этого утверждения явилось изобретение радио.

Электрическое поле возникает в пространстве, окружающем неподвижный заряд, точно так же, как вокруг движущихся зарядов — токов либо постоянных магнитов — возникает магнитное поле. Магнитные и электрические поля могут превращаться друг в друга, образуя единое электромагнитное поле. Электрическое поле (как и магнитное) является лишь частным случаем общего электромагнитного поля. Переменные электрические и магнитные поля могут существовать и без зарядов и токов, их породивших. Электромагнитное поле переносит определенную энергию, а также импульс и массу. Таким образом, электромагнитное поле — физическая сущность, обладающая определенными физическими свойствами.

Итак, природа электрического поля состоит в следующем:

1. **Электрическое поле материально, оно существует независимо от нашего сознания.**
2. **Главным свойством электрического поля является действие его на электрические заряды с некоторой силой.** По этому действию устанавливается факт его существования. Действие поля на единичный заряд — *напряженность поля* — является одной из его основных характеристик, по которой изучается распределение поля в пространстве.

Электрическое поле неподвижных зарядов называют *электростатическим*. Со временем оно не меняется, неразрывно связано с зарядами, его породившими, и существует в пространстве, их окружающем.

3.1.6. Напряженность электрического поля

Напряженность электрического поля — векторная характеристика поля, сила, действующая на **единичный** покоящийся в данной системе отсчета электрический заряд.

Напряженность определяется по формуле:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q},$$

где $\vec{E}$ — напряженность поля; $\vec{F}$ — сила, действующая на помещенный в данную точку поля заряд q . Направление вектора $\vec{E}$ совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд, и противоположно направлению силы, действующей на отрицательный заряд.

Единицей напряженности в СИ является вольт на метр (В/м).

Напряженность поля точечного заряда. Согласно закону Кулона, точечный заряд q_0 действует на другой заряд с силой, равной

$$F = k \frac{|q_0||q|}{r^2}.$$

Модуль напряженности поля точечного заряда q_0 на расстоянии r от него равен:

$$E = \frac{F}{q} = k \frac{|q_0|}{r^2}. \quad (3.1)$$

Вектор напряженности в любой точке электрического поля направлен вдоль прямой, соединяющей эту точку и заряд (рис. 3.1).

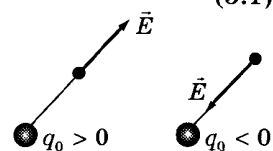


Рис. 3.1

3.1.7. Принцип суперпозиции электрических полей

Принцип суперпозиции (наложения) полей формулируется так:

Если в данной точке пространства различные заряженные частицы создают электрические поля, напряженности которых $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3$ и т. д., то результирующая напряженность поля в этой точке равна: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$

Принцип суперпозиции полей справедлив для случая, когда поля, созданные несколькими различными зарядами, не оказывают никакого влияния друг на друга, т. е. ведут себя так, как будто других полей нет. Опыт показывает, что для полей обычных интенсивностей, встречающихся в природе, это имеет место в действительности.

Благодаря принципу суперпозиции для нахождения напряженности поля системы заряженных частиц в любой точке достаточно воспользоваться выражением напряженности поля точечного заряда (3.1). На рис. 3.2 показано, как в точке А определяется напряженность поля $\vec{E}$, созданная двумя точечными зарядами q_1 и q_2 .

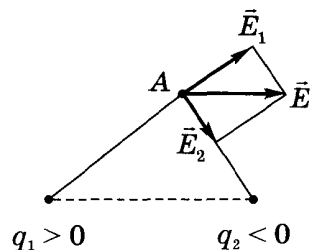


Рис. 3.2

Силовые линии электрического поля

Электрическое поле в пространстве принято представлять силовыми линиями. Понятие о силовых линиях ввел М. Фарадей при исследовании магнетизма. Затем это понятие было развито Дж. Максвеллом в исследованиях по электромагнетизму.

Силовая линия, или линия напряженности электрического поля, — это линия, касательная к которой в каждой ее точке совпадает с направлением силы, действующей на положительный точечный заряд, находящийся в этой точке поля.

На рис. 3.3–3.6 изображены линии напряженности положительно заряженного шарика (рис. 3.3); двух разноименно заряженных шариков (рис. 3.4); двух одноименно заряженных шариков (рис. 3.5) и двух пластин, заряженных разными по знаку, но одинаковыми по абсолютной величине зарядами (рис. 3.6).

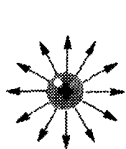


Рис. 3.3

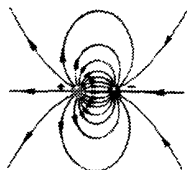


Рис. 3.4

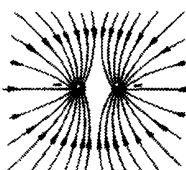


Рис. 3.5

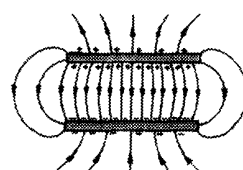


Рис. 3.6

Линии напряженности на последнем рисунке почти параллельны в пространстве между пластинами, и плотность их одинакова. Это говорит о том, что поле в этой области пространства однородно. *Однородным называется электрическое поле, напряженность которого одинакова во всех точках пространства.*

В электростатическом поле силовые линии не замкнуты, они всегда начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных зарядах. Они нигде не пересекаются, пересе-

чение силовых линий говорило бы о неопределенности направления напряженности поля в точке пересечения. Плотность силовых линий больше вблизи заряженных тел, где напряженность поля больше.

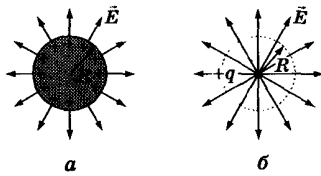


Рис. 3.7

Поле заряженного шара. Напряженность поля заряженного проводящего шара на расстоянии от центра шара, превышающем его радиус $r \geq R$, определяется по той же формуле, что и поля точечного заряда (3.1). Об этом свидетельствует распределение силовых линий (рис. 3.7, а), аналогичное распределению линий напряженности точечного заряда (рис. 3.7, б).

Заряд шара распределен равномерно по его поверхности. Внутри проводящего шара напряженность поля равна нулю.

3.1.8. Проводники в электрическом поле

Проводниками называются тела, по которым электрические заряды перемещаются свободно. К ним в первую очередь относятся металлы. Хорошая проводимость металлов объясняется наличием в них свободных электронов, которые движутся между положительно заряженными ионами решетки. Положительные ионы участия в переносе заряда не принимают.

Электронная природа носителей тока в металлах объясняется следующим образом. Кристаллическая решетка металла состоит из положительно заряженных ионов, расположенных в узлах решетки, и электронов, свободно передвигающихся между узлами. Свободные электроны — это валентные электроны атомов металла, покинувшие свои атомы. Они совершают беспорядочное движение по кристаллу, «не помня», какому атому они принадлежали. Их называют электронным газом. Свободные электроны участвуют в тепловом движении и способны перемещаться под действием электрического поля.

Внутри проводника, помещенного во внешнее электрическое поле, электростатическое поле отсутствует. Объясняется это тем, что под действием внешнего поля свободные электроны, перемещаясь в направлении, противоположном внешнему полю $\vec{E}$, распределяются по поверхности проводника, в результате чего одна часть проводника заряжается отрицательно, противоположная — положительно. Разделенные заряды создают внутреннее поле $\vec{E}_1$, которое компенсирует внешнее поле $\vec{E}$, так что суммарное поле внутри проводника равно нулю (рис. 3.8). На этом основана *электростатическая защита*. Чтобы защитить приборы от влияния электрического поля, их помещают в металлический ящик.

Таким разделением заряда объясняется *электростатическая индукция*. Если пластину металла разрезать по линии MN , обе половины окажутся заряженными (рис. 3.8).

Линии напряженности электрического поля вне проводника всегда перпендикулярны поверхности проводника. В противном случае составляющая поля, параллельная поверхности, приводила бы к постоянному перемещению зарядов (электрическому току).

Весь статический заряд проводника сосредоточен на его поверхности. В противном случае внутри проводника имелось бы электрическое поле, что не соответствует действительности. Это относится как к заряженным, так и к незаряженным проводникам, помещенным в электрическое поле.

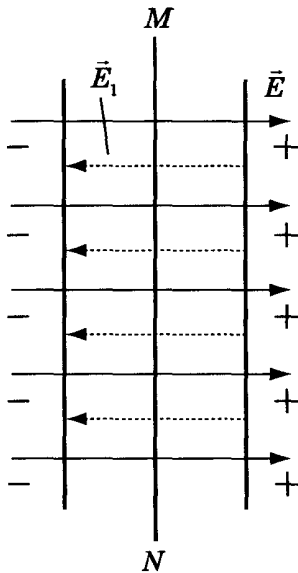


Рис. 3.8

3.1.9. Диэлектрики в электрическом поле

Диэлектрики (или изоляторы) — вещества, относительно плохо проводящие электрический ток (по сравнению с проводниками).

Термин «диэлектрик» (от греч. *dia* — через и англ. *electric* — электрический) был введен М. Фарадеем для обозначения веществ, через которые передаются электромагнитные взаимодействия.

В диэлектриках все электроны связаны, т. е. принадлежат отдельным атомам, и электрическое поле не отрывает их, а лишь слегка смещает, т. е. поляризует. Поэтому *внутри диэлектрика может существовать электрическое поле; диэлектрик оказывает на электрическое поле определенное влияние.*

Диэлектрики делятся на *полярные* и *неполярные*.

Полярные диэлектрики состоят из молекул, в которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают. Такие молекулы можно представить в виде двух одинаковых по модулю разноименных точечных зарядов, находящихся на некотором расстоянии друг от друга, называемых *диполем* (рис. 3.9).

Неполярные диэлектрики состоят из атомов и молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов совпадают.

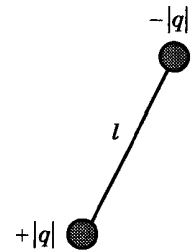


Рис. 3.9

Поляризация полярных диэлектриков

Помещение полярного диэлектрика в электростатическое поле (например, между двумя заряженными пластинами) приводит к развороту и смещению до этого хаотически ориентированных диполей вдоль поля (рис. 3.10). Разворот происходит под действием пары сил, приложенных со стороны поля к двум зарядам диполя (рис. 3.11). Смещение диполей называется *поляризацией*. Однако из-за теплового движения происходит лишь частичная поляризация. Внутри диэлектрика положительные и отрицательные заряды диполей компенсируют друг друга, а на поверхности диэлектрика появляется связанный заряд: отрицательный со стороны положительно заряженной пластины, и наоборот.

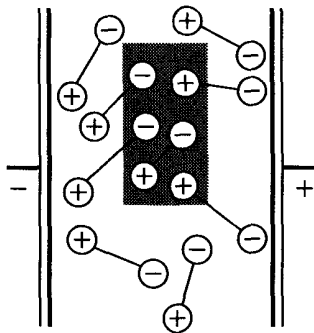


Рис. 3.10

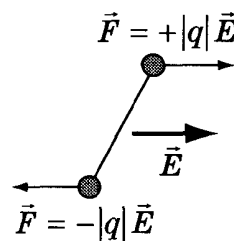


Рис. 3.11

Поляризация неполярных диэлектриков

Неполярный диэлектрик в электрическом поле также поляризуется. Под действием электрического поля положительные и отрицательные заряды в молекуле смещаются в противоположные стороны, так что центры распределения зарядов смещаются, как у полярных молекул. Ось наведенного полем диполя ориентирована вдоль поля. На поверхностях диэлектрика, примыкающих к заряженным пластинам, появляются связанные заряды.

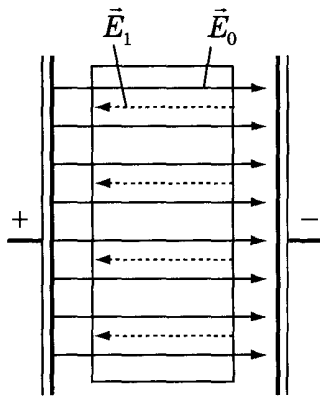


Рис. 3.12

Поляризованный диэлектрик сам создает электрическое поле ($\vec{E}_1$, рис. 3.12). Это поле ослабляет внутри диэлектрика внешнее электрическое поле $\vec{E}_0$. Степень этого ослабления зависит от свойств диэлектрика. Уменьшение напряженности электростатического поля в веществе по сравнению с полем в вакууме характеризуется относительной диэлектрической проницаемостью среды.

Относительная диэлектрическая проницаемость среды ε — это физическая величина, показывающая, во сколько раз модуль напряженности электростатического поля E внутри однородного диэлектрика меньше модуля напряженности поля E_0 в вакууме:

$$\varepsilon = E_0/E.$$

В соответствии с этим сила взаимодействия зарядов в среде в ε раз меньше, чем в вакууме:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon r^2}.$$

3.1.10. Потенциальность электростатического поля

Каждая точка пространства, в которой действуют силы, характеризуется определенным значением *потенциала*. Потенциал (потенциальная функция) (от лат. *potentia* — сила) является энергетической характеристикой векторных полей, к числу которых относятся гравитационное, электромагнитное и электростатическое поля. Рассмотрим подробнее этот вопрос.

Работа электрического поля по перемещению заряда

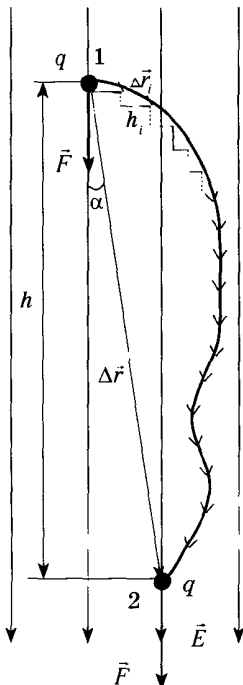


Рис. 3.13

Пусть в однородном электрическом поле $\vec{E}$ положительный заряд q перемещается на расстояние $\Delta \vec{r}$ из точки 1 в точку 2 (рис. 3.13). Сила, действующая со стороны поля на электрический заряд, направлена всегда вдоль поля и определяется по формуле:

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

Работа A , совершаемая постоянной силой $\vec{F}$ при прямолинейном перемещении, равна скалярному произведению $\vec{F}$ на $\Delta \vec{r}$:

$$A = (\vec{F} \cdot \Delta \vec{r}) = F \cdot \Delta r \cdot \cos \alpha = Fh, \quad (3.2)$$

где α — косинус угла между векторами $\vec{F}$ и $\Delta \vec{r}$. Здесь через h обозначена проекция вектора перемещения $\Delta \vec{r}$ на направление силы, параллельное $\vec{E}$.

Можно показать, что работа поля не зависит от формы траектории. Для этого достаточно разбить ее на малые прямолинейные участки $\Delta \vec{r}_i$ и применить к ним формулу (3.2), помня, что в каждой точке кривой сила параллельна полю. Работа силы равна сумме элементарных работ на всех участках:

$$A = \sum A_i = F \sum h_i = Fh.$$

Таким образом, *работа по перемещению заряда в однородном электростатическом поле зависит только от начального и конечного положений движущегося заряда и не зависит от формы траектории. При перемещении заряда по замкнутой траектории работа равна нулю.*

Сила называется **потенциальной**, если работа этой силы зависит только от начального и конечного положений точки, на которую действует сила.

Стационарное поле, действующее на материальную точку с силой $\vec{F}$, называется **потенциальным полем**, если сила $\vec{F}$ потенциальна.

Отсюда следует, что *электростатическое поле, также, как и гравитационное — потенциально.*

3.1.11. Потенциал

Потенциал электростатического поля в данной точке численно равен работе, которую совершают силы поля при перемещении единичного положительного заряда из данной точки в бесконечность.

То есть

$$\varphi = \frac{A}{q},$$

где φ — потенциал, A — работа, q — положительный заряд.

Потенциал — величина скалярная. Потенциал считается положительным, если перемещение положительного единичного заряда из данной части поля в бесконечность совершается силами поля, и отрицательным, если силы поля препятствуют такому перемещению.

Поскольку работа в силовом поле равна разности потенциальных энергий двух точек поля, между которыми осуществляется перемещение, то

$$\varphi = \frac{E_n}{q}.$$

Работа равна разности энергий конечной и начальной точек, взятой с противоположным знаком: $A = -(E_{\infty} - E_{n_1})$. Потенциальная энергия точки в бесконечности принята равной нулю: $E_{\infty} = 0$; $E_{n_1} \equiv E_n$ — потенциальная энергия рассматриваемой точки поля. Выбор нулевого уровня потенциала произволен, так как физический смысл имеет не сам потенциал, а *разность потенциалов*, или *напряжение* поля.

3.1.12. Разность потенциалов

Разность потенциалов (напряжение) между двумя точками поля равна отношению работы поля по перемещению заряда из начальной точки в конечную к этому заряду:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}. \quad (3.3)$$

Поскольку работа по перемещению заряда в потенциальном поле не зависит от формы траектории, то, зная напряжение между двумя точками, мы определим работу, совершаемую полем по перемещению единичного заряда.

Если имеется несколько точечных зарядов, то потенциал поля в некоторой точке пространства определяется как алгебраическая сумма потенциалов электрических полей каждого заряда в этой точке:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n. \quad (3.4)$$

Эквипотенциальной поверхностью, или поверхностью равного потенциала, называется поверхность, для любых точек которой разность потенциалов равна нулю. Это значит, что работа по перемещению заряда по такой поверхности равна нулю, следовательно, линии напряженности электрического поля перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям. Эквипотенциальные поверхности однородного поля представляют собой плоскости, а точечного заряда — концентрические сферы.

Вектор напряженности $\vec{E}$ (как и сила $\vec{F}$) перпендикулярен эквипотенциальным поверхностям. Эквипотенциальной является поверхность любого проводника в электростатическом поле, так как силовые линии перпендикулярны поверхности проводника. Внутри проводника разность потенциалов между любыми его точками равна нулю.

Напряжение и напряженность однородного поля

В однородном электрическом поле напряженность E во всех точках одинакова, и работа A по перемещению заряда q параллельно $\vec{E}$ на расстояние d между двумя точками с потенциалами φ_1 и φ_2 равна:

$$A = F \cdot d = qEd = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU \quad (3.5)$$

или

$$E = \frac{U}{d}. \quad (3.6)$$

Таким образом, напряженность поля пропорциональна разности потенциалов и направлена в сторону уменьшения потенциала. Поэтому положительный заряд будет двигаться в сторону уменьшения потенциала, а отрицательный — в сторону его увеличения.

Единицей напряжения (разности потенциалов) является *вольт*. Согласно формуле (3.3),

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

Разность потенциалов между двумя точками равна одному вольту, если при перемещении заряда в 1 Кл между этими точками поле совершает работу в 1 Дж.

3.1.13. Электрическая емкость конденсатора

Электроемкость

Электроемкостью проводника C называют численную величину заряда, которую нужно сообщить проводнику, чтобы изменить его потенциал на единицу:

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

Емкость характеризует способность проводника накапливать заряд. Она зависит от формы проводника, его линейных размеров и свойств среды, окружающей проводник.

Единицей емкости в СИ является *фарада* (Ф) — емкость проводника, в котором изменение заряда на 1 кулон меняет его потенциал на 1 вольт.

Электрический конденсатор

Электрический конденсатор (от лат. *condensare*, буквально — сгущать, уплотнять) — устройство, предназначенное для получения электрической емкости заданной величины, способное накапливать и отдавать (перераспределять) электрические заряды.

Конденсатор — это система из двух или нескольких равномерно заряженных проводников с равными по величине зарядами, разделенных слоем диэлектрика. Проводники называются *обкладками конденсатора*. Как правило, расстояние между обкладками, равное толщине диэлектрика, намного меньше размеров самих обкладок, так что *поле в конденсаторе практически все сосредоточено между его обкладками*. Если обкладки являются плоскими пластинами, поле между ними однородно. Электроемкость плоского конденсатора определяется по формуле:

$$C = \frac{q}{U} \sim \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (3.7)$$

где q — заряд конденсатора, U — напряжение между его обкладками, S — площадь пластины, d — расстояние между пластинами, ϵ_0 — электрическая постоянная, ϵ — диэлектрическая проницаемость среды.

Под зарядом конденсатора понимают абсолютное значение заряда одной из пластин.

Электроемкость батареи конденсаторов *при параллельном соединении* равна сумме электроемкостей отдельных конденсаторов:

$$C = C_1 + C_1 + C_1 + \dots$$

При *последовательном соединении* конденсаторов складываются обратные величины электроемкостей:

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

Очевидно, что электроемкость батареи из последовательно соединенных конденсаторов меньше электроемкости любого из конденсаторов, а при параллельном — больше.

3.1.14. Энергия поля конденсатора

Энергия заряженного конденсатора выражается формулами

$$E_n = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2},$$

которые выводятся с учетом выражений для связи работы и напряжения (3.3) и для емкости плоского конденсатора (3.6).

Энергия электрического поля. Объемная плотность энергии электрического поля (энергия поля в единице объема) напряженностью E выражается формулой:

$$\omega = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2},$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, ϵ_0 — электрическая постоянная.

Примеры заданий ЕГЭ по теме 3.1. «Электрическое поле»

Часть 1

При выполнении заданий уровня А нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

A1 1 2 3 4

- A1. Если два заряда притягиваются друг к другу, это значит, что
- 1) оба заряда имеют знак плюс
 - 2) оба заряда имеют знак минус
 - 3) один заряд имеет знак минус, второй — знак плюс
 - 4) оба заряда имеют одинаковые знаки, но разную величину заряда

A2 1 2 3 4

- A2. В результате трения янтаря о шерсть последняя оказалась заряженной до некоторого значения $+q$. Чему равен заряд янтаря?
- 1) $+q$
 - 2) $-q$
 - 3) $+2q$
 - 4) $0q$

A3 1 2 3 4

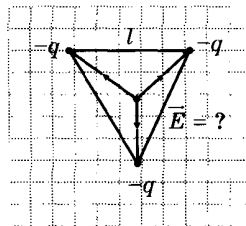
- A3. Как изменится сила взаимодействия между двумя точечными зарядами, если абсолютную величину каждого заряда увеличить вдвое, знак одного из них поменять на противоположный, а расстояние между ними уменьшить в 2 раза
- 1) останется неизменной
 - 2) увеличится в 2 раза по модулю и поменяет свое направление на противоположное
 - 3) увеличится по модулю в 8 раз
 - 4) увеличится в 16 раз по модулю и поменяет свое направление на противоположное

A4 1 2 3 4

- A4. Какую напряженность поля создает точечный заряд величиной $+3 \text{ мкКл}$ в вакууме на расстоянии 3 м от заряда? Как направлен вектор напряженности?
- 1) 3000 В/м вдоль линии, соединяющей заряд и точку направлен от заряда
 - 2) 2000 В/м, направлен перпендикулярно линии, соединяющей заряд и точку
 - 3) 2500 В/м вдоль линии, соединяющей заряд и точку направлен к заряду
 - 4) 3000 В/м вдоль линии, соединяющей заряд и точку направлен к заряду

A5 1 2 3 4

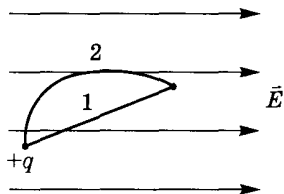
- A5. Величина напряженности электрического поля в центре равностороннего треугольника (см. рисунок), в вершинах которого расположены три равных заряда $-q$, составляет



- 1) $\frac{q}{l^2}$
- 2) $\frac{kq}{l^2}$
- 3) $\frac{2kq}{3l^2}$
- 4) 0

- A6.** На рисунке изображены траектории перемещения электрического заряда между двумя точками в однородном электростатическом поле. В каком случае работа поля по перемещению заряда больше?

- 1) вдоль траектории 1
- 2) вдоль траектории 2
- 3) одинакова
- 4) невозможно определить



- A7.** Потенциалы электрических полей трех точечных зарядов в некоторой точке А равны соответственно -5 В, $+3$ В и -1 В. Суммарное значение потенциала в этой точке составляет

- 1) 9 В
- 2) -7 В
- 3) -3 В
- 4) -5 В

- A8.** Как изменится энергия заряженного конденсатора, если напряжение между его обкладками уменьшить вдвое, а площадь пластин увеличить вдвое?

- 1) увеличится в 2 раза
- 2) уменьшится в 2 раза
- 3) увеличится в 4 раза
- 4) останется неизменной

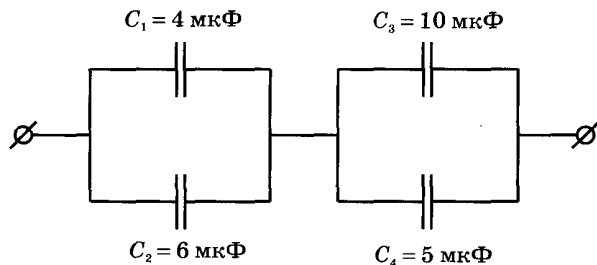
Часть 2

Ответом к заданиям В1—В4 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

- В1.** Для перемещения заряда 1 мкКл из одной точки поля в другую была совершена работа $0,4$ мДж. Определите разность потенциалов между этими точками.

- В2.** Емкость плоского конденсатора в вакууме равна $0,3$ мкФ. Чему будет равна емкость того же конденсатора, если между его обкладками вставить диэлектрик с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 6$?

- В3.** Чему равна емкость батареи конденсаторов, изображенных на рисунке? Ответ дайте в мкФ.



- В4.** Напряженность электрического поля в воде равна 10 В/м. Чему равна объемная плотность поля? Ответ дайте в мкДж/м³.

1 2 3 4 A6

1 2 3 4 A7

1 2 3 4 A8

В1

В2

В3

В4

3.2. Постоянный ток

Электрическим током называется упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.

Для того чтобы такое движение происходило, необходимо:

- 1) наличие в теле свободных заряженных частиц. Они называются *носителями тока*;
- 2) наличие силы, заставляющей носители заряда двигаться в заданном направлении. Такую силу может обеспечить электрическое поле внутри проводника, которое создает между концами проводника разность потенциалов.

Этим условиям соответствует металлический проводник, помещенный в электрическое поле. Кратковременное возникновение тока наблюдается при соединении таким проводником заряженного и незаряженного электрометров. Для существования в проводнике постоянного тока его необходимо соединить с источником тока, поддерживающим разность потенциалов в проводнике. *Если разность потенциалов не меняется со временем, ток называется постоянным.*

Электрический ток имеет определенное направление. За направление тока принимают направление движения положительно заряженных частиц.

Действие электрического тока

Наличие электрического тока можно обнаружить по тому действию, которое он производит. Таковыми являются:

- 1) *тепловое действие* (нагрев проводника). Тепловое действие тока используется в электронагревательных приборах;
- 2) *химическое действие*. Проявляется, если пропускать ток через растворы кислот, щелочей и солей. На электродах наблюдается выделение атомов (молекул), входящих в состав растворов;
- 3) *магнитное действие*. Проводник с током становится подобен магниту.

3.2.1. Сила тока

Сила электрического тока — это величина (I), характеризующая упорядоченное движение электрических зарядов и численно равная количеству заряда Δq , протекающего через определенную поверхность S (поперечное сечение проводника) за единицу времени:

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

Итак, чтобы найти силу тока I , надо электрический заряд Δq , прошедший через поперечное сечение проводника за время Δt , разделить на это время.

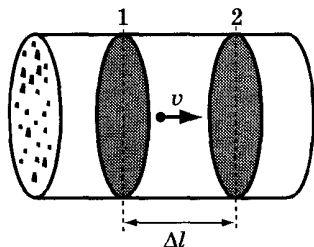


Рис. 3.14

Сила тока зависит от заряда, переносимого каждой частицей, скорости их направленного движения и площади поперечного сечения проводника.

Рассмотрим проводник (рис. 3.14) с площадью поперечного сечения S . Заряд каждой частицы q_0 . В объеме проводника, ограниченном сечениями 1 и 2, содержится $nS\Delta l$ частиц, где n — концентрация частиц. Их общий заряд $q = q_0 nS\Delta l$. Если частицы движутся со средней скоростью v , то за время $\Delta t = \Delta l/v$ все частицы, заключенные в рассматриваемом объеме, пройдут через поперечное сечение 2. Сила тока, следовательно, равна:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{q_0 nS\Delta l \cdot v}{\Delta l} = q_0 n v S.$$

В СИ единица силы тока является основной и носит название *ампер* (А) в честь французского ученого А. М. Ампера (1755–1836).

Силу тока измеряют амперметром. Принцип устройства амперметра основан на магнитном действии тока.

Оценка скорости упорядоченного движения электронов в проводнике, проведенная по формуле для медного проводника с площадью поперечного сечения 1 мм^2 , дает весьма незначительную величину — $\sim 0,1 \text{ мм/с}$.

3.2.2. Закон Ома для участка цепи

Сила тока на участке цепи равна отношению напряжения на этом участке к его сопротивлению.

Закон Ома выражает связь между тремя величинами, характеризующими протекание электрического тока в цепи, — силой тока I , напряжением U и сопротивлением R .

Закон этот был установлен в 1827 г. немецким ученым Г. Омом и поэтому носит его имя. В приведенной формулировке он называется также *законом Ома для участка цепи* (рис. 3.15). Математически закон Ома записывается в виде следующей формулы:

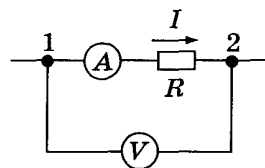


Рис. 3.15

$$I = \frac{U}{R}. \quad (3.8)$$

Зависимость силы тока от приложенной разности потенциалов на концах проводника называется *вольт-амперной характеристикой* (ВАХ) проводника.

Для любого проводника (твердого, жидкого или газообразного) существует своя ВАХ. Наиболее простой вид имеет вольт-амперная характеристика металлических проводников, заданная законом Ома (3.8), и растворов электролитов. Знание ВАХ играет большую роль при изучении тока.

Закон Ома — это основа всей электротехники. Из закона Ома (3.8) следует:

- 1) сила тока на участке цепи с постоянным сопротивлением пропорциональна напряжению на концах участка;
- 2) сила тока на участке цепи с неизменным напряжением обратно пропорциональна сопротивлению.

Эти зависимости легко проверить экспериментально. Полученные с использованием схемы, представленной на рис. 3.15, графики зависимости силы тока от напряжения при постоянном сопротивлении (см. формулу (3.8)) и силы тока от сопротивления представлены на рис. 3.16 и 3.17, соответственно. В первом случае использован источник тока с регулируемым выходным напряжением и постоянное сопротивление R , во втором — аккумулятор и переменное сопротивление (магазин сопротивлений).

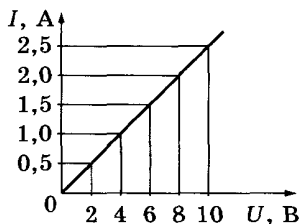


Рис. 3.16

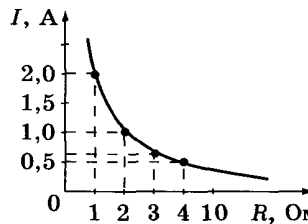


Рис. 3.17

3.2.3. Электрическое сопротивление

Электрическое сопротивление — это физическая величина, характеризующая противодействие проводника или электрической цепи электрическому току.

Электрическое сопротивление определяется как коэффициент пропорциональности R между напряжением U и силой постоянного тока I в законе Ома для участка цепи.

Единица сопротивления называется *омом* (Ом) в честь немецкого ученого Г. Ома, который ввел это понятие в физику. Один ом (1 Ом) — это сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1 В сила тока равна 1 А.

Удельное сопротивление

Сопротивление однородного проводника постоянного сечения зависит от материала проводника, его длины l и поперечного сечения S и может быть определено по формуле:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (3.9)$$

где ρ — удельное сопротивление вещества, из которого изготовлен проводник.

Удельное сопротивление вещества — это физическая величина, показывающая, каким сопротивлением обладает изготовленный из этого вещества проводник единичной длины и единичной площади поперечного сечения.

Из формулы (3.9) следует, что

$$\rho = \frac{RS}{l}.$$

Величина, обратная ρ , называется *удельной проводимостью* σ :

$$\sigma = \frac{1}{\rho}.$$

Так как в СИ единицей сопротивления является 1 Ом, единицей площади 1 м², а единицей длины 1 м, то единицей удельного сопротивления в СИ будет 1 Ом · м²/м, или 1 Ом · м. Единица удельной проводимости в СИ — Ом⁻¹м⁻¹.

На практике площадь сечения тонких проводов часто выражают в квадратных миллиметрах (мм²). В этом случае более удобной единицей удельного сопротивления является Ом·мм²/м. Так как 1 мм² = 0,000001 м², то 1 Ом·мм²/м = 10⁻⁶ Ом·м. Металлы обладают очень малым удельным сопротивлением — порядка (1 · 10⁻²) Ом·мм²/м, диэлектрики — в 10¹⁵–10²⁰ раз большим.

Зависимость сопротивления от температуры

С повышением температуры сопротивление металлов возрастает. Однако существуют сплавы, сопротивление которых почти не меняется при повышении температуры (например, константан, манганин и др.). Сопротивление же электролитов с повышением температуры уменьшается.

Температурным коэффициентом сопротивления проводника называется отношение величины изменения сопротивления проводника при нагревании на 1° С к величине его сопротивления при 0°С:

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}.$$

Зависимость удельного сопротивления проводников от температуры выражается формулой:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t).$$

В общем случае α зависит от температуры, но если интервал температур невелик, то температурный коэффициент можно считать постоянным. Для чистых металлов $\alpha = (1/273)\text{K}^{-1}$. Для растворов электролитов $\alpha < 0$. Например, для 10% раствора поваренной соли $\alpha = -0,02\text{ K}^{-1}$. Для константана (сплава меди с никелем) $\alpha = 10^{-5}\text{ K}^{-1}$.

Зависимость сопротивления проводника от температуры используется в *термометрах сопротивления*.

3.2.4. Электродвижущая сила. Внутреннее сопротивление источника тока

Сторонние силы. Для поддержания постоянной разности потенциалов на концах проводника, а значит, и тока необходимо наличие сторонних сил неэлектрической природы, с помощью которых происходит разделение электрических зарядов (рис. 3.18). *Сторонними силами* называются любые силы, действующие на электрически заряженные частицы в цепи, за исключением электростатических (т. е. кулоновских).

Сторонние силы приводят в движение заряженные частицы внутри всех источников тока: в генераторах, на электростанциях, в гальванических элементах, аккумуляторах и т. д.

При замыкании цепи создается электрическое поле во всех проводниках цепи. Внутри источника тока заряды движутся под действием сторонних сил против кулоновских сил (электроны движутся от положительно заряженного электрода к отрицательному), а во всей остальной цепи их приводит в движение электрическое поле (рис. 3.18).

В источниках тока в процессе работы по разделению заряженных частиц происходит превращение разных видов энергии в электрическую. По типу преобразованной энергии различают следующие виды электродвижущей силы:

- *электростатическая* — в электрофорной машине, в которой происходит превращение механической энергии при трении в электрическую;
- *термоэлектрическая* — в термоэлементе — внутренняя энергия нагретого спая двух проволок, изготовленных из разных металлов, превращается в электрическую;
- *фотоэлектрическая* — в фотоэлементе. Здесь происходит превращение энергии света в электрическую: при освещении некоторых веществ, например, селена, оксида меди (I), кремния наблюдается потеря отрицательного электрического заряда;
- *химическая* — в гальванических элементах, аккумуляторах и др. источниках, в которых происходит превращение химической энергии в электрическую.

Электродвижущая сила (ЭДС) — характеристика источников тока. Понятие ЭДС было введено Г. Омом в 1827 г. для цепей постоянного тока. В 1857 г. Кирхгофф определил ЭДС как *работу сторонних сил при переносе единичного электрического заряда вдоль замкнутого контура*:

$$\mathcal{E} = A_{\text{ст}}/q,$$

где $\mathcal{E}$ — ЭДС источника тока, $A_{\text{ст}}$ — работа сторонних сил, q — количество перемещенного заряда.

Электродвижущую силу выражают в вольтах.

Можно говорить об электродвижущей силе на любом участке цепи. Это удельная работа сторонних сил (работа по перемещению единичного заряда) не во всем контуре, а только на данном участке.

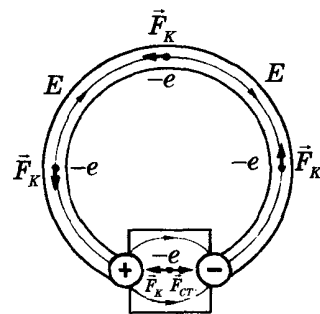


Рис. 3.18

Внутреннее сопротивление источника тока

Пусть имеется простая замкнутая цепь, состоящая из источника тока (например, гальванического элемента, аккумулятора или генератора) и резистора с сопротивлением R . Ток в замкнутой цепи не прерывается нигде, следовательно, он существует и внутри источника тока. Любой источник представляет собой некоторое сопротивление для тока. Оно называется *внутренним сопротивлением источника тока* и обозначается буквой r .

В генераторе r — это сопротивление обмотки, в гальваническом элементе — сопротивление раствора электролита и электродов.

Таким образом, источник тока характеризуется величинами ЭДС и внутреннего сопротивления, которые определяют его качество. Например, электростатические машины имеют очень большую ЭДС (до десятков тысяч вольт), но при этом их внутреннее сопротивление огромно (до сотни Мом). Поэтому они непригодны для получения сильных токов. У гальванических элементов ЭДС всего лишь приблизительно 1 В, но зато и внутреннее сопротивление мало (приблизительно 1 Ом и меньше). Это позволяет с их помощью получать токи, измеряемые амперами.

3.2.5. Закон Ома для полной электрической цепи

Электрическая цепь

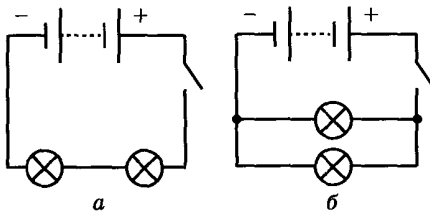


Рис. 3.19

Источник электрического тока, соединенный проводами с различными электроприборами и потребителями электрической энергии, образует электрическую цепь.

Электрическую цепь принято изображать с помощью схем (рис. 3.19), в которых элементы электрической цепи (сопротивления, источники тока, выключатели, лампы, приборы и т. д.) обозначены специальными значками.

Направление тока в цепи — это направление от положительного полюса источника тока к отрицательному. Это правило было установлено в XIX в. и с тех пор соблюдается.

Перемещение реальных зарядов может не совпадать с условным направлением тока. Так, в металлах носителями тока являются отрицательно заряженные электроны, и движутся они от отрицательного полюса к положительному, т. е. в обратном направлении. В электролитах реальное перемещение зарядов может совпадать или быть противоположным направлению тока, в зависимости от того, какие ионы являются носителями заряда — положительные или отрицательные.

Включение элементов в электрическую цепь может быть *последовательным* или *параллельным*.

Закон Ома для полной цепи

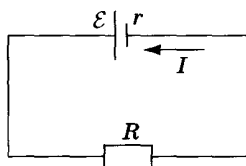


Рис. 3.20

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из источника тока и резистора R (рис. 3.20). Закон Ома для полной цепи устанавливает связь между силой тока в цепи, ЭДС и полным сопротивлением цепи, состоящим из внешнего сопротивления R и внутреннего сопротивления источника тока r .

Работа сторонних сил $A_{\text{ст}}$ источника тока, согласно определению ЭДС ($\mathcal{E}$) равна $A_{\text{ст}} = \mathcal{E}q$, где q — заряд, перемещенный ЭДС. Согласно определению тока $q = It$, где t — время, в течение которого переносился заряд. Отсюда имеем:

$$A_{\text{ст}} = \mathcal{E}It. \quad (3.10)$$

Тепло, выделяемое при совершении работы в цепи, согласно *закону Джоуля — Ленца*, равно:

$$Q = I^2 R t + I^2 r t. \quad (3.11)$$

Согласно закону сохранения энергии $A = Q$. Приравнявая (3.10) и (3.11), получим:

$$\mathcal{E} = IR + Ir. \quad (3.12)$$

Закон Ома для замкнутой цепи обычно записывается в виде:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (3.13)$$

Сила тока в полной цепи равна отношению ЭДС цепи к ее полному сопротивлению.

Если цепь содержит несколько последовательно соединенных источников с ЭДС $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$, $\mathcal{E}_3$ и т. д., то полная ЭДС цепи равна алгебраической сумме ЭДС отдельных источников. Знак ЭДС источника определяется по отношению к направлению обхода контура, который выбирается произвольно, например, на рис. 3.21 — против часовой стрелки. Сторонние силы внутри источника совершают при этом положительную работу. И наоборот, для цепи справедливо следующее уравнение:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = |\mathcal{E}_1| - |\mathcal{E}_2| + |\mathcal{E}_3|.$$

В соответствии с (3.13) сила тока положительна при положительной ЭДС — направление тока во внешней цепи совпадает с направлением обхода контура. Полное сопротивление цепи с несколькими источниками равно сумме внешнего и внутренних сопротивлений всех источников ЭДС, например, для рис. 3.21:

$$R_n = R + r_1 + r_2 + r_3.$$

3.2.6. Параллельное и последовательное соединение проводников

Для **параллельного соединения** проводников (рис. 3.22) справедливы следующие соотношения:

- а) электрический ток, поступающий в точку А разветвления проводников (она называется также *узлом*), равен сумме токов в каждом из элементов цепи:

$$I = I_1 + I_2;$$

- б) напряжение U на концах проводников, соединенных параллельно, одно и то же:

$$U = U_1 = U_2;$$

- в) при параллельном соединении проводников складываются их обратные сопротивления:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2};$$

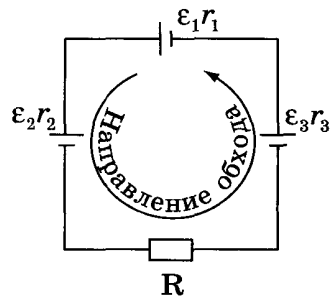


Рис. 3.21

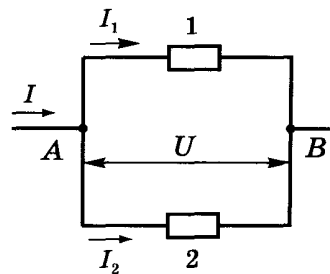


Рис. 3.22

г) сила тока и сопротивление в проводниках связаны соотношением:

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

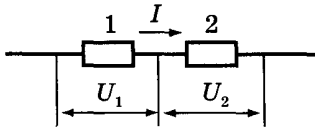


Рис. 3.23

Для последовательного соединения проводников в цепи (рис. 3.23) справедливы следующие соотношения:

а) для общего тока I :

$$I = I_1 = I_2,$$

где I_1 и I_2 — ток в проводниках 1 и 2 соответственно; т. е. при последовательном соединении проводников сила тока на отдельных участках цепи одинакова;

б) общее напряжение U на концах всего рассматриваемого участка равно сумме напряжений на отдельных его участках:

$$U = U_1 + U_2;$$

в) полное сопротивление R всего участка цепи равно сумме последовательно соединенных сопротивлений:

$$R = R_1 + R_2;$$

г) также справедливо соотношение:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

3.2.7. Работа электрического тока. Закон Джоуля-Ленца

Для определения работы, совершаемой током, проходящим по некоторому участку цепи, следует воспользоваться определением напряжения: $U = \frac{A}{q}$. Отсюда следует, что

$$A = qU,$$

где A — работа тока; q — электрический заряд, прошедший за данное время через рассматриваемый участок цепи. Подставляя в последнее равенство формулу $q = It$, получаем:

$$A = IUt. \quad (3.14)$$

Работа электрического тока на участке цепи равна произведению напряжения на концах этого участка на силу тока и на время, в течение которого совершалась работа.

Закон Джоуля - Ленца

Закон Джоуля — Ленца гласит: количество теплоты, выделяемое в проводнике на участке электрической цепи с сопротивлением R при протекании по нему постоянного тока I в течение времени t равно произведению квадрата тока на сопротивление и время:

$$Q = I^2 R t. \quad (3.15)$$

Закон был установлен в 1841 г. английским физиком Дж. П. Джоулем, а в 1842 г. подтвержден точными опытами русского ученого Э. Х. Ленца. Само же явление нагрева проводника при прохождении по нему тока было открыто еще в 1800 г. французским ученым А. Фуркруа, которому удалось раскалить железную спираль, пропустив через нее электрический ток.

Из закона Джоуля — Ленца следует, что при последовательном соединении проводников, поскольку ток в цепи всюду одинаков, максимальное количество тепла будет выделяться на проводнике с наибольшим сопротивлением. Это используется в технике, например, для распыления металлов.

При параллельном соединении все проводники находятся под одинаковым напряжением, но токи в них разные. Из формулы (3.15) следует, что, так как, согласно закону Ома (см. *Ома закон*)

$$I = \frac{U}{R}, \text{ то}$$

$$Q = \frac{U^2 t}{R}. \quad (3.16)$$

Следовательно, на проводнике с меньшим сопротивлением будет выделяться больше тепла.

Если в формуле (3.14) выразить U через IR , воспользовавшись законом Ома, получим Закон Джоуля — Ленца. Это лишний раз подтверждает тот факт, что работа тока расходуется на выделение тепла на активном сопротивлении в цепи.

3.2.8. Мощность электрического тока

Действие тока характеризуют не только работой A , но и мощностью P . *Мощность* тока показывает, какую работу совершает ток за единицу времени. Если за время t была совершена работа A , то мощность тока $P = \frac{A}{t}$. Подставляя в это равенство выражение (3.14), получаем:

$$P = IU.$$

Это выражение можно переписать в разных формах, воспользовавшись законом Ома для участка цепи:

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

В СИ работу выражают в джоулях (Дж), мощность — в ваттах (Вт), а время — в секундах (с). При этом

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}, \quad 1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

Рассчитаем наибольшую допустимую мощность потребителей электроэнергии, которые могут одновременно работать в квартире. Так как в жилых зданиях сила тока в проводке не должна

превышать $I = 10 \text{ А}$, то при напряжении $U = 220 \text{ В}$ соответствующая электрическая мощность оказывается равной:

$$P = 10 \text{ А} \cdot 220 \text{ В} = 2200 \text{ Вт} = 2,2 \text{ кВт}.$$

Одновременное включение в сеть приборов с бóльшей суммарной мощностью приведет к увеличению силы тока, и потому недопустимо.

В быту работу тока (или израсходованную на совершение этой работы электроэнергию) измеряют с помощью специального прибора, называемого *электрическим счетчиком* (счетчиком электроэнергии). При прохождении тока через этот счетчик внутри его начинает вращаться легкий алюминиевый диск. Скорость его вращения прямо пропорциональна силе тока и напряжению. Поэтому по числу оборотов, сделанных им за данное время, можно судить о работе, совершенной током за это время. Работа тока при этом выражается обычно в *киловатт-часах* (кВт · ч).

1 кВт · ч — это работа, совершаемая электрическим током мощностью 1 кВт в течение 1 ч. Так как 1 кВт = 1000 Вт, а 1 ч = 3600 с, то

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 1000 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} = 3\,600\,000 \text{ Дж}.$$

3.2.9. Свободные носители электрического заряда в металлах, жидкостях и газах

Электрический ток в металлах

Электрический ток в металлах обусловлен упорядоченным движением свободных электронов (электронов проводимости).

Положительные ионы участия в переносе заряда не принимают.

Электронная природа носителей тока в металлах объясняется следующим образом (рис. 3.24). Кристаллическая решетка металла состоит из положительно заряженных ионов, расположенных в узлах решетки, и электронов, свободно передвигающихся между узлами. Эти электроны — валентные электроны атомов металла, покинувшие свои атомы. Свободные электроны совершают беспорядочное движение по кристаллу, «не помня» уже, какому атому они принадлежали. Их называют также электронным газом. Конечно, при этом сумма всех положительных зарядов ионов решетки равна суммарному отрицательному заряду всех свободных электронов, так что металл остается незаряженным, или электронейтральным.

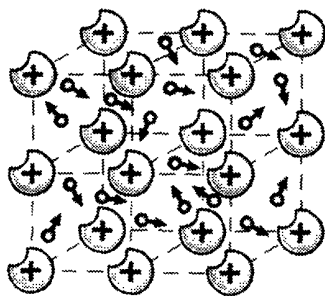


Рис. 3.24

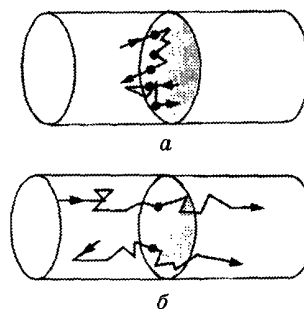


Рис. 3.25

Не следует думать, что под действием электрического тока все электроны в проводнике устремляются в одном направлении. У них просто появляется преимущественное направление движения (вдоль поля), которое накладывается на хаотическое движение в отсутствие поля (рис. 3.25). При

этом средняя скорость их движения составляет несколько миллиметров в секунду. А вот скорость распространения самого электрического поля — порядка $3 \cdot 10^8$ м/с. С этой же скоростью распространяется электрический ток.

Здесь можно провести аналогию электрического тока с течением воды в водопроводе, а распространение электрического поля — с распространением давления воды. Вода в кране находится под давлением всего столба воды в водонапорной башне. Но из крана течет та вода, которая в нем была, а вода из башни дойдет до крана гораздо позднее, т. к. движение воды происходит с гораздо меньшей скоростью, чем распространение давления.

Существование свободных электронов в металлах было доказано опытами Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси (качественно), Б. Стюартом и Р. Томсоном — с получением количественных результатов (1916 г.).

Схема опыта изображена на рис. 3.26. Катушка с большим числом витков тонкой проволоки приводилась в быстрое вращение вокруг своей оси. Концы катушки через специальные контакты замыкались на чувствительный гальванометр. После раскручивания катушки она резко тормозилась специальным приспособлением. При этом гальванометр регистрировал кратковременный ток, направление которого указывало на отрицательный знак носителей заряда. В опыте были использованы инерционные свойства электронов: при резком торможении проводника они продолжали некоторое время двигаться (подобно пассажирам резко тормозящего вагона). Из этих опытов было определено отношение заряда к массе носителя тока, которое совпало с соответствующим значением для электрона ($1,8 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.)

Объяснение многих свойств металлов, в частности, его электрических свойств (закон Ома), дает *электронная теория металлов*. Классическая электронная теория металлов основывается на представлении об электронах проводимости как об *электронном газе*, подобном идеальному атомарному газу молекулярной физики. В этой теории считается, что движение электронов подчиняется законам Ньютона, взаимодействием электронов между собой пренебрегают, а взаимодействие с положительными ионами решетки сводят только к соударениям.

Для объяснения закона Ома на основе классической электронной теории металлов необходимо найти выражение для средней скорости v направленного упорядоченного движения электронов в электрическом поле напряженностью E и подставить в известную формулу для силы тока I :

$$I = q_0 n v S,$$

где $q_0 = e$ — заряд электрона, n — концентрация электронов, S — площадь поперечного сечения проводника.

Электроны в металле, участвуя в тепловом движении, постоянно сталкиваются с ионами решетки. Так как масса электрона во много раз меньше массы иона, то после очередного столкновения все направления скорости равновероятны. Это означает, что начальная скорость после очередного столкновения может иметь любое направление и, значит, среднее значение вектора начальной скорости равно нулю, и начальная скорость не оказывает влияния на среднюю скорость направленного движения электронов. Это позволяет считать, что *средняя скорость упорядоченного движения электронов v равна произведению ускорения на среднее время τ движения электрона между двумя соударениями с ионами: $v = a \cdot \tau$* . Используя второй закон Ньютона и выражение для напряженности электрического поля, получим:

$$v = a\tau = \frac{F\tau}{m} = \frac{eE\tau}{m} = \frac{eU\tau}{mL},$$

где F — сила, действующая на электрон со стороны поля, U — напряжение на концах проводника длиной L .

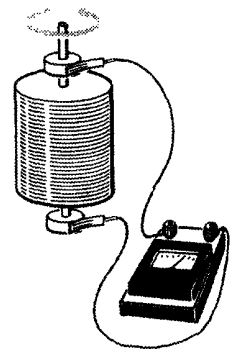


Рис. 3.26

Далее, подставляя полученное уравнение в выражение $I = q_0 n v S$, получим:

$$I = e n v S = \frac{e^2 n \tau S U}{m L}.$$

Как видно из полученного выражения, сила тока пропорциональна напряжению, как это и следует из закона Ома. Это является следствием того, что средняя скорость направленного движения электронов прямо пропорциональна напряженности электрического поля в металле.

Однако классическая электронная теория не в состоянии объяснить многие экспериментальные зависимости, например, зависимость сопротивления от температуры. Связано это с тем, что движение электронов в металле подчиняется законам квантовой механики, а не классической механики Ньютона.

Электрический ток в газах

Процесс протекания электрического тока через газ называется *газовым разрядом*.

При комнатных температурах газы практически не проводят электрический ток, так как состоят из нейтральных атомов, т. е. являются *диэлектриками*.

При нагреве или облучении ультрафиолетовым светом, рентгеновскими лучами либо другим видом излучения атомы газа получают дополнительную энергию, которая может привести к *ионизации*. Так, например, при нагреве за счет увеличения скорости молекул часть из них при столкновениях друг с другом распадается на положительно заряженные ионы и электроны.

Проводимость газов обеспечивается как электронами, так и положительно заряженными ионами.

Рекомбинация — процесс воссоединения электрона с положительным ионом — наблюдается, если прекратить действие ионизатора. Если внешнее поле отсутствует, то при действии ионизатора устанавливается динамическое равновесие между количеством исчезающих и вновь образующихся пар заряженных частиц.

Несамостоятельный разряд в газе, ионизованном каким-либо ионизатором, возникает в постоянном поле и существует до тех пор, пока существует ионизирующий агент. ВАХ несамостоятельного разряда представляет собой кривую, выходящую на насыщение.

Самостоятельный разряд. При некотором напряжении, зависящем от рода газа, давления и расстояния между электродами, происходит пробой и зажигается *самостоятельный разряд*, который не нуждается больше во внешнем ионизаторе. Ток через трубку при этом резко возрастает.

Причиной возникновения самостоятельного разряда является *ионизация электронным ударом*. При соударении атома с электроном, который разгоняется электрическим полем E до энергии, достаточной для ионизации атома, образуются два электрона, которые при своем движении к аноду также разгоняются и, сталкиваясь на своем пути с другими атомами, ионизуют их, в результате возникает электронная лавина.

Для обеспечения длительного самостоятельного разряда, кроме ионизации электронным ударом, необходима еще эмиссия (испускание) электронов с катода. Такая эмиссия может быть обеспечена либо за счет *термоэлектронной эмиссии* из катода (испускания электронов из металла при нагреве), либо за счет выбивания электронов из катода положительными ионами с большой кинетической энергией.

Электрический ток в электролитах

Электролиз. *Электролитами*, или проводниками второго рода, называются вещества, в которых прохождение электрического тока сопровождается электролизом. *Электролиз* — это выделение на электродах составных частей растворенных веществ или продуктов вторичной реакции.

В электролитах, являющихся водными растворами (или расплавами) кислот, щелочей, солей, перенос заряда осуществляется ионами. Такая проводимость называется *ионной*.

Закон электролиза установлен опытным путем М. Фарадеем.

Масса вещества, выделившегося на электроде за время Δt при прохождении электрического тока, пропорциональна силе тока и времени:

$$m = kI\Delta t.$$

Величину k называют *электрохимическим эквивалентом* данного вещества и выражают в кг/Кл. Электрохимический эквивалент численно равен массе вещества, выделившегося на электродах при переносе ионами заряда $\Delta q = I \cdot \Delta t = 1$ Кл.

Можно показать, что

$$k = \frac{1}{eN_A} \cdot \frac{M}{n},$$

где e — заряд электрона, N_A — число Авогадро, M — молярная (или атомная) масса вещества, n — валентность иона, т. е. $k = \frac{m_{0i}}{q_{0i}}$ — электрохимический эквивалент равен отношению массы иона к его заряду.

Таким образом, измеряя величины m и Δq , можно определить электрохимические эквиваленты различных веществ.

Формулы могут быть использованы для определения заряда электрона:

$$e = \frac{M}{mnN_A} I\Delta t.$$

Все входящие в эту формулу величины либо известны (M , n , N_A), либо измеряются (m , I , Δt). Именно таким образом в 1874 г. было определено значение $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

3.2.10. Полупроводники. Собственная проводимость полупроводников

К полупроводникам относят широкий класс веществ, которые отличаются от металлов тем, что:

- а) концентрация подвижных носителей заряда в них существенно ниже, чем концентрация атомов;
- б) эта концентрация (а с ней и электропроводность) может меняться под влиянием температуры, освещения, небольшого количества примесей;
- в) электрическое сопротивление уменьшается с ростом температуры (рис. 3.27).

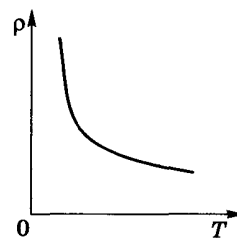


Рис. 3.27

Отличие полупроводников от диэлектриков условно. К диэлектрикам обычно относят вещества с удельным сопротивлением $\rho \geq 10^{11} - 10^{12}$ Ом · см (при комнатной температуре); к полупроводникам соответственно с $\rho \leq 10^{11}$ Ом · см.

Полупроводники по своему строению делятся на кристаллические, амфорные и стеклообразные, жидкие. По химическому составу полупроводники делятся на элементарные, т. е. состоящие из атомов одного сорта (Ge, Si, Se, Te), двойные, тройные, четверные соединения. Полупроводниковые соединения принято классифицировать по номерам групп периодической таблицы элементов, к которым принадлежат входящие в соединение элементы. Например, GaAs и InSb относятся к соединениям типа $A^{III}B^V$ (существуют также и органические полупроводники).

Строение полупроводников

Строение полупроводников рассмотрим на примере кремния (рис. 3.28, а).

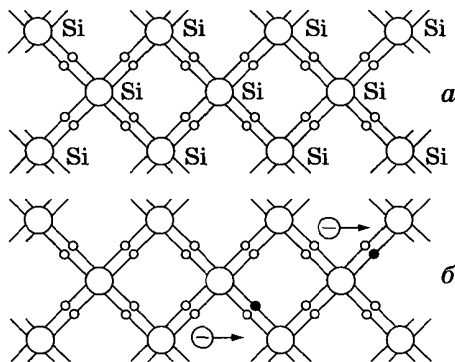


Рис. 3.28

В кристаллической решетке кремния (Si) каждый атом имеет четыре ближайших соседа. Кремний является четырехвалентным элементом, и взаимодействие пары соседних атомов осуществляется с помощью ковалентной, или парноэлектронной, связи, когда в каждой связи участвует по одному электрону от каждого атома. Это так называемые коллективизированные электроны; большую часть времени они проводят в пространстве между соседними ионами кремния, удерживая их друг возле друга. Каждый валентный электрон может двигаться по связи вдоль всего кристалла (от одного атома к другому).

При низких температурах парноэлектронные связи достаточно прочны, они не разрываются, поэтому кремний не проводит электрический ток.

Электронная проводимость

Увеличение температуры приводит к увеличению кинетической энергии валентных электронов и разрыву валентных связей. Часть электронов становятся свободными (подобно электронам в металле), кристаллы под действием электрического поля начинают проводить ток (рис. 3.28, б). Проводимость полупроводников, обусловленная свободными электронами, называется *электронной проводимостью*. Концентрация носителей заряда при увеличении температуры от 300 до 700 К растет от 10^{17} до 10^{24} м⁻³, что и приводит к падению сопротивления (рис. 3.27).

Дырочная проводимость

Разрыв валентных связей при увеличении температуры приводит к образованию вакантного места с недостающим электроном, которое имеет эффективный положительный заряд и называется *дыркой*. Становится возможным переход валентных электронов из соседних связей на освободившееся место. Такое движение отрицательного заряда (электрона) в одном направлении эквивалентно движению положительного заряда (дырки) в противоположном.

Перемещение дырок по кристаллу происходит хаотически, но если к нему приложить разность потенциалов, начнется их направленное движение вдоль электрического поля. Проводимость кристалла, обусловленная дырками, называется дырочной проводимостью.

Электронная и дырочная проводимость чистых (беспримесных) полупроводников называется *собственной проводимостью полупроводников*.

Собственная проводимость полупроводников невелика. Так, в Ge число носителей заряда (электронов) составляет всего одну десятиллиардную часть от общего числа атомов.

3.2.11. Примесная проводимость полупроводников

Отличительной особенностью полупроводников, как упоминалось выше, является их способность существенно увеличивать проводимость при добавлении примесей в кристалл. Проводимость эта, в отличие от собственной, так и называется — *примесная проводимость*. Именно благодаря этому свойству полупроводники нашли столь широкое практическое применение.

Примесная проводимость полупроводника, в зависимости от вида примеси, может быть электронной — ее создают *донорные примеси* — либо дырочной — ее создают *акцепторные примеси*. Полупроводники с электронной проводимостью называются *полупроводниками n -типа* (от слова *negative* — отрицательный). Полупроводники с дырочной примесной проводимостью называются *полупроводниками p -типа* (от слова *positive* — положительный).

Донорные примеси

Донорными примесями являются такие, добавление которых приводит к существенному увеличению концентрации свободных электронов в кристалле. Для того, чтобы примесь была донором электронов, необходимо, чтобы валентность элементов, ее составляющих, была больше валентности атомов решетки. Для кремния такой донорной примесью являются атомы пентавалентного мышьяка (As). Четыре электрона As участвуют в образовании парноэлектронной связи, а пятый электрон оказывается очень слабо связанным с атомом As и легко становится свободным.

Акцепторные примеси

Акцепторные примеси приводят к увеличению концентрации дырок. В соответствии с вышесказанным, валентность атомов акцепторной примеси ниже валентности атомов решетки кристалла. Для кремния такой примесью является трехвалентный индий (In). Теперь для образования нормальных парноэлектронных связей с соседями не хватает одного электрона. В результате образуется дырка. При наличии поля возникает дырочная проводимость.

В полупроводнике n -типа электроны являются основными носителями заряда, а дырки — неосновными. В полупроводнике p -типа дырки являются основными носителями заряда, а электроны — неосновными.

p - n Переход

p - n -Переход — это простейшая полупроводниковая структура, которая используется в большинстве полупроводниковых приборов. Для получения p - n -перехода полупроводниковый образец легируют (вводят в него примеси) таким образом, чтобы в одной его части преобладали донорные примеси, а в другой — акцепторные, в результате получают контакт полупроводника n -типа с полупроводником p -типа (рис. 3.29). Основным свойством p - n -перехода является его способность пропускать ток только в одном направлении, если напряжение приложено к образцу так, что проводимость осуществляется основными носителями тока, как это показано на рис. 3.29: « $-$ » со стороны полупроводника n -типа, « $+$ » — со стороны p -типа (электроны из n -области переходят в p -область, и наоборот). Если теперь поменять полярность приложенного напряжения U , то ток через p - n -переход практически не идет, т. к. переход через контакт осуществляется неосновными носителями, которых мало. Вольт-амперная характеристика p - n -перехода изображена на рис. 3.30. Здесь правая часть графика — это *прямой переход* (осуществляемый основными носителями), левая, пунктирная часть — *обратный переход* (осуществляемый неосновными носителями). Свойства p - n -перехода используются для выпрямления переменного тока в устройствах, которые называются *полупроводниковыми диодами*.

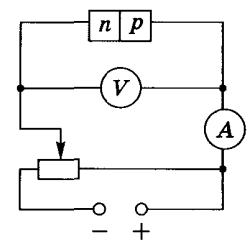


Рис. 3.29

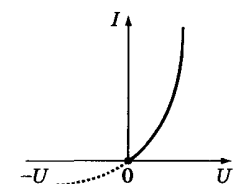


Рис. 3.30

Примеры заданий ЕГЭ по теме 3.2. «Законы постоянного тока»

Часть 1

При выполнении заданий уровня А нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

1 2 3 4

А1. Как изменится сила электрического тока при увеличении концентрации носителей тока в проводнике в 2 раза, увеличении их скорости в 2 раза и одновременном увеличении площади поперечного сечения проводника в 1,5 раза?

- 1) увеличится в 1,5 раз
- 2) увеличится в 3 раза
- 3) уменьшится в 2 раза
- 4) увеличится в 6 раз

1 2 3 4

А2. Закон Ома для участка цепи выражается формулой

- 1) $I = \frac{U}{R}$
- 2) $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$
- 3) $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$
- 4) $I = q_0 n v S$

1 2 3 4

А3. Закон Ома для полной цепи выражается формулой:

- 1) $R = \rho \frac{l}{S}$
- 2) $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$
- 3) $I = \frac{\mathcal{E}}{(R + r)}$
- 4) $U = \frac{I}{R}$

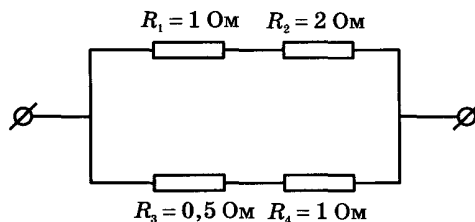
1 2 3 4

А4. Сторонние силы при перемещении электрического заряда в 5 Кл от одного полюса к другому внутри источника тока совершают работу, равную 10 Дж. ЭДС источника составляет

- 1) 50 В
- 2) 0,5 В
- 3) 2 В
- 4) 5 В

1 2 3 4

А5. Зная закон Джоуля–Ленца, можно утверждать, что максимальное количество тепла выделится на сопротивлении (см. рисунок)



- 1) R_1
- 2) R_2
- 3) R_3
- 4) R_4

А.6. Добавление примеси фосфора в германий

- 1) приведет к образованию проводимости n -типа
- 2) приведет к образованию проводимости p -типа
- 3) не изменит проводимость фосфора
- 4) невозможно определить

Часть 2

Ответом к заданиям В1—В4 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

В1. Каково сопротивление алюминиевой проволоки длиной 2 м и диаметром 1 мм?

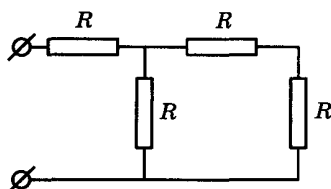
1
2
3
4
В1

В2. Каково сопротивление проводника из чистого металла при температуре 50 °С, если его сопротивление при 0 °С равно 10 Ом (температурный коэффициент сопротивления проводника считать постоянным в этом интервале температур)?

1
2
3
4
В2

В3. Определите сопротивление участка цепи, изображенного на рисунке, состоящего из одинаковых резисторов с сопротивлением R , выразив его в «единицах R ».

1
2
3
4
В3



В4. Каково сопротивление нити электролампы мощностью 60 Вт?

1
2
3
4
В4

В задании В5 на установление соответствия требуется указать последовательность цифр, соответствующих правильному ответу.

В5. Установите соответствие между проводником (левый столбец) и типом свободных носителей в нем (правый столбец).

- | | |
|------------------|--|
| А) металл | 1) положительно заряженные ионы; |
| Б) жидкость | 2) отрицательно заряженные ионы; |
| В) газ | 3) и положительно, и отрицательно заряженные ионы; |
| Г) полупроводник | 4) электроны и ионы; |
| | 5) дырки; |
| | 6) электроны |

Впишите во вторую строку таблицы номера правильных ответов.

А	Б	В	Г

1
2
3
4
В5

3.3. Магнитное поле

3.3.1. Магнитное поле. Взаимодействие токов

Магнитное поле — одна из форм материи (отличная от вещества), существующая в пространстве, окружающем постоянные магниты, проводники с током и движущиеся заряды. Магнитное поле вместе с электрическим полем образует единое электромагнитное поле.

Магнитное поле не только создается постоянными магнитами, движущимися зарядами и токами в проводниках, но и действует на них же.

Термин «магнитное поле» был введен в 1845 г. М. Фарадеем. К тому времени был уже известен ряд явлений электродинамики, требующих объяснения. К ним относятся, в частности, следующие.

1. Явление взаимодействия постоянных магнитов (установление магнитной стрелки вдоль магнитного меридиана Земли, притяжение разноименных полюсов, отталкивание одноименных), известное с древних времен и систематически исследованное У. Гильбертом (результаты опубликованы в 1600 г. в его трактате «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле»).

2. В 1820 г. датский ученый Г. Х. Эрстед обнаружил, что магнитная стрелка, помещенная вблизи проводника, по которому течет ток, поворачивается, стремясь расположиться перпендикулярно проводнику.

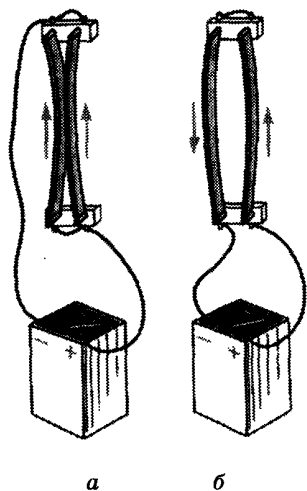


Рис. 3.31

3. В том же году французский физик Ампер, которого заинтересовали опыты Эрстеда, обнаружил взаимодействие двух прямолинейных проводников с током. Оказалось, что если токи в проводниках текут в одну сторону, т. е. параллельны, то проводники притягиваются (рис. 3.31, а), если в противоположные стороны (т. е. антипараллельны), то отталкиваются (рис. 3.31, б).

Взаимодействия между проводниками с током, т. е. взаимодействия между движущимися электрическими зарядами, называют магнитными, а силы, с которыми проводники с током действуют друг на друга, — магнитными силами.

Согласно теории близкодействия, которой придерживался М. Фарадей, ток в одном из проводников не может непосредственно влиять на ток в другом проводнике. Аналогично случаю с неподвижными электрическими зарядами, вокруг которых существует электрическое поле, был сделан вывод, что *в пространстве, окружающем токи, существует магнитное поле*, которое действует с некоторой силой на другой проводник с током, помещенный в это поле, либо на постоянный магнит. В свою очередь, магнитное поле, создаваемое вторым проводником с током, действует на ток в первом проводнике.

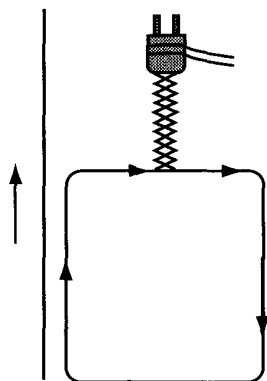


Рис. 3.32

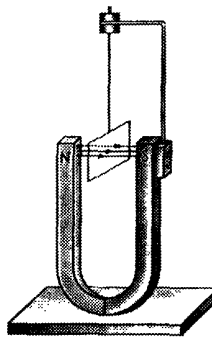


Рис. 3.33

Подобно тому как электрическое поле обнаруживается по его воздействию на пробный заряд, внесенный в это поле, магнитное поле можно обнаружить по ориентирующему действию магнитного поля на рамку с током малых (по сравнению с расстояниями, на которых магнитное поле заметно меняется) размеров (рис. 3.32). Провода, подводящие ток к рамке, следует сплести (или расположить близко друг к другу), тогда результирующая сила, действующая со стороны магнитного поля на эти провода, будет равна нулю. Силы же, действующие на такую рамку с током, будут ее поворачивать, так что ее плоскость установится перпендикулярно линиям индукции магнитного поля. В примере, приведенном на рис. 3.32, рамка повернется так, чтобы проводник с током оказался в плоскости рамки. При изменении направления тока в проводнике рамка повернется на 180° . В поле между полюсами постоянного магнита рамка повернется плоскостью перпендикулярно магнитным силовым линиям магнита (рис. 3.33).

3.3.2. Взаимодействие магнитов

Постоянный магнит

Постоянный магнит — это изделие из материала, являющегося автономным (самостоятельным, изолированным) источником постоянного магнитного поля.

Природные (естественные) магниты

Магнитные свойства некоторых природных минералов были известны уже в древности. Так, имеются письменные свидетельства более чем 2000-летней давности об использовании в Китае естественных постоянных магнитов в качестве компасов. О притяжении и отталкивании магнитов и намагничивании ими железных опилок упоминается в трудах древнегреческих и римских ученых (например, в поэме «О природе вещей» Лукреция Кара).

Природные магниты представляют собой куски магнитного железняка (магнетита), состоящего из FeO (31 %) и Fe_2O (69 %). Если такой кусок минерала поднести к мелким железным предметам — гвоздям, опилкам, тонкому лезвию и т. д., они к нему притянутся (рис. 3.34, а).

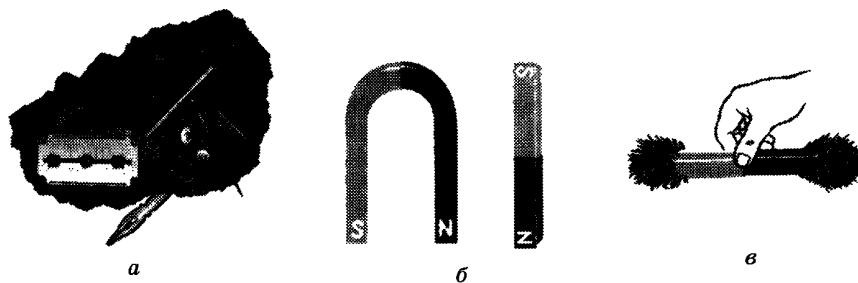


Рис. 3.34

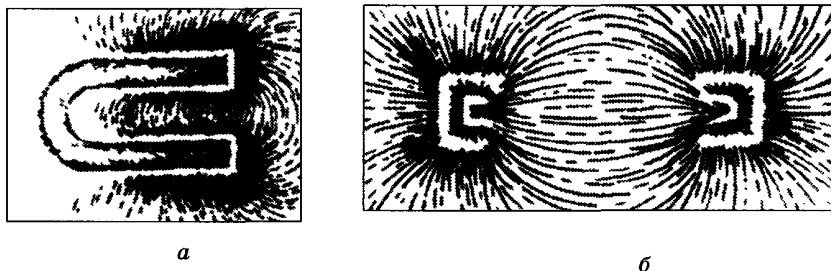


Рис. 3.35

Искусственные постоянные магниты

Искусственные постоянные магниты изготавливают из специальных сплавов, в которые входят железо, никель, кобальт и др. Эти металлы приобретают магнитные свойства (намагничиваются), если их поднести к постоянным магнитам. Поэтому, чтобы изготовить из них постоянные магниты, их специально держат в сильных магнитных полях, после чего они сами становятся источниками постоянного магнитного поля и способны длительное время сохранять магнитные свойства.

На рис. 3.34, б изображены дугообразный и полосовой магниты. На рис. 3.35, а, б даны картины магнитных полей этих магнитов, полученных методом, который впервые применил в своих исследованиях М. Фарадей: с помощью железных опилок, рассыпанных на листе бумаги, на котором лежит магнит. У каждого магнита есть два полюса — это места наибольшего сгущения магнитных силовых линий (их называют также *линиями магнитного поля*, или *линиями магнитной индукции поля*). Это места, к которым сильнее всего притягиваются железные опилки (рис. 3.34, в). Один из полюсов принято называть *северным* (N), другой — *южным* (S). Если поднести два магнита друг к другу одноименными полюсами, можно увидеть, что они отталкиваются, а если разноименными — притягиваются.

На рис. 3.35 наглядно видно, что магнитные линии магнита — *замкнутые линии* (точно такие, как магнитные линии магнитного поля постоянного тока). На рис. 3.36 а, б показаны силовые линии магнитного поля двух магнитов, обращенных друг к другу одноименными и разноименными полюсами. Центральная часть этих картин напоминает картины электрических полей двух зарядов (разноименных и одноименных). Однако существенным различием электрического и магнитного полей является то, что линии электрического поля начинаются на зарядах и заканчиваются на них. Магнитных же зарядов в природе не существует. Линии магнитного поля выходят из северного полюса магнита и входят в южный, они продолжаются и в теле магнита, т. е., как было сказано выше, являются замкнутыми линиями. Поля, силовые линии которых замкнуты, называются *вихревыми*. Магнитное поле — это вихревое поле (в этом его отличие от электрического).

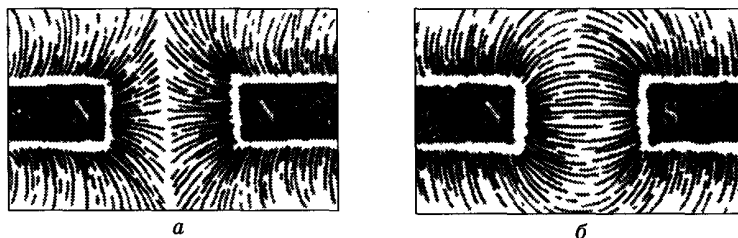


Рис. 3.36

Применение магнитов

Самым древним магнитным прибором является всем хорошо известный компас. В современной технике магниты используются очень широко: в электродвигателях, в радиотехнике, в электроизмерительной аппаратуре и т. д.

Магнитное поле Земли

Земной шар является магнитом. Как у всякого магнита, у него есть свое магнитное поле и свои магнитные полюсы. Именно поэтому стрелка компаса ориентируется в определенном направлении. Понятно, куда именно должен указывать северный полюс магнитной стрелки: ведь *притягиваются разноименные полюсы*. Поэтому северный полюс магнитной стрелки указывает на южный магнитный полюс Земли. Этот полюс находится на севере земного шара, несколько в стороне от

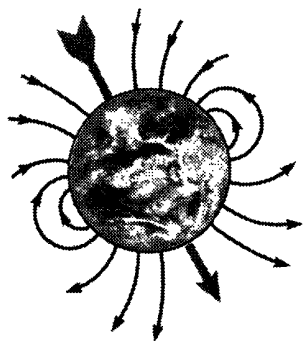


Рис. 3.37

северного географического полюса (на острове Принца Уэльского — около 75° северной широты и 99° западной долготы, на расстоянии примерно 2100 км от северного географического полюса).

При приближении к северному географическому полюсу силовые линии магнитного поля Земли все под большим углом наклоняются к горизонту, и в области южного магнитного полюса становятся вертикальными (рис. 3.37).

Северный магнитный полюс Земли находится вблизи южного географического полюса, а именно на $66,5^\circ$ южной широты и 140° восточной долготы. Здесь силовые линии магнитного поля выходят из Земли.

Другими словами, магнитные полюсы Земли не совпадают с ее географическими полюсами. Поэтому направление магнитной стрелки не совпадает с направлением географического меридиана, и магнитная стрелка компаса лишь приблизительно показывает направление на север.

На стрелку компаса могут влиять также некоторые природные явления, например, *магнитные бури*, которые являются временными изменениями магнитного поля Земли, связанными с солнечной активностью. Солнечная активность сопровождается выбросом с поверхности Солнца потоков заряженных частиц, в частности, электронов и протонов. Эти потоки, движущиеся с большой скоростью, создают свое магнитное поле, взаимодействующее с магнитным полем Земли.

На земном шаре (кроме кратковременных изменений магнитного поля) встречаются области, в которых наблюдается постоянное отклонение направления магнитной стрелки от направления магнитной линии Земли. Это области *магнитной аномалии* (от греч. *anomalía* — отклонение, ненормальность). Одной из самых больших таких областей является Курская магнитная аномалия. Причиной аномалий являются огромные залежи железной руды на сравнительно небольшой глубине.

Земное магнитное поле надежно защищает поверхность Земли от космического излучения, действие которого на живые организмы разрушительно.

Полеты межпланетных космических станций и кораблей позволили установить, что у Луны и планеты Венера отсутствует магнитное поле, а у планеты Марс оно очень слабое.

3.3.3. Индукция магнитного поля

Магнитная индукция

Магнитная индукция ($\vec{B}$) — это векторная физическая величина, характеризующая магнитное поле.

За направление вектора магнитной индукции $\vec{B}$ принимается:

1) направление от южного полюса S к северному полюсу N магнитной стрелки, свободно устанавливающейся в магнитном поле (рис. 3.38), или

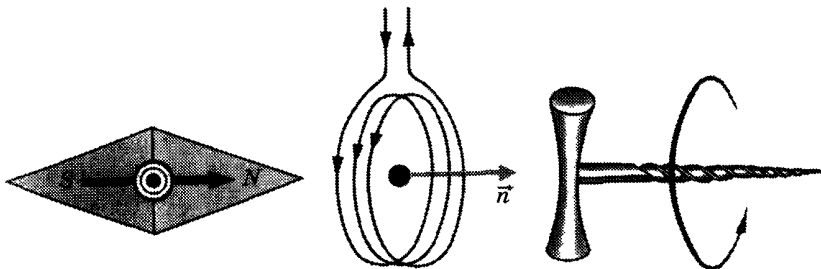


Рис. 3.38

2) направление положительной нормали к замкнутому контуру с током на гибком подвесе, свободно устанавливающемся в магнитном поле. Положительной считается нормаль, направленная в сторону перемещения острия буравчика (с правой нарезкой), рукоятку которого вращают по направлению тока в рамке.

Ясно, что направления 1) и 2) совпадают, что было установлено еще опытами Ампера.

Что касается величины магнитной индукции (т. е. ее модуля) B , которая могла бы характеризовать силу действия поля, то экспериментами было установлено, что максимальная сила F , с которой поле действует на проводник с током (помещенный перпендикулярно линиям индукции магнитного поля), зависит от силы тока I в проводнике и от его длины Δl (пропорциональна им). Однако сила, действующая на элемент тока (единичной длины и силы тока), зависит только от самого поля, т. е. отношение $\frac{F}{I\Delta l}$ для данного поля является величиной постоянной (аналогично отношению силы к заряду для электрического поля). Эту величину и определяют как *магнитную индукцию*:

$$B = \frac{F}{I\Delta l}.$$

Индукция магнитного поля в данной точке равна отношению максимальной силы, действующей на проводник с током, к длине проводника и силе тока в проводнике, помещенном в эту точку.

Чем больше магнитная индукция в данной точке поля, тем с большей силой будет действовать поле в этой точке на магнитную стрелку или движущийся электрический заряд.

Единицей магнитной индукции в СИ является *тесла* (Тл), названная в честь хорватского электротехника Николы Теслы. Как видно из формулы, $1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$

Линии магнитной индукции

Для наглядного представления магнитного поля М. Фарадей ввел понятие *магнитных силовых линий*, которые он неоднократно демонстрировал в своих опытах. Картина силовых линий легко может быть получена с помощью железных стружек, насыпанных на картон (рис. 3.39–3.42). На рис. 3.39 представлены линии магнитной индукции прямого тока, на рис. 3.40 — соленоида, на рис. 3.41 — кругового тока, на рис. 3.42 — прямого магнита.

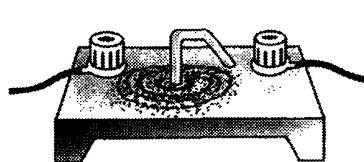


Рис. 3.39

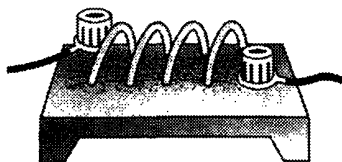


Рис. 3.40

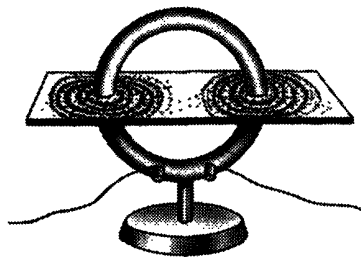


Рис. 3.41

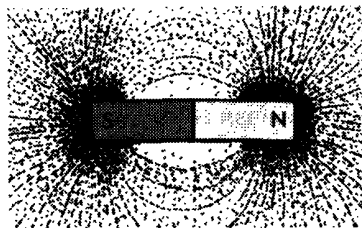


Рис. 3.42

Линиями магнитной индукции, или магнитными силовыми линиями, или просто магнитными линиями называют линии, касательные к которым в любой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции $\vec{B}$ в этой точке поля.

Направление магнитного поля прямого тока можно определить по *правилу правого буравчика*.

Если вращать рукоятку буравчика так, чтобы поступательное движение острия буравчика указывало направление тока, то направление вращения рукоятки буравчика укажет направление силовых линий магнитного поля тока.

Направление магнитного поля прямого тока можно определять также и с помощью *первого правила правой руки*.

Если охватить проводник правой рукой, направив отогнутый большой палец по направлению тока, то кончики остальных пальцев в каждой точке покажут направление вектора индукции в этой точке.

Вихревое поле

Линии магнитной индукции являются замкнутыми, это свидетельствует о том, что в природе нет магнитных зарядов. Поля, силовые линии которых замкнуты, называют *вихревыми полями*. То есть магнитное поле — это вихревое поле. Этим оно отличается от электрического поля, создаваемого зарядами.

Соленоид

Соленоид — это проволочная спираль с током.

Соленоид характеризуется числом витков на единицу длины n , длиной l и диаметром d . Толщина провода в соленоиде и шаг спирали (винтовой линии) малы по сравнению с его диаметром d и длиной l . Термин «соленоид» применяют и в более широком значении — так называют катушки с произвольным сечением (квадратный соленоид, прямоугольный соленоид), и не обязательно цилиндрической формы (тороидальный соленоид). Различают длинный соленоид ($l \gg d$) и короткий ($l \ll d$). В тех случаях, когда соотношение между d и l специально не оговаривается, подразумевается длинный соленоид.

Соленоид был изобретен в 1820 г. А. Ампером для усиления открытого Х. Эрстедом магнитного действия тока и применен Д. Араго в опытах по намагничиванию стальных стержней. Магнитные свойства соленоида были экспериментально изучены Ампером в 1822 г. (тогда же им был введен термин «соленоид»). Была установлена эквивалентность соленоида постоянным природным магнитам, что явилось подтверждением электродинамической теории Ампера, которая объясняла магнетизм взаимодействием скрытых в телах кольцевых молекулярных токов.

Силовые линии магнитного поля соленоида изображены на рис. 3.43 а. Направление этих линий определяют с помощью *второго правила правой руки*.

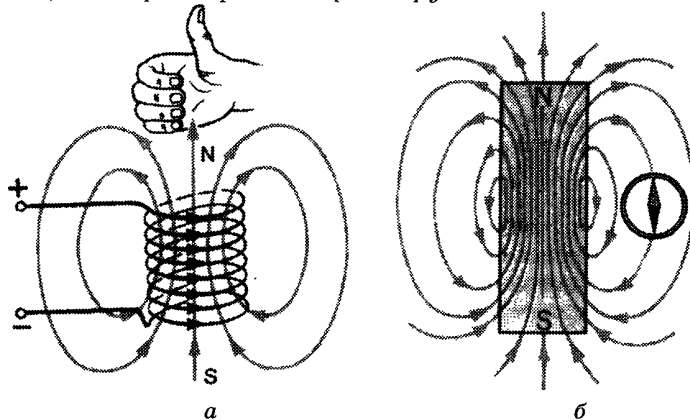


Рис. 3.43

Если обхватить соленоид ладонью правой руки, направив четыре пальца по току в витках, то отставленный большой палец укажет направление магнитных линий внутри соленоида.

Сравнив магнитное поле соленоида с полем постоянного магнита (рис. 3.43, б), можно заметить, что они очень похожи. Как и у магнита, у соленоида есть два полюса — северный (N) и южный (S). Северным полюсом называют тот, из которого магнитные линии выходят; южным полюсом — тот, в который они входят. Северный полюс у соленоида всегда располагается с той стороны, на которую указывает большой палец ладони при ее расположении в соответствии со вторым правилом правой руки.

Соленоид в виде катушки с большим числом витков используют в качестве магнита.

Исследования магнитного поля соленоида показывают, что магнитное действие соленоида увеличивается с увеличением силы тока и числа витков в соленоиде. Кроме того, магнитное действие соленоида или катушки с током усиливается при введении в него железного стержня, который называют *сердечником*.

Электромагниты

Соленоид с железным сердечником внутри называется *электромагнитом*.

Электромагниты могут содержать не одну, а несколько катушек (обмоток) и иметь при этом разные по форме сердечники.

Подобный электромагнит впервые был сконструирован английским изобретателем У. Стерджемом в 1825 г. При массе 0,2 кг электромагнит У. Стерджена удерживал груз весом 36 Н. В том же году Дж. Джоуль увеличил подъемную силу электромагнита до 200 Н, а через шесть лет американский ученый Дж. Генри построил электромагнит массой 300 кг, способный удерживать груз массой 1 т!

Современные электромагниты могут поднимать грузы массой несколько десятков тонн. Они используются на заводах при перемещении тяжелых изделий из чугуна и стали. Электромагниты используются также в сельском хозяйстве для очистки зерен ряда растений от сорняков и в других отраслях промышленности.

3.3.4. Закон Ампера

На прямолинейный участок проводника Δl , по которому течет ток I , в магнитном поле с индукцией B действует сила F .

Для вычисления этой силы используют выражение:

$$F = B I \Delta l \sin \alpha,$$

где α — угол между вектором $\vec{B}$ и направлением отрезка проводника с током (элементом тока); за направление элемента тока принимают направление, в котором по проводнику течет ток (рис. 3.44). Сила F называется *силой Ампера* в честь французского физика А. М. Ампера, который первым обнаружил действие магнитного поля на проводник с током. (На самом деле Ампер установил закон для силы взаимодействия между двумя элементами проводников с током. Он был сторонником теории дальнего действия и не пользовался понятием поля. Однако по традиции и в память о заслугах ученого выражение для силы, действующей на проводник с током со стороны магнитного поля, также называют законом Ампера.)

Направление силы Ампера определяется с помощью правила левой руки.

Если расположить ладонь левой руки так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в нее перпендикулярно, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока в проводнике, то отставленный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник с током (рис. 3.44). Таким образом, сила Ампера всегда перпендикулярна как вектору индукции магнитного поля, так и направлению тока в проводнике, т. е. перпендикулярна плоскости, в которой лежат эти два вектора.

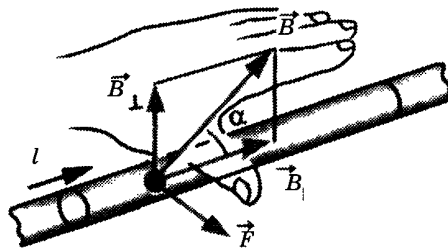


Рис. 3.44

Следствием действия силы Ампера является вращение рамки с током в постоянном магнитном поле (рис. 3.45). Это находит практическое применение во многих устройствах, например, в *электроизмерительных приборах* — гальванометрах, амперметрах, где подвижная рамка с током вращается в поле постоянного магнита и по углу отклонения стрелки, неподвижно связанной с рамкой, можно судить о величине тока, протекающего в цепи.

Благодаря вращающему действию магнитного поля на рамку с током возможным стало также создание и использование *электродвигателей* — машин, в которых электрическая энергия превращается в механическую.

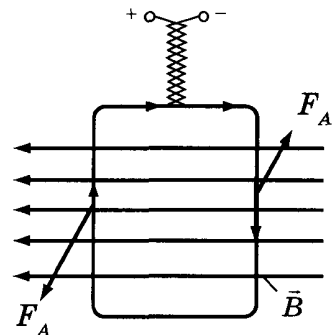


Рис. 3.45

3.3.5. Сила Лоренца

Сила Лоренца — это сила, действующая на движущийся точечный электрический заряд во внешнем магнитном поле.

Нидерландский физик Х. А. Лоренц в конце XIX в. установил, что сила, действующая со стороны магнитного поля на движущуюся заряженную частицу, всегда перпендикулярна направлению движения частицы и силовым линиям магнитного поля, в котором эта частица движется.

Направление силы Лоренца можно определить с помощью правила левой руки.

Если расположить ладонь левой руки так, чтобы четыре вытянутых пальца указывали направление движения заряда, а вектор магнитной индукции поля входил в ладонь, то отставленный большой палец укажет направление силы Лоренца, действующей на положительный заряд.

Если заряд частицы отрицательный, то сила Лоренца будет направлена в противоположную сторону (рис. 3.46).

Модуль силы Лоренца легко определяется из закона Ампера и составляет:

$$F = |q|vB \sin \alpha, \quad (3.17)$$

где q — заряд частицы, v — скорость ее движения, α — угол между векторами скорости и индукции магнитного поля.

Если кроме магнитного поля есть еще и электрическое поле, которое действует на заряд с силой $\vec{F}_{эл} = q\vec{E}$, то полная сила, действующая на заряд, равна:

$$\vec{F} = \vec{F}_{эл} + \vec{F}_Л.$$

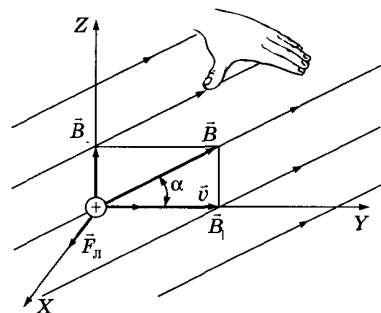


Рис. 3.46

часто именно эту полную силу называют силой Лоренца, а силу, выраженную формулой (3.17), называют *магнитной частью силы Лоренца*.

Поскольку сила Лоренца перпендикулярна направлению движения частицы, она не может изменить ее скорость (она не совершает работы), а может изменить лишь направление ее движения, т. е. искривить траекторию.

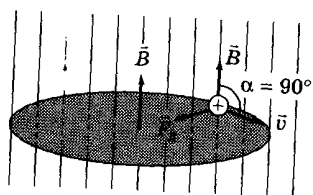


Рис. 3.47

Такое искривление траектории электронов в кинескопе телевизора легко наблюдать, если поднести к его экрану постоянный магнит: изображение исказится.

Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле.

Пусть заряженная частица влетает со скоростью v в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям напряженности (рис. 3.47). Сила, действующая со стороны магнитного поля на частицу, заставит ее равномерно вращаться по окружности радиусом r , который легко найти, воспользовавшись вторым законом Ньютона, выражением для центростремительного ускорения и формулой (3.17):

$$\frac{mv^2}{r} = |q| v B.$$

Отсюда получим

$$r = \frac{mv}{|q| B},$$

где m — масса частицы.

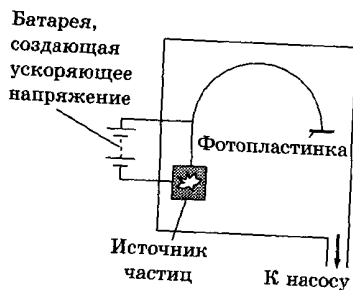
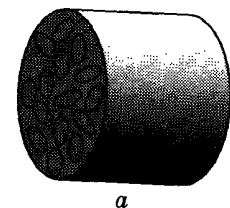


Рис. 3.48

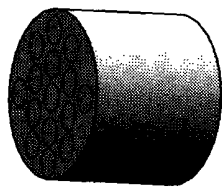
Применение силы Лоренца. Действие магнитного поля на движущиеся заряды применяется, например, в *масс-спектрографах*, позволяющих разделять заряженные частицы по их удельным зарядам, т. е. по отношению заряда частицы к ее массе, и по полученным результатам точно определять массы частиц (рис. 3.48).

Вакуумная камера прибора помещена в поле (вектор индукции $\vec{B}$ перпендикулярен рисунку). Ускоренные электрическим полем заряженные частицы (электроны или ионы), описав дугу, попадают на фотопластину, где оставляют след, позволяющий с большой точностью измерить радиус траектории r . По этому радиусу определяется удельный заряд иона. Зная заряд иона, легко вычислить его массу.

3.3.6. Магнитные свойства веществ



а



б

Рис. 3.49

Для того, чтобы объяснить существование магнитного поля постоянных магнитов, Ампер предположил, что в веществе, обладающем магнитными свойствами, существуют микроскопические круговые токи (они были названы *молекулярными*). Идея эта впоследствии, после открытия электрона и строения атома, блестяще подтвердилась: эти токи создаются движением электронов вокруг ядра и, будучи ориентированы одинаково, в сумме создают поле вокруг и внутри магнита (рис. 3.49). На рис. 3.49, а плоскости, в которых расположены элементарные электрические токи, ориентированы беспорядочно вследствие хаотического теплового движения атомов, и вещество не проявляет магнитных свойств. В намагниченном состоянии (под действием, например, внешнего магнитного поля) (рис. 3.49, б) эти плоскости ориентированы одинаково, и их действия складываются.

Магнитная проницаемость. Реакция среды на воздействие внешнего магнитного поля с индукцией B_0 (поле в вакууме) определяется магнитной восприимчивостью μ :

$$\mu = \frac{B}{B_0},$$

где B — индукция магнитного поля в веществе. Магнитная проницаемость аналогична диэлектрической проницаемости ϵ .

По своим магнитным свойствам вещества делятся на *диамагнетики*, *парамагнетики* и *ферромагнетики*. У диамагнетиков коэффициент μ , характеризующий магнитные свойства среды, меньше 1 (например, у висмута $\mu = 0,999824$); у парамагнетиков $\mu > 1$ (у платины $\mu = 1,00036$); у ферромагнетиков $\mu \gg 1$ (железо, никель, кобальт).

Диамагнетики отталкиваются от магнита, парамагнетики — притягиваются. По этим признакам их можно отличить друг от друга. У большинства веществ магнитная проницаемость практически не отличается от единицы, только у ферромагнетиков намного превосходит ее, достигая нескольких десятков тысяч единиц.

Ферромагнетики. Наиболее сильные магнитные свойства проявляют ферромагнетики. Магнитные поля, создаваемые ферромагнетиками, намного сильнее внешнего намагничивающего поля. Правда, магнитные поля ферромагнетиков создаются не вследствие обращения электронов вокруг ядер — *орбитального магнитного момента*, а вследствие собственного вращения электрона — собственного магнитного момента, называемого *спином*.

Температура Кюри (T_c) — это температура, выше которой ферромагнитные материалы теряют свои магнитные свойства. Для каждого ферромагнетика она своя. Например, для железа $T_c = 753^\circ\text{C}$, для никеля $T_c = 365^\circ\text{C}$, для кобальта $T_c = 1000^\circ\text{C}$. Существуют ферромагнитные сплавы, у которых $T_c < 100^\circ\text{C}$.

Первые детальные исследования магнитных свойств ферромагнетиков были выполнены выдающимся русским физиком А. Г. Столетовым (1839–1896).

Применяются ферромагнетики очень широко: в качестве постоянных магнитов (в электроизмерительных приборах, громкоговорителях, телефонах и т. д.), стальных сердечников в трансформаторах, генераторах, электродвигателях (для усиления магнитного поля и экономии электроэнергии). На магнитных лентах, изготовленных из ферромагнетиков, осуществляется запись звука и изображения для магнитофонов и видеоманитрофонов. На тонкие магнитные пленки производится запись информации для запоминающих устройств в электронно-вычислительных машинах.

Примеры заданий ЕГЭ по теме 3.3. «Магнитное поле»

Часть 1

При выполнении заданий уровня А нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

A1 1 2 3 4

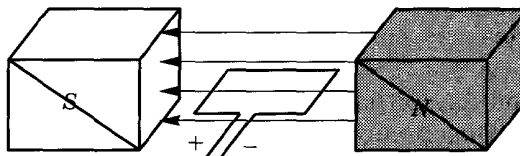
- A1. Легкая магнитная стрелка, свободно вращающаяся в горизонтальной плоскости, установлена между полюсами большого подковообразного магнита. Как поведет себя стрелка?
- 1) повернется так, что северный полюс ее будет указывать на северный полюс магнита
 - 2) повернется так, что северный полюс ее будет указывать на южный полюс магнита
 - 3) повернется перпендикулярно линии, соединяющей полюса магнита

A2 1 2 3 4

- A2. Где находится северный магнитный полюс Земли?
- 1) вблизи северного географического полюса Земли
 - 2) вблизи южного географического полюса Земли
 - 3) вблизи экватора, в районе нулевого меридиана
 - 4) вблизи экватора, в районе 180° меридиана

A3 1 2 3 4

- A3. Будет ли поворачиваться рамка с током, изображенная на рисунке, и если да, то как?
- 1) повернется по часовой стрелке на 90°
 - 2) не будет поворачиваться
 - 3) повернется против часовой стрелки на 90°
 - 4) повернется по часовой стрелке на 45°



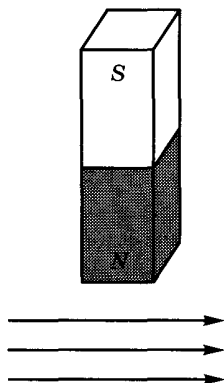
A4 1 2 3 4

- A4. Электрон и протон попадают в однородное магнитное поле, имея одинаковые скорости. Как будут отличаться радиусы кривизны их траекторий?
- 1) радиус кривизны траектории электрона больше, чем протона
 - 2) невозможно определить
 - 3) не будут отличаться
 - 4) радиусы кривизны протона и электрона будут соотноситься, как их массы

A5 1 2 3 4

- A5. Протон и α -частица влетают в однородное магнитное поле. Скорость обеих частиц направлена перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Каково отношение периода обращения протона к периоду обращения α -частицы?
- 1) 4
 - 2) 2
 - 3) 0,5
 - 4) 1

- А6.** К горизонтальному пучку положительных ионов сверху подносят магнит (см. рисунок). При этом пучок отклонится



- 1) вниз 2) вверх 3) от читателя 4) к читателю

Часть 2

Ответом к заданиям В1—В3 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

- В1.** Электрон движется со скоростью 3000 км/с в однородном магнитном поле с магнитной индукцией 0,1 Тл. Направление скорости электрона и линий магнитной индукции составляют прямой угол. Определите силу, действующую на электрон.
- В2.** Определите силу тока в проводе, если на участок этого провода длиной 20 см действует с силой 0,5 Н однородное магнитное поле, магнитная индукция которого равна 1 Тл. При этом угол между направлением линий магнитной индукции и тока равен 30° .
- В3.** Протон в магнитном поле с индукцией 0,01 Тл описывает окружность радиусом 10 см. Какова скорость протона?
- В4.** Магнитный поток внутри контура с площадью поперечного сечения 30 см^2 равен 0,15 мВб. Определите индукцию поля внутри контура, считая поле однородным.
- В5.** На рисунках А–Г показаны направления параллельных токов (вид сверху). Как будут себя вести проводники с токами:

- А) Б) В) Г)

- 1) будут притягиваться
2) будут отталкиваться
3) не будут взаимодействовать.

Впишите во вторую строку таблицы номера правильных ответов.

А	Б	В	Г

1 2 3 4 А6

В1

В2

В3

В4

В5

3.4. Электромагнитная индукция

3.4.1. Магнитный поток

Под магнитным потоком понимают поток Φ вектора магнитной индукции $\vec{B}$ через какую-либо поверхность S .

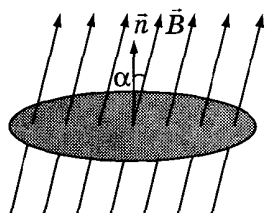


Рис. 3.50

Магнитный поток Φ , пронизывающий контур, равен произведению модуля вектора индукции магнитного поля $\vec{B}$ на площадь S , ограниченную этим контуром, и на косинус угла α между нормалью к плоскости контура $\vec{n}$ и вектором $\vec{B}$ (рис. 3.50).

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$

Произведение $B \cos \alpha = B_n$ является проекцией вектора магнитной индукции на нормаль к плоскости контура, поэтому

$$\Phi = B_n S.$$

Магнитный поток пропорционален числу линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность контура, и характеризует распределение магнитного поля на поверхности, ограниченной замкнутым контуром.

Единицей магнитного потока в СИ является *вебер* (Вб). Магнитный поток в 1 Вб создается однородным магнитным полем с индукцией 1 Тл через поверхность площадью 1 м^2 , расположенную перпендикулярно вектору магнитной индукции.

3.4.2. Явление электромагнитной индукции

Явление электромагнитной индукции было открыто английским ученым М. Фарадеем 29 августа 1831 г.

Заключается оно в том, что при любом изменении магнитного потока, пронизывающего контур замкнутого проводника, в этом проводнике возникает электрический ток, существующий в течение всего процесса изменения магнитного потока. Явление электромагнитной индукции можно обнаружить:

- 1) при относительном движении катушки и магнита (рис. 3.51 а, б);

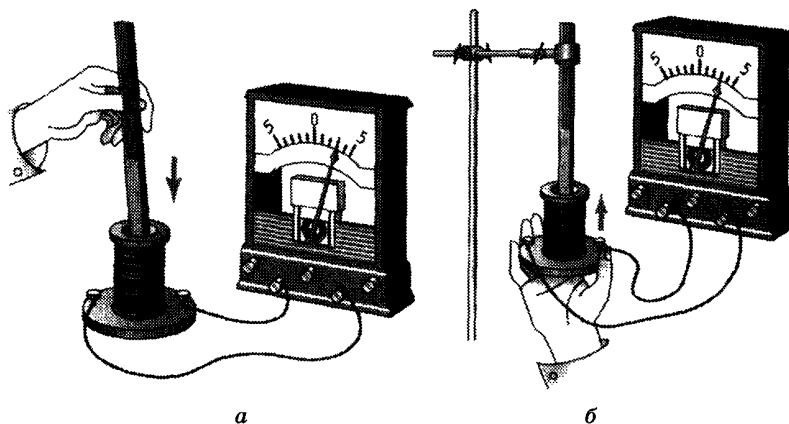


Рис. 3.51

2) при изменении индукции магнитного поля в контуре, расположенном перпендикулярно линиям магнитного поля (рис. 3.52). На этом рисунке катушка A , включенная в цепь источника тока, вставлена в другую катушку C , подключенную к гальванометру. При замыкании и размыкании цепи катушки A в катушке C возникает индукционный ток. Индукционный ток возникает также при изменении тока в катушке C или при движении катушек друг относительно друга;

3) при изменении положения контура, расположенного в постоянном магнитном поле (рис. 3.53). Ток в контуре появляется как при вращении контура в поле постоянного магнита (рис. 3.53, a), так и при вращении самого магнита внутри контура (рис. 3.53, b).

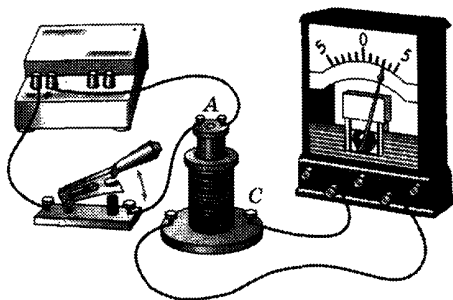


Рис. 3.52

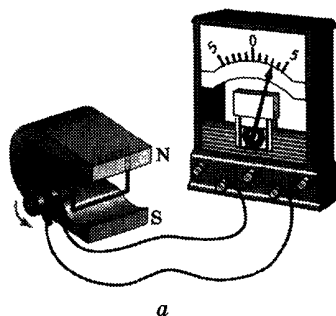
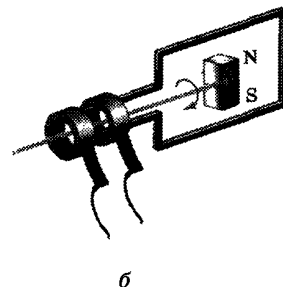


Рис. 3.53



Открытие электромагнитной индукции принадлежит к числу самых замечательных открытий XIX в. Оно вызвало появление и бурное развитие электротехники и радиотехники.

На основании явления электромагнитной индукции были созданы мощные генераторы электрической энергии, в разработке которых принимали участие ученые и техники разных стран. Среди них были и российские ученые: Эмилий Христианович Ленц, Борис Семенович Якоби, Михаил Иосифович Доливо-Добровольский и другие, внесшие большой вклад в развитие электротехники.

3.4.3. Правило Ленца

Правило Ленца (закон Ленца) было установлено Э. Х. Ленцем в 1834 г. Оно уточняет закон электромагнитной индукции, открытый в 1831 г. М. Фарадеем. Правило Ленца определяет направление индукционного тока в замкнутом контуре при его движении во внешнем магнитном поле.

Направление индукционного тока всегда таково, что испытываемые им со стороны магнитного поля силы противодействуют движению контура, а создаваемый этим током магнитный поток Φ_i стремится компенсировать изменения внешнего магнитного потока Φ_e .

Закон Ленца является выражением закона сохранения энергии для электромагнитных явлений. Действительно, при движении замкнутого контура в магнитном поле за счет внешних сил необходимо выполнить некоторую работу против сил, возникающих в результате взаимодействия индуцированного тока с магнитным полем и направленных в сторону, противоположную движению.

Правило Ленца иллюстрируют рис. 3.54, a и рис. 3.54, b . Если постоянный магнит вдвигать в катушку, замкнутую на гальванометр, индукционный ток в катушке будет иметь такое направление, которое создаст магнитное поле с вектором B' , направленным противоположно вектору индукции поля магнита B , т. е. будет выталкивать магнит из катушки или препятствовать его движению. При вытягивании магнита из катушки, наоборот, поле, создаваемое индукционным током, будет притягивать катушку, т. е. опять препятствовать его движению.

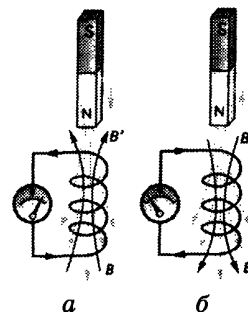


Рис. 3.54

Для применения правила Ленца с целью определения направления индукционного тока I_i в контуре необходимо следовать таким рекомендациям.

1. Установить направление линий магнитной индукции $\vec{B}$ внешнего магнитного поля.
2. Выяснить, увеличивается ли поток магнитной индукции этого поля через поверхность, ограниченную контуром ($\Delta\Phi > 0$), или уменьшается ($\Delta\Phi < 0$).
3. Установить направление линий магнитной индукции $\vec{B}'$ магнитного поля индукционного тока I_i . Эти линии должны быть направлены, согласно правилу Ленца, противоположно линиям $\vec{B}$, если $\Delta\Phi > 0$, и иметь одинаковое с ними направление, если $\Delta\Phi < 0$.
4. Зная направление линий магнитной индукции $\vec{B}'$, определить направление индукционного тока I_i , пользуясь *правилом буравчика*.

3.4.4. Закон электромагнитной индукции

М. Фарадеем было установлено, что *сила индукционного тока пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром*:

$$I_i \sim \Delta\Phi/\Delta t.$$

Возникновение тока в замкнутом контуре означает наличие сторонних сил, работа которых по перемещению единичного заряда в контуре называется электродвижущей силой (ЭДС). Это означает, что при изменении потока через поверхность, ограниченную замкнутым контуром, в контуре возникает ЭДС $\mathcal{E}_i$ которую называют ЭДС индукции. Согласно закону Ома для замкнутой цепи, $I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R}$. Следовательно, ЭДС индукции пропорциональна $\Delta\Phi/\Delta t$, поскольку сопротивление R не зависит от изменения магнитного потока.

Закон электромагнитной индукции формулируется так:

ЭДС индукции $\mathcal{E}_i$ в замкнутом контуре равна по модулю скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:

$$\mathcal{E}_i = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|.$$

Применение правила Ленца к замкнутому контуру с положительной нормалью приводит к выражению:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (3.18)$$

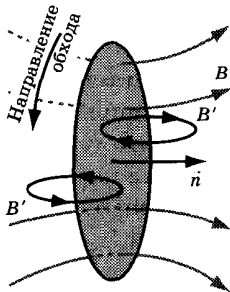


Рис. 3.55

Формула (3.18) выражает *основной закон электромагнитной индукции*. На рис. 3.55 внешнее магнитное поле индукции B возрастает со временем и направлено вдоль положительной нормали к контуру с током. Индуцированный ток противоположен выбранному направлению обхода в соответствии с индуцированным магнитным полем B' .

Описанные выше опыты свидетельствуют о том, что *электромагнитная индукция — это возникновение электрического поля и электрического тока при изменении во времени магнитного поля или при движении проводника в магнитном поле*. Эти два типа эффектов электромагнитной индукции отличаются физической природой процессов, отвечающих за их возникновение. Первый тип обусловлен наведением вихревого электрического поля переменным магнитным полем, второй — действием сил

Лоренца на движущиеся заряды в стационарном магнитном поле. В обоих случаях выполняется основной закон индукции, выраженный формулой (3.18).

Вихревое электрическое поле

В первом типе электромагнитной индукции ЭДС возникает в неподвижном замкнутом проводнике при любом изменении магнитного поля.

С другой стороны, известно, что возникновение электродвижущей силы в любой цепи связано со сторонними силами, действующими на заряды в этой цепи. Под сторонними силами имеются в виду силы *неэлектростатического* характера. Какова же природа этих сил в данном случае?

Результаты различных экспериментов по электромагнитной индукции показали, что ЭДС индукции не зависит ни от материала проводника (металл, электролит и т. д.), ни от его состояния (например, величины и распределения температуры). Отсюда следует вывод, что сторонние силы связаны с самим магнитным полем.

Анализ явления электромагнитной индукции привел Дж. Максвелла к заключению, что причиной появления ЭДС индукции является электрическое поле (рис. 3.56), отличающееся от электростатического поля следующими особенностями.

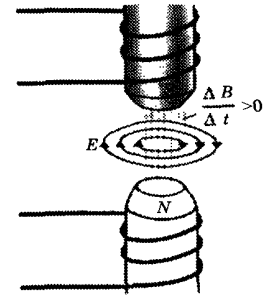


Рис. 3.56

1. Возникновение поля никак не связано с наличием проводников; оно существует в пространстве, окружающем переменное магнитное поле, независимо от наличия в нем проводников; проводники являются лишь индикаторами поля (если проводник замкнут, по нему течет ток).
2. Это поле не является электростатическим, поскольку силовые линии электростатического поля всегда разомкнуты, они начинаются и заканчиваются на зарядах, и напряжение по замкнутому контуру в электростатическом поле равно нулю; электростатическое поле не может поддерживать движение зарядов в замкнутом контуре, т. е. привести к возникновению ЭДС.
3. В противоположность последнему индуцированное переменным магнитным полем электрическое поле является *вихревым* (как и магнитное поле); оно имеет замкнутые силовые линии, приводит к возникновению ЭДС индукции, приводящей в движение заряды по замкнутым проводам (рис. 3.56).
4. В отличие от электростатического поля, *работа сил вихревого электрического поля и электрическое напряжение по замкнутому контуру не равны нулю*, а значение напряжения между двумя точками определяется не только их взаимным положением, но и формой контура, соединяющего эти точки.

Все вышеизложенное позволяет сделать вывод, который выражает первое основное положение теории Максвелла: любое изменение магнитного поля вызывает появление вихревого электрического поля.

Направление силовых линий напряженности $\vec{E}$ совпадает с направлением индукционного тока. Работа вихревого электрического поля при перемещении единичного положительного заряда вдоль замкнутого неподвижного проводника численно равна ЭДС индукции в этом проводнике. Чем быстрее меняется индукция магнитного поля, тем больше напряженность индуцированного электрического поля.

Вихревые токи (токи Фуко). В массивном проводнике, находящемся в переменном магнитном поле, вихревое электрическое поле вызывает индукционный ток. Поскольку линии напряженности $\vec{E}$ замкнуты, то и линии тока внутри этого массивного проводника замкнуты, поэтому они называются *вихревыми токами*, или *токами Фуко*. В 1855 г. Ж. Б. Л. Фуко обнаружил нагревание ферромагнитных сердечников, а также других металлических тел в переменном магнитном поле. Он объяснил этот эффект возбуждением индукционных токов. Фуко предложил способ уменьшения потерь энергии за счет нагрева — изготавливать сердечники и другие магнитопроводы в виде пластин, разделенных тонкими изолирующими пленками, и ориентировать поверхности этих пластин перпендикулярно вектору напряженности вихревого электрического поля (т. е. чтобы они пересекали возможные линии вихревых токов).

Нагрев вихревыми токами массивных проводников используется в индукционных печах для плавки металлов и изготовления сплавов.

ЭДС индукции в движущихся проводниках

ЭДС индукции в проводниках, движущихся в постоянном магнитном поле, соответствует второму типу электромагнитной индукции, обусловленному не переменным внешним магнитным полем, а действием сил Лоренца на свободные заряды проводника.

ЭДС индукции, возникающая на концах проводника длиной l , движущегося с постоянной скоростью $\vec{v}$ под некоторым углом α к вектору индукции $\vec{B}$ однородного магнитного поля, равна:

$$\mathcal{E}_i = \frac{A}{|q|} = \frac{F_L l}{|q|} = \frac{|q| v B l \sin \alpha}{|q|} = v B l \sin \alpha,$$

где A — работа силы Лоренца по перемещению заряда q на пути l , F_L — сила Лоренца, действующая на движущийся заряд.

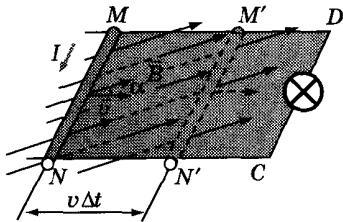


Рис. 3.57

Если такой проводник входит в состав замкнутой цепи, остальные части которой неподвижны (рис. 3.57), то в цепи возникает электрический ток. Сила тока равна:

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R + r} = \frac{v B l \sin \alpha}{R + r},$$

где R — сопротивление нагрузки (лампочки); r — сопротивление проводника, играющего роль внутреннего сопротивления источника тока (сопротивлением соединяющих проводников пренебрегаем).

С другой стороны, ту же ЭДС индукции можно получить, используя основной закон электромагнитной индукции:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{B S \sin \alpha}{\Delta t}.$$

В данном случае изменение потока осуществляется не за счет изменения индукции поля, а за счет изменения площади контура, равного $\Delta S = -lv\Delta t$. В результате получим:

$$\mathcal{E}_i = v B l \sin \alpha.$$

3.4.5. Самоиндукция. Индуктивность

Индуктивность, или коэффициент самоиндукции (от лат. *inductio* — наведение, возбуждение) — это параметр электрической цепи, который определяет ЭДС самоиндукции, наводимой в цепи при изменении протекающего по ней тока или (и) ее деформации.

Термином «индуктивность» обозначают также катушку самоиндукции, которая определяет индуктивные свойства цепи.

Самоиндукция — возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нем силы тока.

Самоиндукция была открыта в 1832 г. американским ученым Дж. Генри. Независимо от него в 1835 г. это явление открыл М. Фарадей.

ЭДС индукции возникает при изменении магнитного потока. Если это изменение вызывается собственным током, то говорят об ЭДС самоиндукции:

$$\mathcal{E}_{is} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

где L — индуктивность контура, или его коэффициент самоиндукции.

Индуктивность — это физическая величина, численно равная ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при изменении силы тока на 1 А за 1 с.

Индуктивность, как и емкость, зависит от геометрии проводника — его размеров и формы, но не зависит от силы тока в проводнике. Так, индуктивность прямого провода гораздо меньше индуктивности того же провода, свернутого в спираль.

Расчеты показывают, что индуктивность описанного выше соленоида (см. 3.3.2) в воздухе определяется по формуле:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l},$$

где μ_0 — магнитная постоянная, N — число витков соленоида, l — длина соленоида, S — площадь поперечного сечения.

Кроме того, индуктивность зависит от магнитных свойств среды, в которой находится проводник, а именно от его магнитной проницаемости, которая определяется по формуле:

$$\frac{L}{L_0} = \mu,$$

где L_0 — индуктивность контура в вакууме, L — индуктивность контура в однородном веществе, заполняющем магнитное поле.

Единицей индуктивности в СИ является *генри* (Гн): $1 \text{ Гн} = 1 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{А}$.

Токи замыкания и размыкания

При любом включении и выключении тока в цепи наблюдаются так называемые *экстратоки самоиндукции* (*экстратоки замыкания и размыкания*), возникающие в цепи вследствие явления самоиндукции и препятствующие, согласно правилу Ленца, нарастанию либо убыванию тока в цепи.

На рис. 3.58 показана схема соединения двух одинаковых ламп. Одна из них подключена к источнику через резистор R , а другая — последовательно соединена с катушкой L с железным сердечником. При замыкании цепи первая лампа вспыхивает практически мгновенно, а вторая — с заметным опозданием. Это вызвано тем, что ЭДС самоиндукции в цепи этой лампы велика, и сила тока не сразу достигает своего максимального значения (рис. 3.59).

При размыкании ключа (рис. 3.60) в катушке L возникает ЭДС самоиндукции, поддерживающая первоначальный ток. В результате в момент размыкания через гальванометр течет ток (светлая стрелка), направленный против начального тока до размыкания (черная стрелка). При этом ЭДС самоиндукции может быть гораздо больше ЭДС батареи элементов, что будет проявляться в том, что экстраток размыкания будет существенно превышать стационарный ток при замкнутом ключе.

Индуктивность характеризует инерционность цепи по отношению к изменению в ней тока, и ее можно рассматривать как электродинамический аналог массы тела в механике, являющейся мерой инертности тела. При этом ток I играет роль скорости тела.

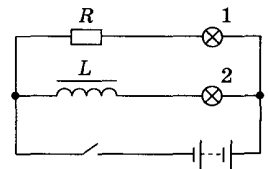


Рис. 3.58

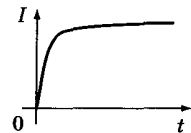


Рис. 3.59

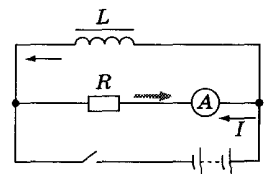


Рис. 3.60

3.4.6. Энергия магнитного поля

По аналогии с кинетической энергией тела для цепей постоянного тока *энергия магнитного поля* W_m записывается в форме, аналогичной выражению для кинетической энергии $\frac{mv^2}{2}$:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}.$$

При этом индуктивность включает часть, связанную с энергией магнитного поля, сосредоточенную в проводниках, внутреннюю индуктивность L_i и внешнюю L_e , связанную с внешним магнитным полем: $L = L_i + L_e$.

Примеры заданий ЕГЭ по теме 3.4. «Электромагнитная индукция»

Часть 1

При выполнении заданий уровня А нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

А1 1 2 3 4

А1. Явление электромагнитной индукции заключается (выберите правильное определение)

- 1) в изменении магнитного потока в контуре при движении последнего в магнитном поле
- 2) в повороте магнитной стрелки вдоль линий магнитной индукции
- 3) в возникновении электрического тока в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур
- 4) в протекании тока в электрической цепи при подключении источника тока

А2 1 2 3 4

А2. В какой-то момент переменное внешнее магнитное поле приводит к **увеличению** магнитного потока в замкнутом контуре, находящемся в этом поле. Это изменение магнитного потока индуцирует электрический ток, который, согласно правилу Ленца:

- 1) индуцирует магнитное поле, противоположное внешнему
- 2) индуцирует магнитное поле, параллельное внешнему
- 3) индуцирует магнитное поле, перпендикулярное внешнему
- 4) не индуцирует магнитное поле.

А3 1 2 3 4

А3. В какой-то момент переменное внешнее магнитное поле приводит к **уменьшению** магнитного потока в замкнутом контуре, находящемся в этом поле. Это изменение магнитного потока индуцирует электрический ток, который, согласно правилу Ленца:

- 1) индуцирует магнитное поле, противоположное внешнему
- 2) индуцирует магнитное поле, параллельное внешнему
- 3) индуцирует магнитное поле, перпендикулярное внешнему
- 4) не индуцирует магнитное поле

А4 1 2 3 4

А4. Основной закон электромагнитной индукции выражается формулой

- 1) $E_i = \frac{-\Delta\Phi}{\Delta t}$
- 2) $B = \frac{F}{I\Delta l}$
- 3) $F = qBs\sin\alpha$
- 4) $\Phi = B_n S$

А5 1 2 3 4

А5. Магнитный поток через контур проводника с сопротивлением 0,05 Ом за 2 с равномерно изменился на 0,02 Вб. Сила тока в проводнике вследствие этого составила

- 1) 0,1 А
- 2) 0,2 А
- 3) 0,5 А
- 4) 0,05 А

А6 1 2 3 4

А6. При изменении силы тока в катушке от 0 до 5 А в течение 2 с в ней возникла ЭДС, равная 1 В. Следовательно, индуктивность катушки составляет

- 1) 0,2 Гн
- 2) 0,1 Гн
- 3) 0,4 Гн
- 4) 0,5 Гн

Часть 2

Ответом к заданиям В1—В2 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

- В1.** Определите энергию магнитного поля соленоида, число витков которого равно 500, площадь поперечного сечения 10 см^2 , а длина 0,2 м (соленоид расположен в вакууме) при токе 0,2 А. Ответ дайте в мВт.
- В2.** Найдите ЭДС индукции в проводнике длиной 1 м, перемещающемся в однородном магнитном поле с $B = 6 \text{ Тл}$ со скоростью 3 м/с под углом 45° к вектору магнитной индукции.

В заданиях В3—В4 на установление соответствия требуется указать последовательность цифр, соответствующих правильному ответу.

- В3.** Изменяющееся во времени магнитное поле вызывает появление вихревого электрического поля (А), отличающегося от электростатического поля (Б). Расставьте правильно номера перечисленных ниже свойств этих двух полей таблицы.

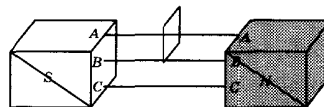
- 1) силовые линии поля начинаются и заканчиваются на неподвижных зарядах
- 2) поле связано исключительно с наличием проводников
- 3) силовые линии поля замкнуты
- 4) линии поля нигде не пересекаются и они не замкнуты
- 5) работа сил поля по замкнутому контуру равна нулю
- 6) работа сил поля по замкнутому контуру отличается от нуля
- 7) напряжение между двумя точками поля определяется только их взаимным расположением
- 8) напряжение между двумя точками поля связано с формой контура, соединяющего эти точки
- 9) поле не может быть источником ЭДС
- 10) поле является источником ЭДС

Впишите во вторую строку таблицы номера правильных ответов.

А	Б

- В4.** Небольшая проволочная прямоугольная рамка свободно падает в пространстве между широкими полюсами достаточно сильного электромагнита (см. рисунок). Направление индукционных токов, возникающих в рамке, когда ее середина пересекает линии А, В и С таковы

- 1) ток направлен по часовой стрелке
- 2) ток направлен против часовой стрелки
- 3) ток равен нулю



Впишите во вторую строку таблицы номера правильных ответов.

А	В	С

В1

В2

В3

В4

3.5. Электромагнитные колебания и волны

Колебания — это движения или состояния, повторяющиеся во времени.

В физике существуют колебания двух типов — механические и электромагнитные, а также их комбинации. Связано это с тем, что гравитационные и электромагнитные взаимодействия играют исключительную роль в жизнедеятельности человека. Дело в том, что звук и свет, которые являются колебаниями плотности и давления воздуха (звук) и очень быстрыми колебаниями электрических и магнитных полей (свет), несут для нас большую часть информации об окружающем мире.

Механические и электромагнитные колебания подчиняются одинаковым количественным законам. Это можно обнаружить, если отвлечься от природы колеблющегося объекта (груз на пружине или электрический ток в цепи) и сосредоточиться на вопросе о том, как происходят колебания. Поэтому в современной физике существует специальный раздел — *физика колебаний*. В нем колебания различной природы рассматриваются с единой точки зрения. Физика колебаний занимается исследованием вибраций машин и механизмов, ее выводы лежат в основе электротехники переменных токов и радиотехники.

3.5.1. Свободные электромагнитные колебания в колебательном контуре

Колебательный контур — это электрическая цепь, содержащая индуктивность L , емкость C и сопротивление R , в которой могут возбуждаться электрические колебания.

Колебательный контур — один из основных элементов радиотехнических систем. Различают *линейные* и *нелинейные* колебательные контуры. Параметры R , L и C линейного колебательного контура не зависят от интенсивности колебаний, а период колебаний не зависит от амплитуды.

При отсутствии потерь ($R = 0$) в линейном колебательном контуре происходят свободные гармонические колебания.

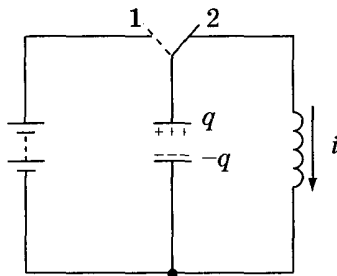


Рис. 3.61

Для возбуждения колебаний в контуре конденсатор предварительно заряжают от батареи аккумуляторов, сообщив ему энергию W_p , и переводят переключатель в положение 2 (рис. 3.61). После замыкания цепи конденсатор начнет разряжаться через катушку индуктивности, теряя энергию. В цепи появится ток, вызывающий переменное магнитное поле. Переменное магнитное поле, в свою очередь приводит к созданию вихревого электрического поля, препятствующего току, в результате чего изменение тока происходит постепенно. По мере увеличения тока через катушку возрастает энергия магнитного поля W_m . Полная энергия W электромагнитного поля контура остается постоянной (при отсутствии сопротивления) и равной сумме энергий магнитного и электрического полей. Пол-

ная энергия, в силу закона сохранения энергии, равна максимальной энергии электрического или магнитного поля:

$$W = \frac{LI^2}{2} + \frac{q^2}{2C} = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2}, \quad (3.19)$$

где L — индуктивность катушки, I и I_m — сила тока и ее максимальное значение, q и q_m — заряд конденсатора и его максимальное значение, C — емкость конденсатора.

Процесс перекачки энергии в колебательном контуре между электрическим полем конденсатора при его разрядке и магнитным полем, сосредоточенным в катушке, полностью аналогичен процессу превращения потенциальной энергии растянутой пружины или поднятого груза математического маятника в кинетическую энергию при механических колебаниях последних. Рис. 3.62 иллюстрирует сказанное.

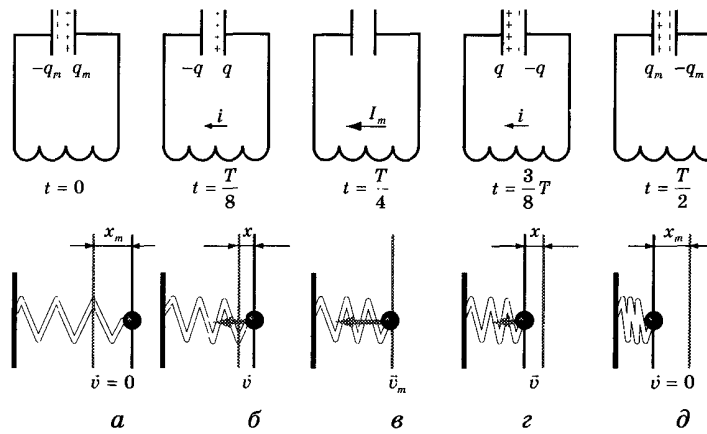


Рис. 3.62

В табл. 3.1 приводится соответствие между механическими и электрическими величинами при колебательных процессах.

Таблица 3.1

Соответствие между механическими и электрическими величинами при колебательных процессах

Механические величины	Электрические величины
Координата x	Заряд q
Скорость v	Сила тока i
Масса m	Индуктивность L
Жесткость пружины k	Величина, обратная емкости $1/C$
Потенциальная энергия $kx^2/2$	Энергия электрического поля $q^2/(2C)$
Кинетическая энергия $mv^2/2$	Энергия магнитного поля $Li^2/2$

Дифференциальное уравнение, описывающее процессы в колебательном контуре, можно получить, приравняв производную по полной энергии контура (3.19) к нулю (поскольку полная энергия постоянна) и заменив в полученном уравнении ток на производную заряда по времени. В окончательном виде уравнение выглядит так:

$$q'' = -\frac{1}{LC} q. \quad (3.20)$$

Как видно, уравнение (3.20) ничем не отличается по форме от соответствующего дифференциального уравнения (1.54) для свободных механических колебаний шарика на пружине. Заменив механические параметры системы на электрические с помощью приведенной выше таблицы, мы в точности получим уравнение (3.20).

По аналогии с решением дифференциального уравнения для механической колебательной системы *циклическая частота свободных электрических колебаний* равна:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (3.21)$$

Период свободных колебаний в контуре равен:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (3.22)$$

Формула (3.22) называется *формулой Томсона* в честь английского физика У. Томсона (Кельвина), который ее вывел.

Увеличение периода свободных колебаний с возрастанием L и C объясняется тем, что при увеличении индуктивности ток медленнее нарастает и медленнее падает до нуля, а чем больше емкость, тем больше времени требуется для перезарядки конденсатора.

Гармонические колебания заряда и тока описываются теми же уравнениями, что и их механические аналоги:

$$q = q_m \cos \omega_0 t,$$

$$i = q' = -\omega_0 q_m \sin \omega_0 t = I_m \cos(\omega_0 t + \pi/2),$$

где q_m — амплитуда колебаний заряда, $I_m = \omega_0 q_m$ — амплитуда колебаний силы тока. Колебания силы тока опережают по фазе на $\pi/2$ колебания заряда.

3.5.2. Вынужденные электромагнитные колебания

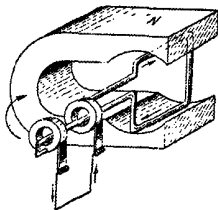


Рис. 3.63

Как и в случае механических колебаний, вынужденные электромагнитные колебания проявляются при наличии внешней периодически изменяющейся силы. Такие колебания проявляются, например, при наличии в цепи периодической электродвижущей силы. Переменная ЭДС индукции возникает в проводочной рамке из нескольких витков, вращающейся в поле постоянного магнита, рис. 3.63. При этом магнитный поток, пронизывающий рамку, периодически меняется. В соответствии с законом электромагнитной индукции периодически меняется и возникающая ЭДС индукции. Если рамку замкнуть на гальванометр, его стрелка начнет колебаться около положения равновесия, показывая, что в цепи идет переменный ток.

Отличительной особенностью вынужденных колебаний является зависимость их амплитуды от частоты изменения внешней силы.

Переменный ток

Переменный ток — это электрический ток, изменяющийся во времени.

К переменному току относят различные виды импульсных, пульсирующих, периодических и квазипериодических токов. В технике под переменным током обычно подразумеваются периодические или почти периодические токи переменного направления.

Принцип действия генератора переменного тока

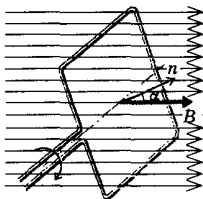


Рис. 3.64

Наиболее часто используют периодический ток, сила которого меняется во времени по гармоническому закону (гармонический, или синусоидальный переменный ток). Это ток, применяемый на заводах и фабриках и в осветительной сети квартир. Он представляет собой *вынужденные электромагнитные колебания*. Частота промышленного переменного тока составляет 50 Гц. Переменное напряжение в гнездах розеток осветительной сети создается генераторами на электростанциях. Простейшей моделью такого генератора является проводочная рамка, вращающаяся в однородном магнитном поле (рис. 3.64). Поток магнитной индукции Φ , пронизывающий проводочную рамку площадью S , пропорционален косинусу угла α между нормалью к рамке и вектором магнитной индукции:

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$

При равномерном вращении рамки угол α увеличивается пропорционально времени t : $\alpha = 2\pi n t$, где n — частота вращения. Поэтому поток магнитной индукции меняется гармонически с циклической частотой колебаний $\omega = 2\pi n$:

$$\Phi = BS \cos \omega t.$$

Согласно закону электромагнитной индукции, ЭДС индукции в рамке равна:

$$e = -\Phi' = -BS(\cos \omega t)' = \mathcal{E}_m \sin \omega t,$$

где $\mathcal{E}_m = BS\omega$ — амплитуда ЭДС индукции.

Таким образом, напряжение в сети переменного тока изменяется по синусоидальному (или косинусоидальному) закону:

$$u = U_m \sin \omega t \text{ (или } u = U_m \cos \omega t),$$

где u — мгновенное значение напряжения, U_m — амплитуда напряжения.

Сила тока в цепи будет изменяться с той же частотой, что и напряжение, но между ними возможен сдвиг фаз φ_c . Поэтому в общем случае мгновенное значение силы тока i определяется по формуле:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_c),$$

где I_m — амплитуда силы тока.

Сила тока в цепи переменного тока с резистором. Если электрическая цепь состоит из активного сопротивления R и проводов с пренебрежимо малой индуктивностью (рис. 3.65), а напряжение на зажимах меняется по гармоническому закону $u = U_m \cos \omega t$, то сила тока в нем, как и в случае постоянного тока, определяется по закону Ома:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \cos \omega t}{R} = I_m \cos \omega t.$$

В проводнике с активным сопротивлением колебания силы тока по фазе совпадают с колебаниями напряжения (рис. 3.66), а амплитуда силы тока определяется равенством:

$$I_m = \frac{U_m}{R}.$$

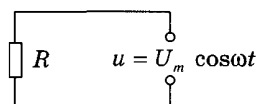


Рис. 3.65

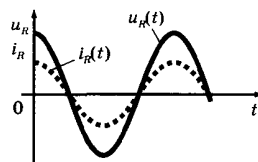


Рис. 3.66

Эффективные (действующие) значения напряжения и силы тока

В цепи переменного тока его направление и амплитуда меняются с частотой 50 Гц. Однако выделяемая на нагрузке энергия зависит не от направления тока в цепи, а лишь от его абсолютного значения. Всегда можно подобрать такое значение силы постоянного тока, чтобы энергия, выделяемая за некоторое время этим током на участке цепи с сопротивлением R , равнялась энергии, выделяемой за то же время переменным током.

Действующее значение силы переменного тока равно силе постоянного тока, выделяющего в проводнике то же количество теплоты, что и переменный ток за то же время. Оно определяется по формуле:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,71 I_m.$$

Действующее значение напряжения определяется аналогично:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,71U_m.$$

Мощность, определяемая с использованием действующих значений силы тока и напряжения $P = IU$, равна средней мощности переменного тока при совпадении фаз колебаний тока и напряжения:

$$\overline{P} = \frac{I_m U_m}{2}.$$

Последнюю определяют усреднением мгновенной мощности за период колебаний:

$$\overline{P} = \overline{i u} = I_m U_m \overline{\cos^2(\omega t)}.$$

Емкостное сопротивление

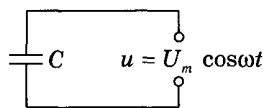


Рис. 3.67

Емкостное сопротивление в цепи переменного тока — это та часть сопротивления, которая создается конденсатором, включенным в цепь переменного тока (при пренебрежимо малой емкости подводящих проводов).

Для получения формулы емкостного сопротивления определим, как меняется сила тока в цепи, содержащей только конденсатор (рис. 3.67). Напряжение на обкладках конденсатора $u = \phi_1 - \phi_2 = q/C$ равно напряжению на входе цепи, поэтому

$$q = C U_m \cos \omega t. \quad (3.23)$$

Для силы тока, которая определяется как производная заряда q по времени, из (3.23) получим:

$$i = C \omega U_m \cos(\omega t + \pi/2). \quad (3.24)$$

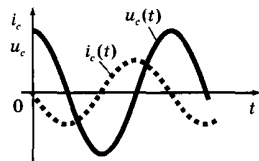


Рис. 3.68

Между напряжением и силой тока в цепи с конденсатором наблюдается сдвиг фаз на $\pi/2$ (см. (3.21)), причем ток опережает напряжение. Когда конденсатор разряжается (напряжение на нем равно нулю), ток максимален (рис. 3.68).

Амплитуда силы тока равна

$$I_m = U_m C \omega. \quad (3.25)$$

Величина

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (3.26)$$

называется *емкостным сопротивлением*. Если вместо амплитуд силы тока и напряжения в (3.25) использовать их действующие значения, то, учитывая (3.26), получим:

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

Это означает, что действующие значения силы тока и напряжения на конденсаторе связаны так же, как и сила постоянного тока и напряжение согласно закону Ома, причем роль активного сопротивления R играет емкостное сопротивление X_c .

Чем больше емкость конденсатора и частота напряжения, тем меньше емкостное сопротивление и тем больше ток перезарядки.

Благодаря сдвигу фаз между током и напряжением в среднем за период не происходит ни накопления энергии на конденсаторе, ни ее *диссипации* (рассеяния). За четверть периода, когда конденсатор заряжается до максимального значения, на нем происходит накопление энергии электрического поля; в следующую четверть периода, при разрядке конденсатора, эта энергия возвращается в сеть.

Индуктивное сопротивление

Индуктивное сопротивление в цепи переменного тока — это реактивная часть сопротивления, определяемая индуктивностью элементов цепи.

Считается, что элементы цепи, для которых средняя мощность переменного тока равна нулю, обладают реактивным сопротивлением (в отличие от обычного активного сопротивления R , на котором происходит выделение энергии).

Катушка индуктивности (соленоид) при отсутствии сопротивления R ее провода обладает только индуктивным сопротивлением.

Для определения формулы индуктивного сопротивления найдем ЭДС самоиндукции такой катушки в цепи переменного тока, меняющегося по гармоническому синусоидальному закону $I = I_m \sin \omega t$ (рис. 3.69). ЭДС самоиндукции катушки e_i равна по величине и противоположна по направлению напряжению u на ее концах, взятому с обратным знаком:

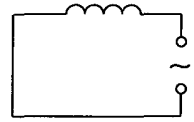


Рис. 3.69

$$e_i = -Li' = -L \omega I_m \cos \omega t.$$

Учитывая, что $u = -e_i$, из данного равенства получим:

$$u = U_m \sin(\omega t + \pi/2),$$

где $U_m = L \omega I_m$ — амплитуда напряжения.

Следовательно, колебания напряжения на катушке опережают колебания силы тока на $\pi/2$ (рис. 3.70). Вследствие этого в среднем за период не происходит ни накопления, ни диссипации энергии в катушке. Дважды за период энергия накачивается внутрь катушки (это энергия магнитного поля) и дважды возвращается обратно источнику. Амплитуда силы тока равна:

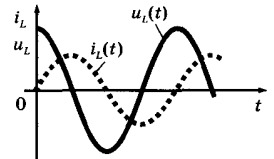


Рис. 3.70

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}.$$

Величина $\omega L = X_L$ и есть *индуктивное сопротивление*. Как и в случае с емкостным сопротивлением, индуктивное сопротивление X_L , действующее значение силы тока и действующее значение напряжения связаны соотношением, подобным закону Ома для цепи постоянного тока:

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

Индуктивное сопротивление зависит от частоты. Чем больше частота, тем больше индуктивное сопротивление, тем меньше ток.

Резонанс в электрической цепи

Явление резонанса заключается в том, что амплитуда установившихся вынужденных колебаний достигает наибольшего значения, когда частота вынуждающей силы равна собственной частоте колебательной системы.

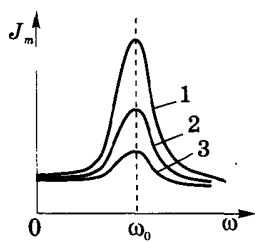


Рис. 3.71

Если активное сопротивление R в колебательном контуре мало, то, по аналогии с механической колебательной системой с малым коэффициентом трения μ , в нем возможен вполне отчетливый резонанс (рис. 3.71). Сила тока при вынужденных колебаниях в контуре достигнет максимального значения, когда частота вынуждающих колебаний ω (частота приложенного к контуру переменного напряжения) сравняется с собственной частотой электрического колебательного контура ω_0 :

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Амплитуда установившихся колебаний силы тока при резонансе равна:

$$I_m = \frac{U_m}{R}.$$

При $R \rightarrow 0$ резонансное значение силы тока неограниченно возрастает: $(I_m)_{\text{рез}} \rightarrow \infty$. Наоборот, при больших R говорить о резонансе не имеет смысла. Зависимости амплитуды силы тока от частоты (резонансные кривые) представлены на рис. 3.71. Они подобны резонансным кривым колебаний пружинного маятника (рис. 1.63), где $X_m = I_m$, а номерам кривых 1, 2, 3 соответствуют сопротивления контура $R_1 < R_2 < R_3$.

Амплитуда напряжения при резонансе растет одновременно с ростом силы тока. Напряжения на конденсаторе и катушке индуктивности становятся одинаковыми и во много раз превосходят внешнее напряжение. Так как

$$U_{C,m} = U_{L,m} = I_m \sqrt{\frac{L}{C}},$$

а внешнее напряжение связано с резонансным током соотношением $U_m = I_m R$, то при $R \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$ получим:

$$U_{Cm} = U_{Lm} \gg U_m.$$

Автоколебания

Незатухающие электромагнитные колебания в цепи поддерживаются действием внешнего периодического напряжения. Однако возможен способ получения незатухающих колебаний, при котором сама колебательная система регулирует поступление энергии в колебательный контур для компенсации потерь энергии на резисторе.

Системы, в которых генерируются незатухающие колебания за счет поступления от источника внутри системы, называются автоколебательными. Колебания, существующие в системе без воздействия на нее внешних периодических сил, называются автоколебаниями.

Примером автоколебательной системы является генератор на транзисторе (см. *Генератор на транзисторе*). К механическим автоколебательным системам относятся обычные часы с маятником или балансиrom (колесиком с пружиной, совершающей крутильные колебания). Источником энергии в часах служит потенциальная энергия поднятой гири или сжатой пружины.

Основные элементы автоколебательных систем (рис. 3.72):

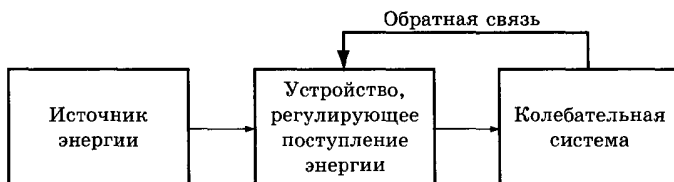


Рис. 3.72

1. Источник энергии, за счет которого поддерживаются незатухающие колебания.
2. Колебательная система, т. е. та часть автоколебательной системы, в которой непосредственно происходят колебания.
3. Устройство, регулирующее поступление энергии от источника в колебательную систему, — клапан.
4. Обратная связь, с помощью которой колебательная система управляет клапаном.

Генератор на транзисторе

Частота 50 Гц электрического тока, вырабатываемого генераторами электростанций, определяется числом оборотов вокруг своей оси ротора генератора. Однако механическое вращение с частотой 1–1000 МГц, необходимой для радио- и телекоммуникации, невозможно. Поэтому электрические колебания высокой частоты получают с помощью генератора на транзисторе. Основными элементами генератора на транзисторе являются транзистор, колебательный контур, источник постоянного тока, включенный в цепь «эмиттер — коллектор», катушка индуктивности $L_{св}$ в цепи «база — эмиттер», индуктивно связанная с катушкой индуктивности L контура (рис. 3.73).

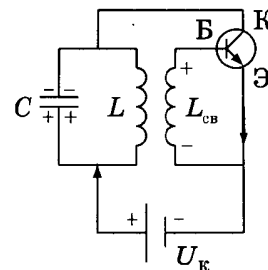


Рис. 3.73

Генератор должен вырабатывать незатухающие колебания. Собственные электромагнитные колебания в контуре являются затухающими, т. к. энергия колебаний теряется на активном сопротивлении провода, из которого изготовлена катушка индуктивности. Если эти потери энергии компенсируются поступлением энергии в контур от источника внутри системы, возможна генерация незатухающих колебаний, или *автоколебаний*. В схеме генератора на транзисторе, приведенной на рис. 3.73, поступление энергии в контур (подзарядка конденсатора) происходит в тот момент, когда на его нижней пластине скапливается максимальный положительный заряд. Для этого через эмиттер должен протекать ток к контуру. Ток через эмиттер протекает лишь в том случае, когда между базой и эмиттером приложено напряжение в прямом направлении: плюс — к базе, минус — к эмиттеру. Такая полярность напряжения $U_{бэ}$ возможна при согласованной индуктивной связи катушки индуктивности L контура с катушкой индуктивности $L_{св}$ в цепи «база — эмиттер». Подобная связь называется *обратной*. Обратная связь позволяет корректировать сигнал на выходе системы изменением сигнала на входе. Через полупериод колебаний, когда конденсатор перезаряжается, заряд на нижней пластине становится отрицательным. Это приводит к изменению знака напряжения между базой и эмиттером. Обратное напряжение между базой и эмиттером прерывает ток через транзистор — поступление энергии в контур прекращается. В этом смысле транзистор подобен ключу, присоединяющему источник тока к колебательному контуру в требуемый момент времени для зарядки конденсатора. При изменении полярности зарядов на конденсаторе ключ размыкается.

Производство, передача и потребление электрической энергии

Производство электроэнергии. Электроэнергия производится на электрических станциях в основном с помощью электромеханических индукционных генераторов. Два основных типа электростанций — тепловые (ТЭС) и гидроэлектрические (ГЭС) — различаются характером двигателей, вращающих роторы генераторов.

На ТЭС источником энергии служит топливо: нефть, мазут, горючие сланцы, угольная пыль. Роторы электрогенераторов приводятся во вращение паровыми и газовыми турбинами или двигателями внутреннего сгорания (ДВС).

Как известно, КПД тепловых двигателей увеличивается с ростом начальной температуры рабочего тела. Поэтому поступающий в турбину пар доводят до порядка 550 °С при давлении около 25 МПа. КПД ТЭС достигает 40 %. Превращения энергии показаны на рис. 3.74.

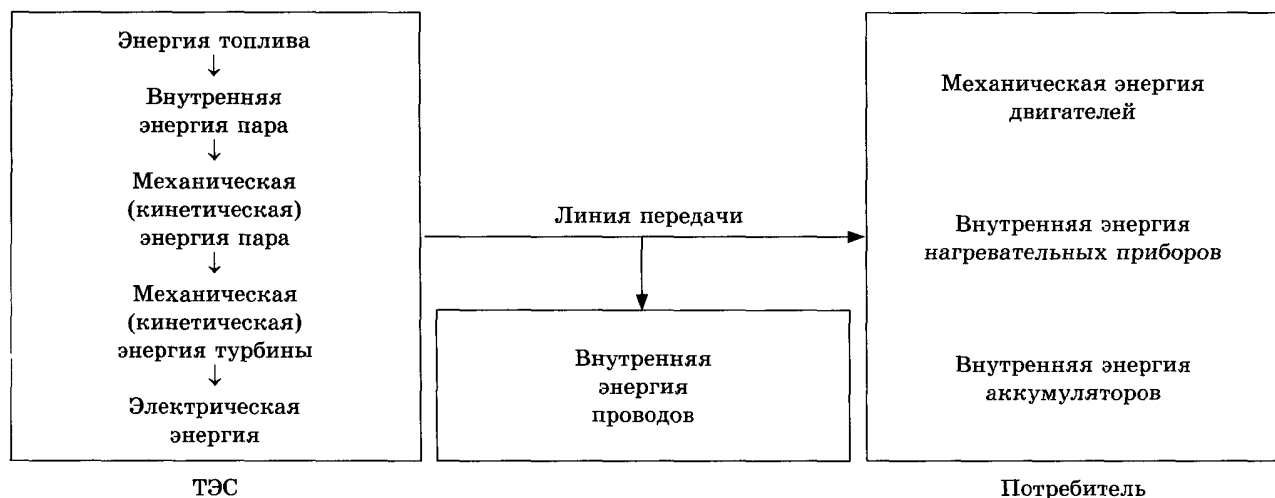


Рис. 3.74

На тепловых электростанциях (ТЭЦ) значительная часть энергии отработанного пара используется на промышленных предприятиях и для бытовых нужд. КПД ТЭЦ достигает 60–70 %.

На ГЭС для вращения роторов генераторов используется потенциальная энергия воды. Роторы приводятся во вращение гидравлическими турбинами. Превращения энергии показаны на рис. 3.75. Мощность станции зависит от разности уровней воды, создаваемых плотиной (напора), и от массы воды, проходящей через турбину за секунду (расхода воды).

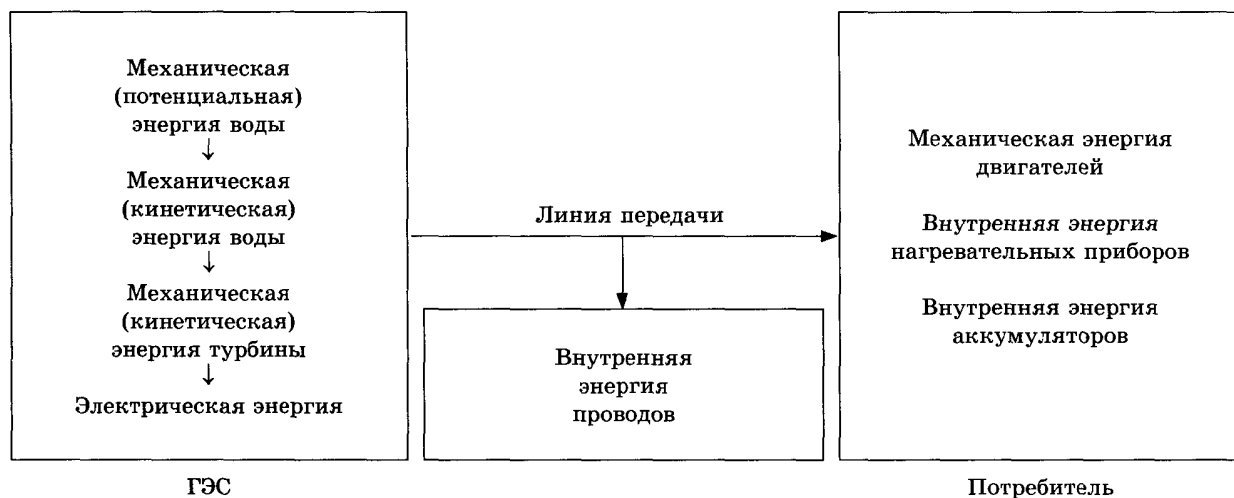


Рис. 3.75

Часть электроэнергии, потребляемой в нашей стране (около 10 %), производится на *атомных электростанциях* (АЭС).

Передача электроэнергии. Как правило, этот процесс сопровождается заметными потерями, связанными с нагревом проводов линий электропередачи током. Согласно закону Джоуля–Ленца энергия, расходуемая на нагрев проводов, пропорциональна квадрату силы тока и сопротивлению линии, так что при большой длине линии передача электроэнергии может стать экономически невыгодной. Поэтому необходимо уменьшать силу тока, что при данной передаваемой мощности приводит к необходимости увеличения напряжения. Чем длиннее линия электропередачи,

тем выгоднее использовать большие напряжения (на некоторых из них напряжение доходит до 500 кВ). Генераторы переменного тока, между тем, выдают напряжения, не превышающие 20 кВ (что связано со свойствами используемых изоляционных материалов).

Поэтому на электростанциях ставят повышающие трансформаторы, увеличивающие напряжение и во столько же раз уменьшающие силу тока. Для подачи потребителю электроэнергии нужного (низкого) напряжения на концах линии электропередачи ставят понижающие трансформаторы. Понижение напряжения обычно осуществляется поэтапно (рис. 3.76).

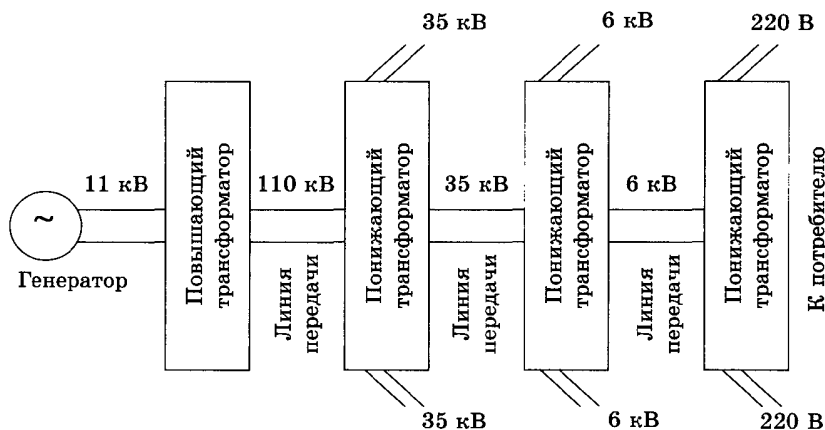


Рис. 3.76

Использование электроэнергии. Основными потребителями электроэнергии являются:

- 1) промышленность — 70%;
- 2) транспорт (электрическая тяга);
- 3) бытовые потребители (освещение жилищ, электроприборы).

Большая часть используемой электроэнергии превращается в механическую энергию. Почти все механизмы в промышленности приводятся в движение электродвигателями.

Около трети электроэнергии, потребляемой промышленностью, используется для технологических целей (электросварка, электрический нагрев и плавление металлов, электролиз и т. д.).

Трансформатор

Трансформатор (от лат. *transformare* — превращать, преобразовывать) — устройство для преобразования напряжения переменного тока, состоящее из двух катушек (обмоток) на общем ферромагнитном сердечнике.

Отношение количества витков в обмотках называется *коэффициентом трансформации*:

$$k = \frac{n_1}{n_2}.$$

Сердечник концентрирует магнитное поле так, что все витки первичной и вторичной обмоток пронизываются практически одинаковым переменным магнитным потоком, соответственно, в каждом витке наводится одинаковая ЭДС индукции:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{n_1}{n_2} = k.$$

Если $k > 1$ — трансформатор *понижающий*, при $k < 1$ — трансформатор *повышающий*.

Трансформаторы используются для повышения напряжения при передаче электроэнергии по линиям электропередач и для понижения напряжения при распределении электроэнергии потребителям.

3.5.3. Электромагнитное поле

Электромагнитное поле — это та часть пространства, которая содержит в себе или окружает тела, находящиеся в электрическом или магнитном состоянии.

Таково определение электромагнитного поля, впервые данное Дж. К. Максвеллом.

В настоящее время электромагнитное поле определяется как особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие электрически заряженных тел.

Термин «электромагнитное поле» ввел М. Фарадей, причем для него это был реальный физический объект, распределенный в пространстве. Описание электромагнитных явлений с помощью представления об электромагнитном поле было альтернативой теории дальнего действия. Впоследствии Дж. Максвелл облек идеи М. Фарадея в математическую форму. Он определил электромагнитное поле как совокупность взаимосвязанных векторных полей и установил законы, которым они подчиняются. В своей теории Максвелл показал, что:

- 1) электрическое поле может быть создано неподвижными зарядами;
- 2) электрическое поле может быть создано переменным магнитным полем, и в этом случае его силовые линии являются замкнутыми; они охватывают изменяющийся магнитный поток (переменное электрическое поле называется вихревым);
- 3) магнитное поле не имеет источников (нет магнитных зарядов), его силовые линии всегда замкнуты;

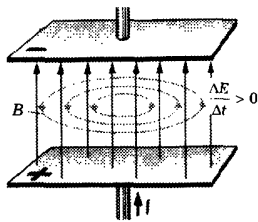


Рис. 3.77

- 4) переменное электрическое поле (переменный поток электрических силовых линий) создает переменное магнитное поле. Линии магнитной индукции этого поля охватывают линии напряженности электрического поля (рис. 3.77) аналогично случаю создания переменным магнитным полем вихревого электрического поля.

Однако теперь при возрастании напряженности электрического поля

$\left(\frac{\Delta E}{\Delta t} > 0\right)$ направление вектора индукции $\vec{B}$ образует правый винт с на-

правлением вектора $\vec{E}$. При убывании напряженности магнитного поля вектор магнитной индукции образует с направлением вектора $\vec{E}$ левый винт.

Источником переменного магнитного поля служат ускоренно движущиеся заряды. Оно, в свою очередь, создает переменное электрическое поле, которое вызывает переменное магнитное поле. Эти порождающие друг друга переменные магнитные и электрические поля и представляют собой электромагнитное поле.

Таким образом, источником электромагнитного поля являются ускоренно движущиеся заряды.

Переменные электрическое и магнитное поля существуют в пространстве независимо от наличия в них проводников. Проводник, замкнутый на гальванометр, в опытах Фарадея по электромагнитной индукции явился лишь индикатором, с помощью которого было обнаружено переменное электрическое поле, индуцированное переменным магнитным полем.

Согласно законам Максвелла, переменное электрическое поле не может существовать без переменного магнитного, а переменное магнитное — без переменного электрического.

Электрическое поле может существовать без магнитного или магнитное без электрического лишь по отношению к определенной системе отсчета. Так, покоящийся в данной системе отсчета заряд создает только электрическое поле. Однако относительно любой другой движущейся (относительно данной) системы отсчета он создает магнитное поле. То же самое можно сказать относительно неподвижного магнитного поля (например, постоянного магнита). Относительно движущегося к нему наблюдателя магнитное поле будет переменным и, следовательно, будет порождать вихревое электрическое поле.

Таким образом, электромагнитное поле — это единое целое: в зависимости от системы отсчета проявляются те или иные свойства поля.

Теорию Максвелла по своей значимости можно сравнить с законами Ньютона.

Предсказания теории Максвелла в полной мере были подтверждены экспериментально и явились основой для всей современной электротехники и радиотехники.

3.5.4. Электромагнитные волны

Электромагнитные волны — это электромагнитные колебания, которые распространяются в пространстве.

Существование электромагнитных волн было предсказано М. Фарадеем в 1832 г. Оно следует из теории электромагнитного поля Максвелла, который показал, что электромагнитные колебания распространяются в вакууме со скоростью света, равной $3 \cdot 10^8$ м/с.

Электромагнитные колебания представляют собой колебания (периодические изменения абсолютных величин и направлений) вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ и индукции магнитного поля $\vec{B}$ во времени и пространстве.

На рис. 3.78 представлено распределение электрического и магнитного полей в пространстве в некоторый момент времени для электромагнитной волны, движущейся в направлении оси Z . Как видно из рисунка (и это следует из теории Максвелла), электромагнитная волна — поперечная волна, т. е. колебания электрического и магнитного векторов поля перпендикулярны направлению распространения волны: $\vec{E} \perp \vec{B} \perp \vec{v}$, где $\vec{v}$ — скорость волны.

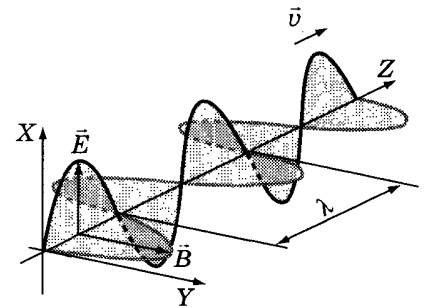


Рис. 3.78

Из теории Максвелла следует, что электромагнитная волна может порождаться периодически колеблющимися в проводнике электронами (ускоренно движущимися зарядами). Поскольку движущиеся с ускорением заряды создают электромагнитное поле, то, раз возникнув, это периодически меняющееся электромагнитное поле распространяется в пространстве (во все стороны от источника волн), создавая электромагнитную волну.

В 1888 г. немецкий физик Г. Герц своими опытами подтвердил теорию электромагнитных волн Максвелла. Ему удалось получить и зарегистрировать электромагнитные волны.

Также из теории Максвелла следует, что радиоволны, свет, рентгеновское излучение представляют собой электромагнитные волны с различными длинами волн, причем между соседними диапазонами длин волн нет четких границ.

Длина световой волны (как и любых других волн) связана с частотой ν и скоростью распространения v соотношением:

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

Скорость света в вакууме (или в воздухе, поскольку они мало отличаются друг от друга) принято обозначать буквой c , тогда:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}.$$

Скорость света в различных средах меньше скорости в вакууме и зависит от конкретного вещества. При переходе из одной среды в другую меняется также и длина волны. Частота колебаний (электрического вектора $\vec{E}$) и период ($T = 1/\nu$) остаются неизменными.

Электромагнитные волны, подобно всем другим видам волн, испытывают *отражение* и *преломление* на границе двух сред с разной диэлектрической проницаемостью, а также *поглощение*.

Экспериментальное обнаружение электромагнитных волн

Экспериментальное подтверждение существования электромагнитных волн было получено Г. Герцем в 1888 г. с помощью сконструированного им генератора и приемника электрических колебаний, вошедших в науку под названием *вибратор* и *резонатор Герца*.

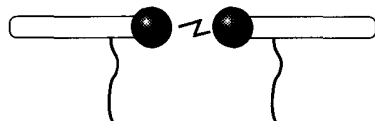


Рис. 3.79

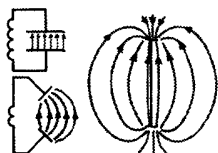


Рис. 3.80

Вибратор Герца — это металлическая антенна, имеющая форму штыря с утолщениями на концах и разрывом посередине для подключения источника (для работы в режиме излучения) или нагрузки (для работы в режиме приема) (рис. 3.79). В конструкции применялись медные стержни с металлическими шарами (или полосами на концах) и искровым промежутком между ними, подключенные к индукционной машине. Наименьший из вибраторов имел длину 26 см при частоте излучения $5 \cdot 10^8$ Гц (длина волны 60 см).

Вибратор Герца представляет собой открытый колебательный контур, который может быть получен из обычного колебательного контура путем раздвижения пластин конденсатора и замены катушки на прямой провод (рис. 3.80). Делается это для того, чтобы увеличить частоту свободных колебаний контура $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ за счет уменьшения индуктивности и емкости.

Увеличение частоты колебаний необходимо, в свою очередь, для получения интенсивных электромагнитных волн. Известно, что чем быстрее меняется напряженность электрического поля, тем больше магнитная индукция и, в свою очередь, чем быстрее меняется индукция магнитного поля, тем больше напряженность электрического поля.

В открытом контуре заряды не сосредоточены на концах, а распределены по всему проводнику, и сила тока достигает максимума посередине. Электромагнитное поле охватывает все пространство вокруг.

В своих опытах Герц возбуждал в открытом вибраторе серии импульсов быстропеременного тока. Колебания зарядов вибратора создавали электромагнитную волну. Регистрация излучаемых вибратором электромагнитных волн производилась с помощью приемного вибратора (*резонатора*), такого же, как и излучающий (когда собственная частота приемного резонатора совпадает с частотой излучателя, наблюдается резонанс). Герц обнаружил колебания в приемном вибраторе по возникновению искорок между его проводниками. Из своих опытов Герц определил скорость электромагнитной волны, которая оказалась приблизительно равной скорости света. Таким образом, опыты Герца блестяще подтвердили предсказания Максвелла.

Шкала электромагнитных волн

Шкала электромагнитных волн с указанием длин волн и частот различных излучений изображена на рис. 3.81.

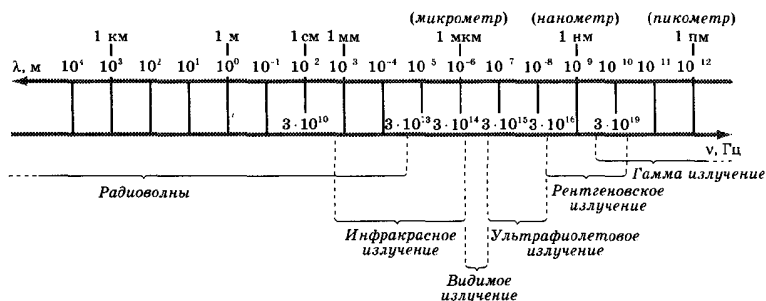


Рис. 3.81

Хотя, как было указано выше, между соседними диапазонами волн нет четких границ, все же принято выделять низкочастотное излучение, радиоизлучение, инфракрасные лучи, видимый свет, ультрафиолетовые лучи, рентгеновские лучи и γ -излучение.

Принципиального различия между отдельными видами излучений нет — все они представляют собой электромагнитные волны, порождаемые ускоренно движущимися частицами. Электромагнитные волны могут быть обнаружены по их действию на заряженные частицы. В вакууме волны любого вида электромагнитного излучения распространяются со скоростью 300 000 км/с. Различаются они по способу получения (излучение антенны, тепловое излучение, излучение при торможении быстрых электронов) и методам регистрации.

Все перечисленные виды электромагнитных излучений порождаются также космическими объектами и могут быть исследованы с помощью искусственных спутников и космических кораблей (в первую очередь, это относится к рентгеновскому и γ -излучению, сильно поглощаемым атмосферой).

Ниже подробнее рассматриваются свойства, получение и использование электромагнитного излучения радио-, оптического и рентгеновского диапазонов.

3.5.5. Различные виды электромагнитных излучений и их практическое применение

Электромагнитное излучение — это, во-первых, процесс образования свободного электромагнитного поля при неравномерном движении и взаимодействии электрических зарядов; во-вторых, это свободное электромагнитное поле (электромагнитные волны).

Существование поля излучения (т. е. электромагнитной волны) является следствием того, что скорость распространения электромагнитных волн в вакууме c конечна: $c = 3 \cdot 10^8$ м/с (т. е. того, что верна теория близкого действия, а не дальнего действия). Изменение движения заряда изменяет поле на расстоянии r от него только через промежуток времени r/c . Поэтому даже если убрать источник излучения, поле продолжает существовать, а это означает, что электромагнитное поле обладает импульсом и энергией.

Плотностью потока электромагнитного излучения I называют отношение электромагнитной энергии ΔW , проходящей за единицу времени Δt через единицу площади S поверхности, перпендикулярной лучу:

$$I = \frac{\Delta W}{S \Delta t}.$$

Другими словами, это мощность электромагнитного излучения на единицу площади. Плотность потока электромагнитного излучения измеряется в *ваттах на квадратный метр* (Вт/м²).

Легко показать, что плотность потока излучения равна произведению плотности электромагнитной энергии w (энергия в единице объема) на скорость ее распространения: $I = wc$.

Точечным источником излучения называется источник, размеры которого намного меньше расстояния, на котором оценивается его действие. Это идеализация, подобная материальной точке. Хорошим приближением к точечному источнику являются звезды.

Если поместить точечный источник в центр сферы радиусом R , то становится понятно, что плотность потока излучения убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до источника:

$$I = \frac{\Delta W}{S \Delta t} = \frac{\Delta W}{4\pi R^2 \Delta t} \cdot \frac{1}{R^2}.$$

Можно показать, что плотность потока излучения пропорциональна четвертой степени частоты:

$$I \sim \omega^4. \quad (3.27)$$

Это следует из того, что напряженность электромагнитного поля и магнитная индукция пропорциональны ускорению a излучающих частиц, которое, в свою очередь, пропорционально квадрату частоты: $E \sim a \sim \omega^2$, $B \sim a \sim \omega^2$. Полная плотность энергии электромагнитного поля равна сумме плотностей энергий электрического и магнитного полей: $I \sim w \sim (E^2 + B^2)$, откуда следует формула (3.27).

Таким образом, из вышеизложенного следует, что:

- 1) электромагнитное поле переносит энергию;
- 2) плотность потока излучения (интенсивность электромагнитной волны) равна произведению плотности энергии на скорость ее распространения;
- 3) интенсивность волны пропорциональна четвертой степени частоты и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника.

Оптическое излучение

К оптическому излучению относятся электромагнитные волны, длины которых заключены в диапазоне с условными границами от нескольких нанометров до десятых долей миллиметра (диапазон частот $\sim 3 \cdot 10^{11} \dots 3 \cdot 10^{16}$ Гц).

К оптическому излучению помимо воспринимаемого глазом *видимого излучения* (обычно называемого *светом*), относятся *инфракрасное излучение* (диапазон частот — $3 \cdot 10^{11} \dots 3 \cdot 10^{14}$ Гц, диапазон длин волн 1 мм ... 0,8 мкм) и *ультрафиолетовое излучение* (диапазон частот $3 \cdot 10^{14} \dots 3 \cdot 10^{16}$ Гц, диапазон длин волн 380 нм ... 10 нм).

Все перечисленные ниже виды излучений объединяет следующее: электромагнитные волны излучаются при ускоренном движении заряженных частиц, входящих в состав атома, — электронов и ионов. Для того, чтобы атом начал излучать, ему необходимо передать энергию, или возбудить. Излучая, атом теряет полученную энергию, а для непрерывного свечения вещества необходим приток энергии извне.

Виды излучений

Тепловое излучение — наиболее простой и распространенный вид излучения, при котором потеря атомами энергии на излучение света компенсируется за счет энергии теплового движения атомов или молекул излучающего тела. Чем выше температура тела, тем больше кинетическая энергия его атомов или молекул, тем интенсивнее свечение тела.

Естественными тепловыми источниками света являются Солнце и звезды. К искусственным тепловым источникам света относятся те приборы, в основе которых лежит излучение, вызванное нагревом рабочего тела, например, электрические лампочки (нагрев спирали), пламя газовой горелки, свечи.

Люминесценция — это излучение, избыточное над тепловым излучением тела и по длительности значительно превышающее период световых колебаний. Другими словами, если нераскаленное тело, скажем, при комнатной температуре светится, это свечение называется люминесценцией. Причины, вызывающие такое свечение, могут быть разными — от облучения ультрафиолетовым излучением, электронами, рентгеновскими лучами до механических воздействий (трение) или воздействия электрическим полем. Рассмотрим некоторые виды люминесценции.

Фотолюминесценция — свечение тел, вызванное облучением светом, как правило, ультрафиолетовыми лучами. Квант света поглощается атомом, переводит его на возбужденный уровень. Через некоторое время атом возвращается на основной уровень, излучая квант света. Излучаемый при фотолюминесценции свет, как правило, имеет большую длину волны, чем возбуждающий фотолюминесценцию.

Явление фотолюминесценции плодотворно исследовалось советским физиком С. И. Вавиловым.

Это явление широко используется в осветительной технике, например, в люминесцентных и газосветных лампах.

Катодолюминесценция — это свечение твердых тел, вызванное бомбардировкой их электронами. Благодаря катодолюминесценции светятся экраны электронно-лучевых трубок телевизоров.

Хемилюминесценция — свечение, являющееся результатом возбуждения атомов или молекул энергией, выделяющейся при химических реакциях. Источник света остается холодным.

Электролюминесценция — свечение тела, вызванное электрическим разрядом. Например, при разряде в газах электроны получают большую кинетическую энергию. При столкновении с ато-

мами газа они отдают часть своей кинетической энергии на возбуждение атомов газа, которые излучают ее в виде световых волн.

Северное сияние — это проявление электролюминесценции. Потоки заряженных частиц, испускаемых Солнцем, захватываются магнитным полем Земли. Эти заряженные частицы возбуждают у магнитных полюсов Земли атомы верхних слоев атмосферы, благодаря чему эти слои светятся. Электролюминесценция используется в неоновых лампах.

Рентгеновское излучение. Рентгеновское излучение возникает в диапазоне $3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{20}$ Гц ($\lambda = 10^{-12} - 3 \cdot 10^{-8}$ м).

Рентгеновское излучение было открыто в 1895 г. немецким физиком В. Рентгеном. Изучая ускоренное движение заряженных частиц в закрытой черным картоном разрядной трубке, Рентген обнаружил свечение экрана, покрытого солью бария, находящегося на некотором расстоянии от трубки. Излучение высокой проникающей способности, испускаемое заряженными частицами в трубке, Рентген назвал X-лучами. *Источником рентгеновского излучения является изменение состояния электронов внутренних оболочек атомов или молекул, а также ускоренно движущиеся свободные электроны.*

Подобно видимому свету, оставляющему тень за непрозрачными предметами, *рентгеновское излучение* (как его стали называть впоследствии) тоже оставляло такие тени. Однако проникающая способность этого излучения была столь велика, что Рентген мог рассматривать скелет собственной руки на экране. Рентгеновские лучи могут проникать через толстую книгу, деревянную доску толщиной несколько сантиметров, металлическую пластинку толщиной около сантиметра.

Дифракция рентгеновских лучей. Для доказательства волновой природы рентгеновских лучей немецкий физик Макс Лауэ направил узкий пучок этих лучей на кристалл, за которым была расположена фотопластинка. Целью эксперимента было наблюдение дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке, период которой — расстояние между атомами — составляет порядка 10^{-8} см. Опыт блестяще удался. На рис. 3.82 представлена полученная картина дифракции — *лауэграмма*. Наряду с большим центральным пятном, которое давали лучи, распространяющиеся по прямой, возникли небольшие регулярно расположенные пятнышки вокруг центрального пятна, появление которых можно объяснить только дифракцией рентгеновских лучей на упорядоченной структуре кристалла.

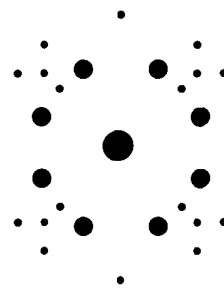


Рис. 3.82

Рентгеновское излучение применяется в рентгеноструктурном анализе (исследование структуры кристаллической решетки), при изучении структуры молекул, при обнаружении дефектов в образцах, в медицине, криминалистике.

Большая доза рентгеновского облучения приводит к ожогам и изменению структуры крови.

Создание приемников рентгеновского излучения и размещение их на космических станциях позволило обнаружить излучение сотен звезд, а также оболочек сверхновых звезд и целых галактик.

Применение радиоволн

Принципы радиосвязи. Передача информации на расстояние с помощью электромагнитных сигналов в случае радиотрансляционной, телеграфной, телефонной связи часто осуществляется по проводам. Это обеспечивает качество информации и энергетически выгодно, но не всегда возможно. Для информационного обмена между космическими и военными объектами единственно возможной является радиосвязь.

Радиосвязь — это передача и прием информации с помощью радиоволн, распространяющихся в пространстве без проводов.

Передаваемая информация кодируется в радиосигнале. Для радиосвязи требуется *радиопередатчик*, излучающий радиоволны, переносящие кодированную информацию, и *радиоприемник*, улавливающий и декодирующий (расшифровывающий) излучаемый передатчиком сигнал. Дополнительно используются ретрансляторы, которые улавливают радиосигнал и переизлучают его с большей мощностью (это необходимо при слабой мощности излучаемого сигнала и для УКВ-излучения или телевидения).

Виды радиосвязи. Различают четыре вида радиосвязи: радиотелеграфная, радиотелефонная и радиовещание, телевидение, радиолокация. Они отличаются *типом кодирования передаваемого сигнала, или модуляцией.*

Радиотелеграфная связь осуществляется путем передачи сочетания точек и тире, кодирующего букву алфавита в азбуке Морзе. Впервые радиотелеграфная связь на расстоянии 250 м была продемонстрирована в 1895 г. в Санкт-Петербурге российским ученым А. С. Поповым. В 1901 г. итальянский инженер Г. Маркони впервые осуществил сеанс радиосвязи через Атлантический океан.

Значительная доля информации в настоящее время передается в радиодиапазоне.

Радиовещание — это передача в эфир речи, музыки, звуковых эффектов с помощью электромагнитных волн.

При **радиотелефонной связи** подобная информация передается только для приема конкретным абонентом.

Основные принципы радиосвязи представлены на блок-схеме (рис. 3.83). Колебания давления воздуха в звуковой волне превращаются с помощью микрофона в электрические колебания той же формы. Поскольку колебания звуковой частоты практически не излучаются, то для передачи звука используется излучение высокочастотных колебаний, один из параметров которых *модулируется* (изменяется).

В приемнике из модулированных колебаний высокой частоты выделяются низкочастотные колебания. Такой процесс преобразования сигнала называется *детектированием*.

Полученный в результате детектирования сигнал соответствует тому звуковому сигналу, который действовал на микрофон передатчика. После усиления колебания низкой частоты могут быть превращены в звук (рис. 3.83).

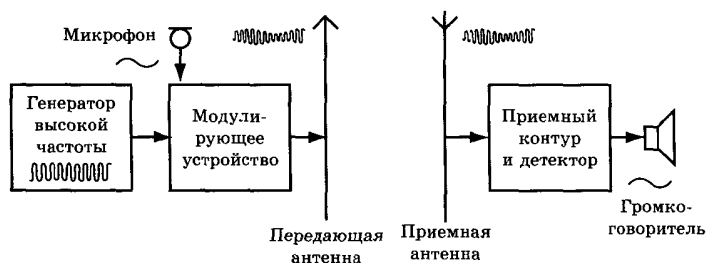


Рис. 3.83

Модуляция. Модуляция (от лат. *modulatio* — мерность, размеренность) — изменение по заданному закону во времени параметров, характеризующих какой-либо стационарный процесс.

Примером модуляции является изменение по определенному закону амплитуды, частоты или фазы гармонических колебаний с целью внесения в колебательный процесс требуемой информации.

Модуляция передаваемого сигнала — кодирование одного из его параметров.

Простейшим видом модуляции высокочастотного сигнала является амплитудная модуляция.

Амплитудная модуляция — изменение амплитуды высокочастотных колебаний по закону изменения передаваемого звукового сигнала.

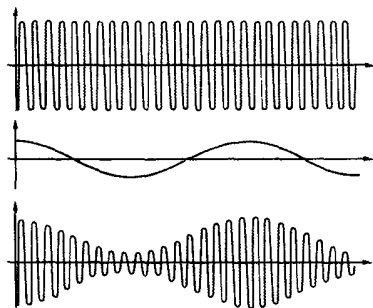


Рис. 3.84

На рис. 3.84 показаны: график колебаний высокой частоты — *несущей частоты* (рис. 3.84, а); график колебаний звуковой частоты — модулирующих колебаний (рис. 3.84, б); график модулированных по амплитуде колебаний (рис. 3.84, в).

Модуляция — медленный процесс. Это такие изменения в высокочастотной колебательной системе, при которых она успевает совершить очень много высокочастотных колебаний, прежде чем их амплитуда изменится заметным образом.

Амплитудную модуляцию можно осуществить, изменяя напряжение на колебательном контуре генератора незатухающих колебаний.

Если менять напряжение на контуре с частотой, много меньшей частоты колебаний, вырабатываемых генератором, то изменения амплитуды этих колебаний будут приблизительно пропорциональны изменениям напряжения. В самом простом устройстве для осуществления амплитудной модуляции включают последовательно с источником постоянного напряжения вторичную обмотку трансформатора, по первичной обмотке которого протекает ток звуковой частоты (рис. 3.85). В результате амплитуда колебаний в колебательном контуре будет меняться в такт с изменениями анодного напряжения, что означает амплитудную модуляцию высокочастотных колебаний низкочастотным сигналом.

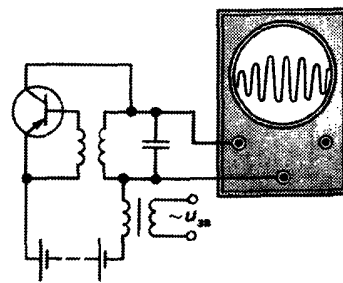


Рис. 3.85

Кроме амплитудной модуляции, в некоторых случаях применяют *частотную модуляцию* — изменение частоты колебаний в соответствии с управляющим сигналом. Преимуществом частотной модуляции является большая устойчивость по отношению к помехам.

Детектирование. Детектирование (от лат. *detectior* — обнаруживающий) — преобразование модулированных колебаний для выделения низкочастотного сигнала.

Это процесс, обратный модуляции колебаний, поэтому детектирование называют также *демодуляцией*. Детектирование связано с преобразованием частоты модулированного сигнала, и для его осуществления используют вакуумные и полупроводниковые диоды, транзисторы и т. д. Детектирование применяется в радиоприемных устройствах, телевидении, оптике.

Простейшая схема для детектирования амплитудно-модулированных сигналов, принятых приемником, представлена на рис. 3.86. Здесь детектирующим элементом служит полупроводниковый диод. Сигнал на входе имеет вид кривой, представленной на рис. 3.84, в. Диод пропускает пульсирующий ток одного направления, что соответствует верхней части кривой на рис. 3.84, в. Для сглаживания этого тока применяется конденсатор, являющийся простейшим *фильтром* (рис. 3.86). Фильтр работает так. В те моменты времени, когда диод пропускает ток, часть его проходит через нагрузку (*нагрузкой детектора* называется резистор, на который поступают колебания звуковой частоты), а другая часть ответвляется в конденсатор, заряжая его (см. сплошные стрелки на рис. 3.86). Разветвление тока уменьшает пульсации тока, проходящего через нагрузку. В промежутках между импульсами, когда диод заперт, конденсатор частично разряжается через нагрузку. Поэтому в интервале между импульсами ток через нагрузку течет в ту же сторону (пунктирная стрелка на рис. 3.86). Каждый новый импульс подзаряжает конденсатор. В результате через нагрузку течет ток звуковой частоты, форма колебаний которого почти точно воспроизводит форму низкочастотного сигнала на передающей станции (см. рис. 3.84, б).

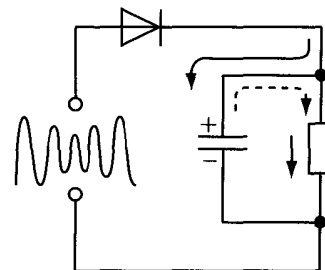


Рис. 3.86

Радиолокация. Радиолокация — это обнаружение объектов и определение их координат с помощью отражения радиоволн.

Излученный радиолокатором и отраженный от объекта сигнал в виде импульсов улавливается антенной и отображается на экране электронно-лучевой трубки. За время, прошедшее с момента излучения радиосигнала до момента его приема τ , он проходит двойное расстояние до объекта, которое определяется по формуле:

$$l = \frac{c\tau}{2},$$

где l — расстояние от объекта до радиолокатора, c — скорость света.

Радиолокаторы используют для обнаружения самолетов, кораблей, скопления облаков, в космических исследованиях. Детальная карта рельефа Венеры была получена с помощью радиолокатора межпланетной станции «Магеллан».

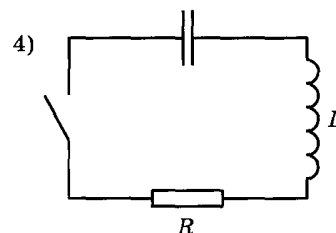
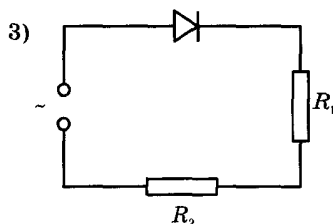
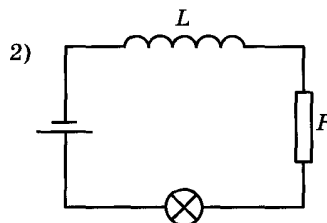
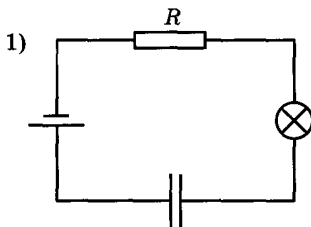
Примеры заданий ЕГЭ по теме 3.5.
«Электромагнитные колебания и волны»

Часть 1

При выполнении заданий уровня А нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

A1 1 2 3 4

A1. На каком из приведенных ниже рисунков изображен колебательный контур?



A2 1 2 3 4

A2. В электрическом колебательном контуре одной из колеблющихся величин является

- 1) заряд конденсатора
- 2) сопротивление проводов
- 3) индуктивность катушки
- 4) емкость конденсатора

A3 1 2 3 4

A3. Свободными колебаниями называют

- 1) периодически изменяющиеся характеристики системы
- 2) колебания, совершаемые в электрическом колебательном контуре
- 3) приливы и отливы рек и морей
- 4) колебания системы, совершающиеся только за счет первоначально сообщенной энергии при отсутствии внешних воздействий

A4 1 2 3 4

A4. Как изменится период свободных колебаний в электрическом контуре, если пластины конденсатора раздвинуть?

- 1) уменьшится
- 2) увеличится
- 3) не изменится
- 4) невозможно определить

A5 1 2 3 4

A5. Циклическая частота колебаний электрического контура при введении железного сердечника в катушку индуктивности

- 1) увеличится
- 2) не изменится
- 3) уменьшится
- 4) уменьшится, затем увеличится

- A6.** Переменный ток представляет собой
- 1) электрические гармонические колебания
 - 2) вынужденные электромагнитные колебания
 - 3) вынужденные колебания силы тока и напряжения, совершаемые по гармоническому закону
 - 4) свободные колебания в колебательном контуре.
- A7.** Как изменится емкостное сопротивление цепи переменного тока, если емкость конденсатора уменьшить в 2 раза, а частоту генерируемого тока уменьшить в 4 раза?
- 1) увеличится в 8 раз
 - 2) уменьшится в 2 раза
 - 3) увеличится в 4 раза
 - 4) уменьшится в 2 раза
- A8.** Три колебательных контура отличаются только величинами своих активных сопротивлений. Как будут отличаться резонансные частоты колебаний этих контуров и амплитуды тока и напряжения на частоте резонанса?
- 1) Резонансные частоты колебаний растут с увеличением сопротивления цепи, а амплитуды тока и напряжения уменьшаются.
 - 2) Резонансные частоты колебаний уменьшаются с увеличением сопротивления цепи, а амплитуды тока и напряжения увеличиваются.
 - 3) Резонансные частоты колебаний не зависят от активного сопротивления цепи, а амплитуды тока и напряжения уменьшаются с увеличением сопротивления.
 - 4) Резонансные частоты колебаний, как и амплитуды тока и напряжения, не зависят от активного сопротивления цепи
- A9.** Индуктивность электрического колебательного контура соответствует в механической колебательной системе:
- 1) координате
 - 2) скорости
 - 3) массе
 - 4) жесткости

1 2 3 4 A6

1 2 3 4 A7

1 2 3 4 A8

1 2 3 4 A9

Часть 2

Ответом к заданиям В1—В3 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

- В1.** Сколько колебаний происходит в электромагнитной волне с длиной волны 30 м в течение одного периода звуковых колебаний с частотой 200 Гц?
- В2.** Зная уравнение изменения со временем разности потенциалов на обкладках конденсатора $U = 50\cos 10^4\pi t$ В и емкость конденсатора $C = 9 \cdot 10^{-7}$ Ф, определите длину волны, соответствующую этому контуру.
- В3.** Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью $C = 0,9$ нФ и катушки с индуктивностью $L = 0,002$ Гн. На какую длину волны настроен контур (сопротивлением контура можно пренебречь)?

В1

В2

В3

3.6. Оптика

Оптика (от греч. — *optike*) — это раздел физики, изучающий законы излучения, распространения света и взаимодействия с веществом.

Оптика традиционно делится на следующие разделы.

1. Геометрическая (или лучевая) оптика. Этот раздел оптики исторически сформировался первым. Геометрическая оптика изучает законы распространения оптического излучения и формирования изображений предметов с помощью оптических систем на основе представления о световом луче как о прямой линии, не интересуясь природой самого света (т. е. вопросом о том, что такое свет). Законы геометрической оптики справедливы при условии, что размеры предметов много больше длины волны света; среда, в которой распространяется свет, оптически однородна, а свойства ее не зависят от интенсивности света.

2. Физическая оптика изучает вопросы, связанные с процессами испускания света, природой света и световых явлений. К ним, в частности, относятся следующие явления:

- интерференция и дифракция света, свидетельствующие о волновой природе света и являющиеся предметом изучения волновой оптики, в основе которой лежат уравнения Максвелла;
- тепловое излучение, разработка теории которого привела М. Планка к открытию квантовой природы излучения и определению постоянной Планка;
- люминесценция, исследование природы которой привело к идее о возможности создания оптических квантовых генераторов (лазеров).

Создание лазеров, в свою очередь, послужило стимулом для развития нелинейной оптики — раздела физической оптики, в котором рассматривается взаимодействие вещества со светом большой интенсивности, при котором свойства вещества зависят от интенсивности света, т. е. оно перестает быть оптически однородным и перестают работать законы геометрической оптики.

Благодаря лазерам стало возможным развитие голографии, которая сейчас используется начиная с музеев (демонстрация голограмм ценных экспонатов) до заводов, где голографические методы применяются для выявления дефектов и напряжений деталей машин.

3. Физиологическая оптика изучает строение глаза человека как составной части всего аппарата зрения, а также и все остальное, что относится к механизму зрения. По результатам исследований, проводимых в этой области, строится теория зрения, а также теория восприятия света и цвета. Достижения физиологической оптики используются в медицине, физиологии, технике, при разработке различных устройств — от очков до телевидения.

Выше приведен далеко не полный перечень явлений, изучаемых оптикой.

Практическое применение результатов исследований всех разделов оптики огромно. Пожалуй, нет отрасли науки или народного хозяйства, в которой не использовались бы достижения оптики или оптические методы исследования — от освещения улиц до новых систем хранения и записи информации для нужд вычислительной техники, до слежения за искусственными спутниками Земли и использования линий лазерной оптической связи для ведения телефонных переговоров и передачи изображений.

3.6.1. Прямолинейное распространение света в однородной среде

Геометрическая оптика

Геометрическая оптика — это раздел оптики, в котором изучаются законы распространения света в прозрачных веществах (средах) и построения изображений предметов с помощью оптических систем, в которые входят зеркала, линзы, призмы и другие оптические элементы.

Геометрическая оптика основывается на следующих основных законах, установленных опытным путем еще в глубокой древности:

- 1) закон прямолинейного распространения света;

- 2) закон отражения света от зеркальной поверхности;
- 3) закон преломления света на границе двух прозрачных сред;
- 4) закон независимости световых пучков или световых лучей. Он заключается в том, что два луча распространяются независимо друг от друга, т. е. не влияя друг на друга. Если в какой-то точке пространства сходятся два пучка, то освещенности, создаваемые этими пучками, складываются. Независимость распространения пучков означает, в частности, что при фотографировании какой-нибудь местности ограничение части световых пучков, поступающих в объектив, не приведет к изменению изображения, даваемого остальными пучками.

Законы геометрической оптики используются для расчета *оптических систем*, например, микроскопов, телескопов, больших зеркал и объективов, используемых в астрономии, фотоаппаратах и др.

Скорость света и ее измерение

Скорость света в свободном пространстве (вакууме) — это скорость распространения любых электромагнитных волн, в том числе световых. Это одна из фундаментальных физических постоянных. Скорость света представляет собой предельную скорость, с которой распространяются любые физические воздействия; она инвариантна при переходе от одной системы отсчета к другой.

Скорость света в среде c' зависит от показателя преломления среды n , различного для разных частот ν излучения:

$$c'(\nu) = c/n(\nu).$$

Впервые скорость света определил датский ученый О. К. Рёмер по изменению промежутков времени между затемнениями спутников Юпитера (рис. 3.87). Промежуток времени, в течение которого самый большой спутник Юпитера Ио погружался в тень при своем обращении вокруг Юпитера, отличался на 22 минуты в зависимости от того, из какой точки орбиты Земли велось наблюдения. Первый раз из положения, когда Земля при своем движении вокруг Солнца подошла ближе всего к Юпитеру, и второй раз, через несколько месяцев, когда Земля удалилась от Юпитера.

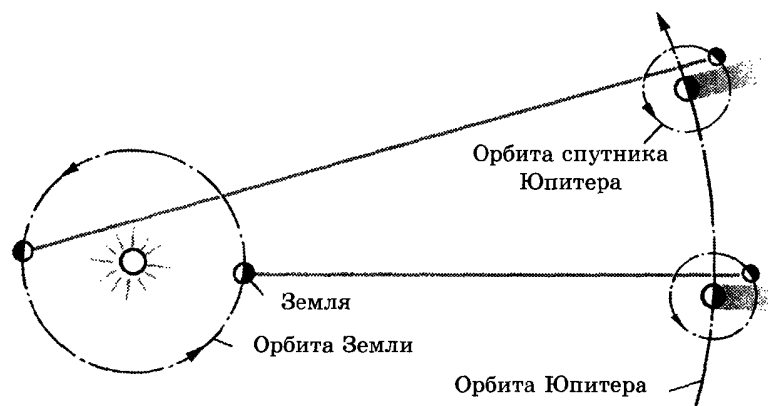


Рис. 3.87

Рёмер объяснял это так: «Если бы я мог остаться на другой стороне земной орбиты, то спутник всякий раз появлялся бы из тени в назначенное время — наблюдатель, находящийся там, увидел бы Ио на 22 минуты раньше. Запаздывание в этом случае происходит из-за того, что свет тратит 22 минуты на прохождение от места моего первого наблюдения до места моего теперешнего положения». Рёмер получил величину 215 000 км/с из-за малой точности измерений и неточного знания радиуса орбиты Земли.

В 1849 г. А. И. Л. Физо первым измерил скорость света по времени прохождения светом точно известного расстояния (базы). Поскольку показатель преломления воздуха очень мало отличается от единицы, то измерения в атмосфере Земли дают величину, весьма близкую к c . В опыте Физо пучок света от источника, отраженный полупрозрачным зеркалом, периодически прерывался вращающимся зубчатым диском, затем проходил расстояние в 8,6 км (базу) до зеркала и, отразившись от него, возвращался к диску (рис. 3.88). Попадая на зубец, свет не достигал глаза наблюдателя, проходящий между зубцами свет можно было наблюдать. По известным скоростям вращения диска определялось время прохождения светом базы. Физо получил значение $c = 313\,300$ км/с.

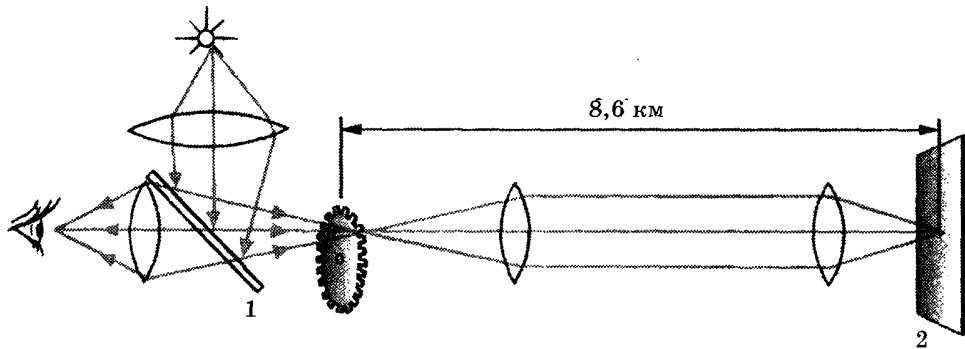


Рис. 3.88

Было разработано еще много других, более точных, методов измерения скорости света. Так, американский физик А. Майкельсон разработал совершенный метод измерения скорости с применением вращающихся зеркал.

Была измерена скорость света в различных прозрачных веществах. Во всех веществах она меньше, чем в вакууме. В 1856 г. была определена скорость света в воде, она оказалась в $4/3$ раза меньше, чем c .

По современным данным, скорость света в вакууме равна $299\,792\,458 \pm 1,2$ м/с.

Определение скорости света с большой точностью важно не только из теоретических соображений и для определения других физических величин, но и в практическом смысле. Например, оно необходимо для точного определения расстояний в радиолокации, оптической локации, в системах слежения искусственных спутников Земли и др.

Световой луч

Световой луч обозначает линию, вдоль которой распространяется поток энергии волны, испущенный в определенном направлении источником света.

В однородной среде луч — прямая линия. При переходе через границу, разделяющую две среды с разными показателями преломления, луч *преломляется* согласно закону преломления Снелля.

Под *световым лучом* в оптике понимают достаточно узкий пучок света, который на всем пути его распространения, подлежащем изучению, можно считать нерасходящимся.

Термин «луч» употребляется также для обозначения узкого пучка частиц (например, электронный луч).

Распространение света в однородной среде. Одним из первых и основных законов геометрической оптики является *закон прямолинейного распространения света*.

В однородной среде свет распространяется прямолинейно.

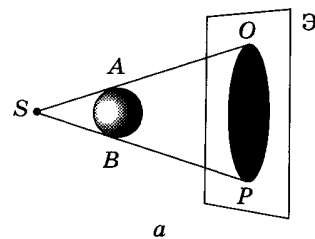
Этот закон был известен еще Евклиду за 300 лет до н. э.

Тень. Одним из доказательств прямолинейного распространения света является образование *тени* при освещении предмета *точечным источником света* (рис. 3.89, а). Если бы лучи распространялись не прямолинейно, а, скажем, огибали бы предмет, тень могла бы не образоваться.

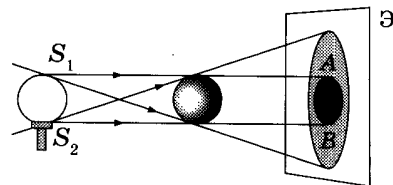
Полутень. Благодаря все тому же прямолинейному распространению света от источника больших размеров (сравнимых с размерами предмета и расстоянием до него и до экрана) образуются тень и полутень (рис. 3.89, б). Тень (черный круг на рис. 3.89, б) образуется в том месте на экране Э, куда не доходят лучи ни от одной из точек источника. Полутень (серый круг на рис. 3.89, б) образуется в местах, куда доходят лучи только от некоторых точек источника (протяженный источник света всегда можно представить себе состоящим из множества точечных источников).

Доказательством прямолинейного распространения света является также получение четких изображений предмета при помощи маленьких отверстий в камере-обскуре, в которой (перевернутое) изображение предмета на задней стенке камеры получается проектированием предмета при помощи *прямолинейных лучей* (рис. 3.90).

В природе демонстрацией прямолинейного распространения света являются лунные и солнечные затмения. Они наступают тогда, когда Луна, Земля и Солнце лежат на одной линии и Луна попадает в тень, отбрасываемую Землей (лунное затмение), или Луна заслоняет собой на несколько минут Солнце.



а



б

Рис. 3.89

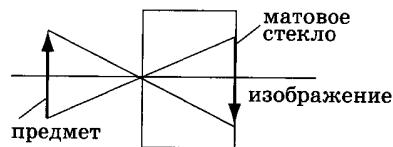


Рис. 3.90

3.6.2. Закон отражения света

Принцип Гюйгенса. Принцип Гюйгенса—Френеля

Принцип Гюйгенса. Согласно принципу Гюйгенса каждая точка среды, до которой дошло световое возмущение, является, в свою очередь, центром вторичных волн; поверхность, огибающая в некоторый момент времени эти вторичные волны, указывает положение к этому моменту фронта действительно распространяющейся волны.

Для того чтобы, зная положение волновой поверхности в момент времени t , найти ее положение в следующий момент времени $t + \Delta t$, нужно каждую точку волновой поверхности рассматривать как источник вторичных волн. Поверхность, касательная ко всем вторичным волнам, представляет собой волновую поверхность в следующий момент времени (рис. 3.91). Этот принцип справедлив для распространения волн любой природы, хотя Гюйгенсом он был сформулирован именно для световых волн.

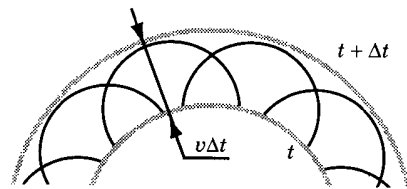


Рис. 3.91

Для механических волн принцип Гюйгенса имеет наглядное истолкование: частицы среды, до которых доходят колебания, в свою очередь, колеблясь, приводят в движение соседние частицы среды, с которыми они взаимодействуют.

Принцип Гюйгенса—Френеля — основной постулат волновой теории, описывающий и объясняющий механизм распространения волн, в частности, световых.

Принцип Гюйгенса—Френеля является развитием принципа, который ввел современник Ньютона Х. Гюйгенс в 1678 г.

О. Френель объединил принцип Гюйгенса с идеей интерференции вторичных волн. Согласно идее Френеля, волновая поверхность в любой момент времени представляет собой не просто огибающую вторичных волн, а результат их интерференции.

Для того чтобы вычислить амплитуду световой волны в любой точке пространства, надо мысленно окружить источник света сферической поверхностью. Интерференция волн от вторичных источников, расположенных на этой поверхности, определяет амплитуду в рассматриваемой точке пространства.

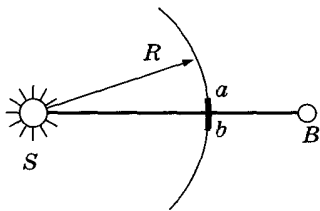


Рис. 3.92

Такого рода расчеты показали, что результат интерференции вторичных волн в точке B от источников, расположенных на сферической поверхности радиусом R (рис. 3.92), оказывается таким, как если бы лишь вторичные источники на малом сферическом сегменте ab посылали свет в точку B . Вторичные волны, испускаемые источниками, расположенными на остальной части поверхности, гасят друг друга в результате интерференции. Поэтому все происходит так, как если бы свет распространялся лишь вдоль прямой SB , то есть прямолинейно.

Отражение света. Закон отражения света

Большинство окружающих нас предметов видимы глазу не потому, что излучают свет, а потому, что отражают его.

Закон отражения света. Пусть на зеркальную поверхность MN (рис. 3.93) падает луч света A_1A . Луч A_1A называется *падающим лучом*, точка A пересечения этого луча с поверхностью называется *точкой падения*. Восстановим из точки A перпендикуляр AE к поверхности MN . Угол α между падающим лучом и перпендикуляром называется *углом падения*. Пусть луч A_1A , отразившись от поверхности, распространяется в направлении AA_2 под некоторым углом γ . Луч AA_2 называется *отраженным лучом*, а угол γ — *углом отражения*. Плоскость, в которой лежат луч A_1A и перпендикуляр AE , называется *плоскостью падения*.

Закон отражения света гласит:

1. Отраженный луч лежит в плоскости падения.
2. Угол падения равен углу отражения ($\alpha = \gamma$).

Обратимость направления световых лучей. Если падающий луч на рис. 3.93 направить вдоль

A_2A , то он отразится вдоль направления AA_1 . В этом заключается *принцип обратимости хода лучей света*. Он также является одним из основных положений геометрической оптики и используется при построении оптических изображений.

Закон отражения можно вывести с помощью принципа Гюйгенса.

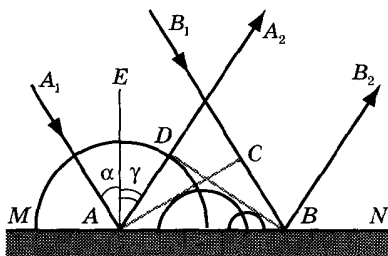


Рис. 3.93

Пусть плоская волна, обозначенная лучами A_1A и B_1B и плоской волновой поверхностью AC , падает на зеркальную плоскость MN под некоторым углом α (рис. 3.93). Различные участки волновой поверхности AC достигают отражающей границы не одновременно. Возбуждение колебаний в точке A начнется на время $\Delta t = CB/v$ (где v — скорость волны) раньше, чем в точке B .

В момент, когда волна достигнет точки B и в этой точке начнется возбуждение колебаний, вторичная волна с центром в точке A будет представлять собой полусферу радиусом $r = AD = v\Delta t = CB$. Изменение радиусов вторичных волн от точек, лежащих между точками A и B , показано на рис. 3.93. Плоскость DB — огибающая вторичных волн, касательная к сферическим поверхностям. DB — волновая поверхность отраженной волны. Отраженные лучи AA_2 и BB_2 перпендикулярны волновой поверхности DB ; γ — угол отражения.

Так как $AD = CB$ и треугольники ADB и ACB прямоугольные, то $\angle DBA = \angle CAB$. Но $\alpha = \angle CAB$ и $\gamma = \angle DBA$ как углы с перпендикулярными сторонами. Следовательно, угол отражения равен углу падения:

$$\alpha = \gamma.$$

Кроме того, из построения Гюйгенса вытекает, что падающий луч, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости, что и требовалось доказать.

3.6.3. Построение изображений в плоском зеркале

Оптическое изображение

Оптическое изображение — это картина, получаемая в результате прохождения через оптическую систему лучей, распространяющихся от объекта, и воспроизводящая его контуры и детали.

Под *оптической системой* понимают совокупность оптических деталей — линз, призм, зеркал, плоскопараллельных пластинок, скомбинированных определенным образом для получения оптического изображения или для преобразования светового потока, идущего от источника света.

Оптический объект (предмет, который мы хотим изобразить с помощью оптической системы) представляет собой совокупность точек, светящихся собственным светом (т. е. излучающих) либо отраженным светом.

Для того, чтобы изображение максимально соответствовало объекту (было качественным), необходимо, чтобы лучи света, исходящие из какой-либо точки объекта, после преломлений и отражений в оптической системе вновь сходились в одной точке, которая и является изображением точки объекта. Это возможно лишь тогда, когда точка объекта находится на небольшом расстоянии от оси оптической системы, например, линзы, так, что лучи, исходящие из предмета и участвующие в его изображении, находятся в так называемой *параксиальной* (приосевой) *области* оптической системы. Оптическая система, в которой точка изображается точкой, т. е. без искажений, и все пропорции предмета передаются правильно, называется *идеальной оптической системой*.

Применение законов геометрической оптики дает возможность получить изображение любой точки, находящейся в параксиальной области, без искажений.

Оптические изображения делятся на *действительные* и *мнимые*.

Под *действительным изображением* понимают такое, которое получается в результате пересечения реальных (действительных) лучей, вышедших из оптической системы (т. е. сходящихся лучей, пересекающихся в точке изображения). Примером такого изображения является изображение, получающееся на фотопленке.

Мнимым изображением называется изображение, получающееся в результате воображаемого пересечения расходящихся лучей, вышедших из оптической системы. Такое изображение нельзя получить на экране либо фотопленке. Глаз, тем не менее, увидит его в месте мнимого пересечения лучей. Мнимое изображение может служить источником света для дальнейшего построения действительного изображения другой оптической системой, которое затем можно зафиксировать, например, на фотопленке.

Примером мнимого изображения является всем знакомое изображение предметов в зеркале.

Построение изображения в плоском зеркале

Пусть на плоское зеркало падает пучок лучей SO , SO_1 , SO_2 из точечного источника S (рис. 3.94). После отражения в зеркале в глаз человека попадает расходящийся пучок лучей. Если теперь продолжить каждый из отраженных лучей за зеркало, то они пересекутся в одной точке S_1 , которая и является *мнимым изображением* точки S . То, что лучи действительно пересекутся в одной точке, легко доказать, используя закон отражения света и теоремы геометрии, как и то, что $S_1O = SO$, $S_1O_2 = SO_2$, $S_1O_3 = SO_3$.

Отсюда следует, что правила построения предмета в зеркале сводятся к следующему (рис. 3.95): из точки A предмета (в данном случае это стрелка AB) опускают перпендикуляр на плоскость зеркала; на продолжении этого перпендикуляра за зеркалом на точно таком же расстоянии откладывают точку A_1 ; точно

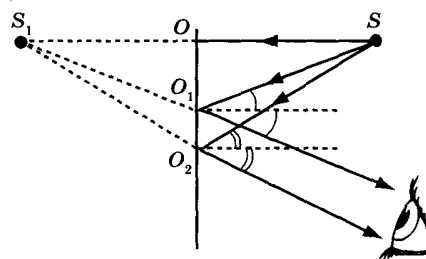


Рис. 3.94

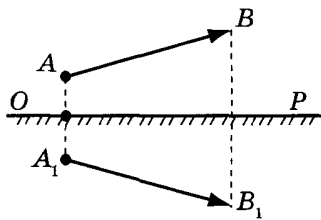


Рис. 3.95

так же поступают с точкой B . Затем соединяют точки A_1 и B_1 . Стрелка A_1B_1 и будет мнимым изображением стрелки AB .

Из вышеизложенного следует, что *изображение предмета в плоском зеркале симметрично предмету относительно плоскости зеркала*. Последнее означает, что оно является мнимым, прямым (т. е. не перевернутым), равным по размеру самому предмету и находится на таком же расстоянии за зеркалом, на каком предмет расположен перед ним.

3.6.4. Закон преломления света

Преломление света — это изменение направления распространения светового луча при его прохождении через границу раздела двух прозрачных сред.

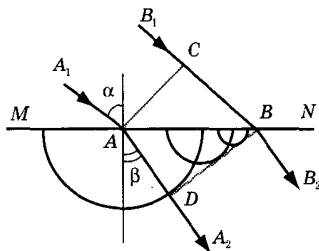


Рис. 3.96

На рис. 3.96 показаны: луч A_1A , падающий на границу раздела MN двух однородных сред; преломленный луч AA_2 ; перпендикуляр к плоскости раздела, проходящий через *точку падения луча* A .

Угол α называется *углом падения*, угол β — *углом преломления*.

Преломление света подчиняется определенным законам.

1. Луч падающий и луч преломленный лежат в одной плоскости с нормалью, проведенной к границе раздела двух сред в точке падения луча. Плоскость эта называется *плоскостью падения*.

2. Угол падения и угол преломления связаны соотношением:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n, \quad (3.28)$$

где n — постоянная, не зависящая от углов α и β .

Величина n называется *показателем преломления* и зависит лишь от свойств обеих сред, через границу раздела которых проходит свет.

Закон преломления, выраженный соотношением (3.28), называется *законом Снелля* (Снеллиуса).

Закон преломления света выводится с помощью *принципа Гюйгенса*. Преломление света при переходе из одной среды в другую вызвано различием в скоростях распространения света в этих средах. Пусть плоская волна, обозначенная лучами A_1A и B_1B и плоской волновой поверхностью AC , падает на зеркальную плоскость MN под некоторым углом α (рис. 3.96). Различные участки волновой поверхности AC достигают отражающей границы не одновременно. Возбуждение колебаний в точке A начнется на время $\Delta t = CB/v_1$ (где v_1 — скорость волны в первой среде) раньше, чем в точке B . В момент времени, когда вторичная волна в точке B только начнет возбуждаться, волна от точки A во второй среде уже имеет вид полусферы радиусом $AD = v_2 \cdot \Delta t$, где v_2 — скорость света во второй среде. Волновая поверхность преломленной волны (от центров, лежащих на границе раздела двух сред) в этот момент времени представлена плоскостью BD — касательной к волновым поверхностям всех вторичных волн во второй среде.

Угол падения α луча равен $\angle CAB$ в треугольнике ABC (стороны одного угла перпендикулярны сторонам другого). Следовательно,

$$CB = v_1 \Delta t = AB \sin \alpha. \quad (3.29)$$

Угол преломления β равен углу ABD треугольника ABD . Поэтому

$$AD = v_2 \Delta t = AB \sin \beta. \quad (3.30)$$

Разделив почленно (3.29) на (3.30), получим

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n, \quad (3.31)$$

где n — постоянная величина, не зависящая от угла падения.

Из построения (рис. 3.96) видно, что луч падающий и луч преломленный лежат в одной плоскости с нормалью, проведенной к границе раздела двух сред в точке падения луча. Это утверждение вместе с выражением (3.31) представляет собой закон преломления света.

Таким образом, из принципа Гюйгенса не только выводится закон преломления света, но и раскрывается физический смысл показателя преломления: он равен соотношению скоростей света в средах, на границе между которыми происходит преломление (см. (3.31)).

Абсолютный и относительный показатели преломления

Показатель преломления (коэффициент преломления) — это оптическая характеристика среды, связанная с *преломлением света* на границе раздела двух прозрачных, оптически однородных и изотропных сред при переходе из одной среды в другую и связанная с различием скоростей распространения света v_1 и v_2 в этих средах.

Величина показателя преломления, равная соотношению этих скоростей $n_{21} = v_1/v_2$, называется *относительным показателем преломления*. Если свет падает на первую или вторую среду из вакуума, где скорость распространения света равна c , то показатель преломления называется *абсолютным показателем преломления* и равен $n_1 = c/v_1$ или $n_2 = c/v_2$ соответственно. Относительный показатель преломления при переходе из первой среды во вторую связан с абсолютными показателями преломления этих сред соотношением: $n_{21} = n_2/n_1$, и закон преломления $\sin \alpha / \sin \beta = n$ может быть записан в виде:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta,$$

где α и β — углы падения и преломления соответственно.

Среда, в которой *скорость света больше*, называется **оптически менее плотной**. Таким образом, при переходе из оптически менее плотной среды в оптически более плотную $n > 1$, т. е. угол преломления меньше угла падения, и наоборот.

Абсолютный показатель преломления зависит от природы и строения вещества, его агрегатного состояния, температуры, давления, наличия в нем упругих напряжений. Показатель преломления данной среды зависит от длины волны света. Для большинства прозрачных жидкостей и твердых тел показатель преломления в видимой области в среднем равен 1,5.

Абсолютный показатель преломления воздуха для желтого света при нормальных условиях равен ~1,000292. Поэтому показатели преломления различных веществ рассматривают относительно воздуха.

3.6.5. Полное внутреннее отражение

Если пучок света переходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную (вакуум), то с увеличением угла падения α возрастает угол преломления β ($\beta > \alpha$) и интенсивность преломленного света. При некотором угле падения α_0 угол преломления достигает своего максимального значения $\beta_{\max} = 90^\circ$ (рис. 3.97). В соответствии с законом преломления света

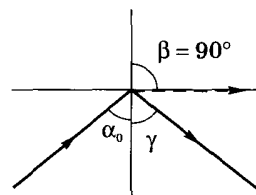


Рис. 3.97

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}; \quad \alpha_0 = \arcsin \left(\frac{1}{n} \right),$$

где n — абсолютный показатель преломления среды. При угле падения $\alpha > \alpha_0$ свет полностью отражается от границы раздела, как от зеркала — возникает явление *полного внутреннего отражения*.

Минимальный угол падения (α_0), начиная с которого возникает явление *полного внутреннего отражения*, называется *углом полного внутреннего отражения*, или *критическим углом*, или *предельным углом*.

Для общего случая, когда вторая среда — не вакуум, критический угол α_0 определяется из условия: $\sin \alpha_0 = n_{21} = n_2/n_1$, где n_{21} — относительный показатель преломления двух сред ($n_1 > n_2$; n_1, n_2 — абсолютные показатели преломления первой и второй сред соответственно).

3.6.6. Линзы. Фокусное расстояние и оптическая сила линзы

Линза (нем. *linse* произошло от лат. *lens* — чечевица) — это простейший оптический элемент, ограниченный с двух сторон сферическими поверхностями.

Обычно линзы изготавливаются из *оптического стекла* (стекло специального изготовления с минимальным количеством дефектов: пузырьков воздуха, включений посторонних микро-частиц).

Линзы бывают *выпуклые* и *вогнутые*. У выпуклых линз середина толще, чем края, у вогнутых — наоборот. В свою очередь, выпуклые линзы делятся на двояковыпуклые, плосковыпуклые и вогнуто-выпуклые (рис. 3.98, а). Вогнутые линзы делятся на двояковогнутые, плосковогнутые и выпукло-вогнутые (рис. 3.98, б). На рисунках 3.98 а, б рядом с изображениями линз (справа) даны их условные обозначения на оптических схемах.

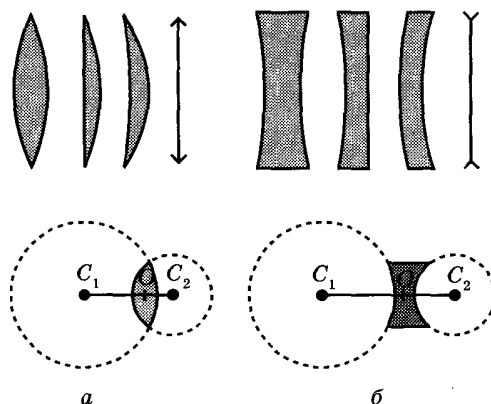


Рис. 3.98

Тонкая линза. Если толщина линзы пренебрежимо мала по сравнению с радиусами кривизны ее поверхностей (см. нижние части рис. 3.98, а, б) и расстоянием от предмета до линзы, ее называют *тонкой линзой*. Вершины сферических сегментов тонкой линзы расположены так близко, что их принимают за одну точку, называемую *центром линзы*, и обозначают буквой O . Луч света, проходящий через оптический центр линзы, практически не преломляется.

Прямая C_1C_2 , проходящая через центры сферических поверхностей O (рис. 3.98), ограничивающих линзу, называется *главной оптической осью линзы*. Любую другую прямую, проходящую через оптический центр, называют *побочной оптической осью*.

Фокусы линзы

Выпуклая (положительная, или собирающая) линза. Если на выпуклую линзу направить пучок света параллельно ее главной оптической оси, то после преломления в линзе он соберется в некоторой точке F на оси линзы, которая называется *главным фокусом линзы* (рис. 3.99, а). Поэ-

тому такие линзы называются *положительными*, или *собирающими*. Расстояние от центра линзы O до точки F называется *фокусным расстоянием* линзы. У линзы имеется два главных фокуса, с каждой стороны по одному.

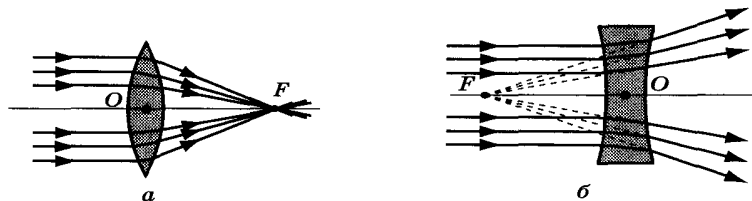


Рис. 3.99

Если на собирающую линзу направить пучок света, параллельный любой из ее побочных оптических осей, он соберется в точке, лежащей на плоскости, перпендикулярной главной оптической оси линзы и проходящей через ее главный фокус. Эта плоскость называется *фокальной плоскостью* линзы (рис. 3.100).

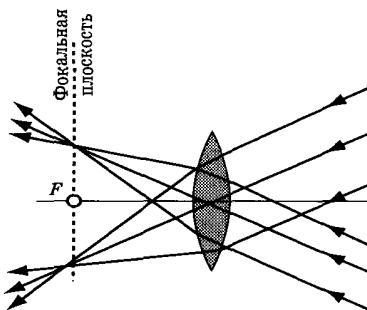


Рис. 3.100

Вогнутая (отрицательная, или рассеивающая) линза. Пучок света, направленный параллельно оптической оси вогнутой линзы, после преломления в ней расходится (рис. 3.99, б). Если эти расходящиеся лучи продолжить в обратную сторону, они соберутся на оптической оси линзы (со стороны падающего пучка) в точку, которая называется *мнимым фокусом* линзы. Глазу, расположенному с правой стороны, будет казаться, что пучок лучей исходит из точки F . Такая линза называется *отрицательной*, или *рассеивающей*. Как и в случае собирающей линзы, фокусное расстояние измеряется от оптического центра до фокуса.

Фокусное расстояние линзы зависит от кривизны поверхностей, ограничивающих линзу. Чем больше кривизна поверхности линзы, тем меньше фокусное расстояние.

Оптическая сила линзы

Оптической силой линзы называется физическая величина, обратная фокусному расстоянию:

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

Оптическая сила измеряется в диоптриях (дптр). В СИ единицей оптической силы является метр в минус первой степени (м^{-1}).

Фокусное расстояние собирающей линзы (и, соответственно, ее оптическую силу) условились считать положительной величиной, т. к. *собирающая линза обладает действительным фокусом*.

Фокусное расстояние рассеивающей линзы (и, соответственно, ее оптическая сила) — отрицательная величина, т. к. *у рассеивающей линзы мнимый фокус*.

3.6.7. Построение изображений в линзах

Любой предмет можно разбить на маленькие области, которые условно могут быть приняты за точки. Поэтому для построения изображения любого предмета необходимо знать, как строится изображение произвольной точки.

Собирающая линза

Для образования оптического изображения точки в линзе достаточно двух лучей. В качестве таковых выбираются любые два из трех лучей, ход которых известен: 1) луч, идущий параллельно оптической оси линзы — луч AC (рис. 3.101), который после преломления пересекает оптическую ось в фокусе линзы F ; 2) луч, проходящий через оптический центр линзы, который не меняет своего направления (на рис. 3.101 это луч AA_1); 3) луч, проходящий через фокус линзы, который после преломления пойдет параллельно главной оптической оси — луч AD . Точка A_1 пересечения этих трех лучей за линзой и будет изображением исходной точки A (рис. 3.101).

Для построения изображения точки S , находящейся на главной оптической оси (рис. 3.102), все три упомянутых выше луча не подходят, т. к. сливаются в один, идущий вдоль главной оптической оси, и потому в этом случае пользуются следующим приемом. Из точки S проводят произвольный луч SB до пересечения с линзой. Чтобы найти ход этого луча после преломления в линзе, проводят через центр линзы O луч, параллельный SB и являющийся побочной оптической осью линзы, до пересечения с фокальной плоскостью линзы в точке Q . Через эту точку пройдет преломленный луч BC . Таким образом, построен ход лучей, выходящих из точки S . После преломления эти лучи расходятся. Изображение S_1 будет мнимым, т. к. источник расположен между главным фокусом и линзой.

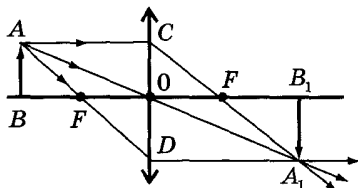


Рис. 3.101

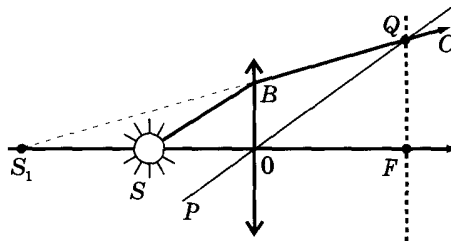


Рис. 3.102

Рассеивающая линза

Построение изображения в рассеивающей линзе показано на рис. 3.103. Поскольку лучи после преломления в рассеивающей линзе не пересекаются, то в фокусе ее собираются продолжения этих лучей. Получаемое изображение, следовательно, является мнимым и прямым. Изображение предмета расположено всегда между фокусом и оптическим центром линзы и поэтому оно всегда уменьшенное.

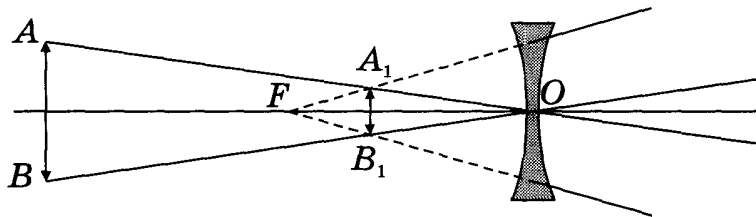


Рис. 3.103

Увеличение линзы

Линейным увеличением Γ линзы называется отношение линейного размера изображения H к линейному размеру предмета h : $\Gamma = \frac{H}{h}$.

Как следует из рис. 3.101, увеличение линзы равно отношению расстояния от изображения до линзы к расстоянию от линзы до предмета:

$$\Gamma = \frac{|d_1|}{|d|}.$$

Линзы являются основной частью фотоаппарата, проекционного аппарата, микроскопа и телескопа. В глазу есть своя линза — хрусталик.

3.6.8. Формула тонкой линзы

Используя законы геометрии, в частности, подобие треугольников (рис. 3.101), можно вывести формулу, связывающую расстояние d от предмета до линзы, расстояние d_1 от изображения до линзы и фокусное расстояние линзы f :

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d_1} = \frac{1}{f}, \quad (3.32)$$

или

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d_1} = D. \quad (3.33)$$

Уравнения (3.32) и (3.33) называют *формулой тонкой линзы*. Величины, входящие в формулу, могут быть как положительными, так и отрицательными. Фокусное расстояние f собирающей линзы считается положительным, а рассеивающей — отрицательным. Расстояние d от линзы до предмета положительно, если это действительная светящаяся точка, и отрицательно, если мнимая (т. е. если на линзу падает сходящийся пучок лучей, продолжение которых сходится в одной точке). Расстояние d_1 от изображения до линзы положительно, если изображение действительное, и отрицательно, если оно мнимое. Учитывая сказанное, перед каждым членом в формулах (3.32) и (3.33) ставят знак «+» или «-». Если знаки величин, входящих в формулы, неизвестны, ставят «+». Если в результате вычислений у какой-либо из величин получается знак «-», значит, эта величина — мнимая.

3.6.9. Интерференция света

Интерференция света — это пространственное перераспределение энергии светового излучения при наложении двух или нескольких световых волн.

Еще Ньютон в XVII в. исследовал некоторые явления интерференции, однако он не мог их объяснить с точки зрения своей корпускулярной теории (согласно которой свет представляет собой поток *корпускул* — частиц). Объяснение интерференции света как типично волнового явления было дано в начале XIX в. Юнгом и Френелем. Наиболее известна интерференция света, характеризующаяся образованием постоянной во времени интерференционной картины, представляющей собой регулярное чередование в пространстве областей повышенной и пониженной интенсивности света. Она получается в результате наложения *когерентных световых пучков*, т. е. в условиях постоянной или регулярно меняющейся разности фаз.

Когерентность

Когерентность (от лат. *cohaerens* — находящийся в связи) — согласованное протекание в пространстве и во времени нескольких случайных колебательных или волновых процессов, позволяющее получить при их сложении четкую интерференционную картину.

Первоначально понятие когерентности возникло в оптике, однако оно относится к волновым полям любой природы: электромагнитным волнам произвольного диапазона, упругим волнам, волнам в плазме.

Сказанное означает, что когерентными будут источники и созданные ими волны, если у них одинаковая частота и постоянная разность фаз колебаний.

В противном случае амплитуда результирующего колебания в данной точке с течением времени меняется, и устойчивой интерференционной картины не получится.

Условие когерентности световых волн. Световые волны двух независимых источников света некогерентны (за исключением лазеров). Атомы источников излучают свет независимо друг от друга отдельными обрывками (цугами) синусоидальных волн, имеющих длину около метра. Такие цуги волн от обоих источников налагаются друг на друга. В результате амплитуда колебаний в любой точке пространства хаотически меняется со временем в зависимости от того, как в данный момент времени цуги волн от различных источников сдвинуты друг относительно друга по фазе. Волны от различных источников некогерентны из-за того, что разность фаз волн не остается постоянной. Поэтому никакой устойчивой картины с распределением максимумов и минимумов освещенности не наблюдается. Для ее достижения приходится прибегать к специальным ухищрениям.

Идеальными когерентными волнами являются две плоские линейно-поляризованные монохроматические волны одной частоты, электрические векторы которых параллельны.

Монохроматическое излучение

Монохроматическое излучение — электромагнитное излучение одной определенной и строго постоянной частоты.

Происхождение термина «монохроматическое излучение» связано с тем, что различие в частоте световых волн воспринимается человеком как различие в цвете. Однако по своей природе *электромагнитные волны* видимого диапазона, лежащие в интервале длин волн 0,4–0,7 мкм, не отличаются от электромагнитных волн других диапазонов (инфракрасного, ультрафиолетового, рентгеновского и т. д.), хотя никакого ощущения цвета эти волны не дают.

Согласно теории электромагнитного излучения Максвелла, любое монохроматическое излучение — это гармоническое колебание, происходящее с неизменной амплитудой и частотой в течение бесконечно долгого времени. Плоская монохроматическая волна такого электромагнитного излучения представляет собой полностью когерентное поле, параметры которого неизменны в любой точке пространства и известен закон их изменения во времени.

Однако процессы излучения всегда ограничены во времени, поэтому понятие «монохроматическое излучение» является идеализацией. Реальное естественное излучение обычно является суммой определенного числа монохроматических волн со случайными амплитудами, частотами, фазами, поляризацией и направлением распространения. Чем уже интервал частот наблюдаемого излучения, тем оно монохроматичнее.

Так, излучение, соответствующее отдельным линиям спектров испускания свободных атомов (например, атомов разреженного газа), очень близко к монохроматическому излучению. Каждая из таких линий соответствует переходу атома из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией. Если бы энергии этих состояний имели строго фиксированное значение, атом излучал бы монохроматическое излучение вполне определенной частоты. Однако реально каждый атомный уровень имеет некоторую энергетическую ширину (интервал энергий, которые атом может занимать, находясь на данном энергетическом уровне; это следует из квантовой механики). Поэтому излучение каждой линии спектра соответствует некоторому интервалу частот $\Delta\nu$.

Так как идеальным монохроматическое излучение не может быть по своей природе, то монохроматическим считается излучение с узким спектральным интервалом, который можно приближенно считать одной частотой (или длиной волны).

Опыт Юнга

Естественные источники света некогерентны, поэтому от них невозможно наблюдать интерференционную картину. Однако если световой поток от естественного источника разделить на два, а затем свести вместе, то можно наблюдать устойчивую интерференционную картину. Впервые это удалось осуществить английскому ученому Томасу Юнгу (рис. 3.104).

Солнечный свет падал на экран узкой щели. Световая волна, прошедшая через эту щель, падала на экран с двумя щелями такой же ширины, находящимися на расстоянии d порядка нескольких микрон (рис. 3.104, а). В результате деления фронта волны световые волны, идущие от щелей, были когерентными и создавали на экране устойчивую интерференционную картину. Ход лучей изображен на рис. 3.104, б. При условии, что $d \ll R$ и поэтому лучи S_1 , S_2 практически параллельны, а угол α мал и поэтому $\sin \alpha \approx \tan \alpha$, из рассмотрения хода лучей можно получить условия интерференционных максимумов и минимумов на экране:

$$\Delta_{\max} = dy_m/R = m\lambda, \quad \Delta_{\min} = (2m + 1)\lambda/2, \quad (3.34)$$

где $m = 0, \pm 1; \pm 2; \dots$; y_m — координата точки на экране, Δ — оптическая разность хода.

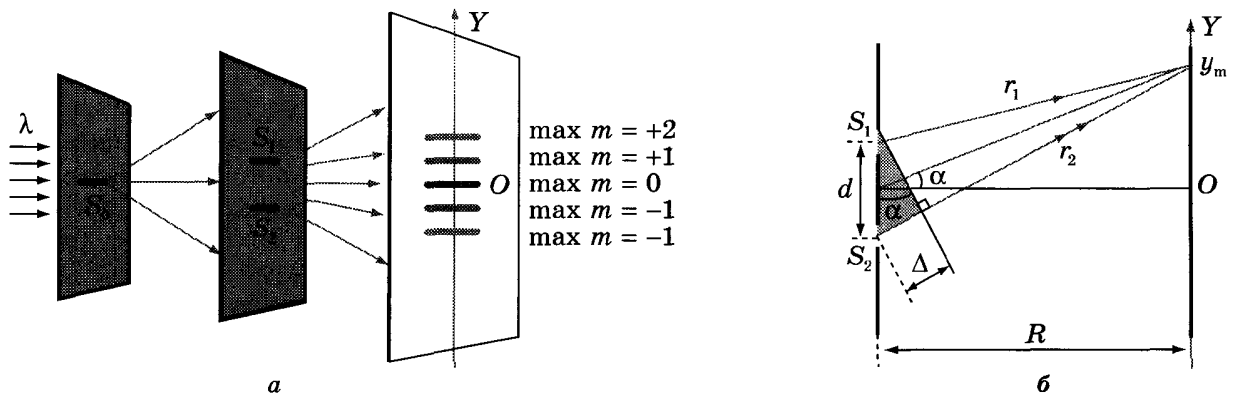


Рис. 3.104

В свою очередь Δ равно геометрической разности пути, умноженной на показатель преломления n :

$$\Delta = n(y_m S_1 - y_m S_2).$$

В данном случае $n \approx 1$ (воздух). Однако n следует учитывать во всех случаях, когда интерферирующие лучи (или один из них) распространяются в средах с показателем преломления, отличным от единицы. Кроме того, к оптической разности хода Δ следует добавлять $\lambda/2$ в случае отражения света от оптически более плотной среды (среды с большим показателем преломления), например при рассмотрении интерференции на тонких пленках.

Поскольку солнечный свет содержит электромагнитные волны разной длины (соответственно, разного цвета), то интерференционная картина представляла собой чередующиеся полосы, окрашенные во все цвета радуги. Каждому цвету (каждой длине волны монохроматического света)

соответствует своя разность хода. Юнг впервые измерил длины волн в разных областях видимого света, рассчитав их по формуле:

$$\lambda = dy_m / (Rm), \quad (3.35)$$

где $m = 0, \pm 1; \pm 2; \dots$

Совпадение нулевых максимумов для различных длин волн означает, что в центре экрана белая полоска. Для остальных, как видно из (3.32), чем больше длина волны, тем дальше отстоит m -ый максимум от центра.

3.6.10. Дифракция света

Дифракция света — в узком, но наиболее употребительном смысле слова — огибание лучами света границы непрозрачных тел (экранов); проникновение света в область геометрической тени.

В широком смысле дифракция света — проявление волновых свойств света в предельных условиях перехода от волновой оптики к геометрической. Примерами последней являются рассеяние света капельками тумана, формирование изображения оптическими системами (например, микроскопом) и др.

Сложность наблюдения дифракционных явлений в оптике состоит в том, что препятствия, на которых наблюдается дифракция, должны быть очень малы — сравнимы с длиной волны света.

Опыт Юнга

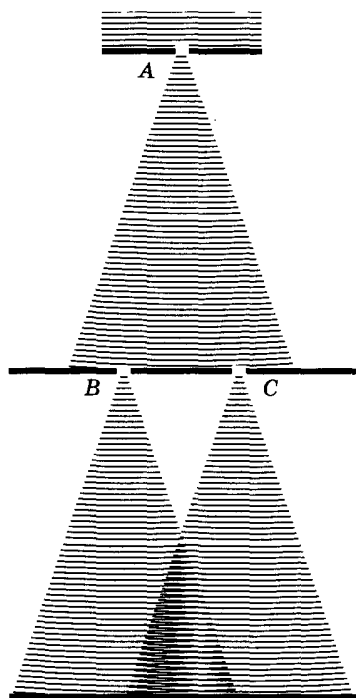


Рис. 3.105

Т. Юнг, открывший интерференцию света, в 1802 г. поставил классический опыт по дифракции (рис. 3.105). В непрозрачной ширме он проколол булавкой два маленьких отверстия B и C на небольшом расстоянии друг от друга. Эти отверстия освещались узким световым пучком, прошедшим, в свою очередь, через малое отверстие A в другой ширме. Именно эта деталь решила успех опыта — возникавшая в соответствии с принципом Гюйгенса сферическая волна от отверстия A возбуждала в отверстиях B и C *когерентные волны*. Вследствие дифракции из отверстий B и C выходили два световых конуса, которые частично перекрывались. В местах перекрытия эти когерентные волны интерферировали, создавая на экране систему чередующихся светлых и темных полос.

Исследование дифракции получило свое завершение в работах О. Френеля. Ученый не только более детально исследовал различные случаи дифракции на опыте, но и построил количественную теорию дифракции, позволяющую в принципе рассчитать дифракционную картину от любых препятствий. Он же впервые объяснил прямолинейное распространение света на основе волновой теории.

Одновременно Френель количественно рассмотрел дифракцию на разного рода препятствиях.

Дифракционные картины от различных препятствий представлены на рис. 3.106 *а* — от тонкой проволоки, *б* — от круглого отверстия, *в* — от круглого экрана. Вместо тени от проволоки видны темные и светлые полосы; в центре дифракционной картины от отверстия появляется темное пятно, окруженное светлыми кольцами

(изменяя диаметр отверстия, можно в центре картины получить и светлое пятно, окруженное темными и светлыми кольцами); в центре тени, образованной круглым экраном, видно светлое пятнышко, а сама тень окружена темными концентрическими кольцами.

Светлое пятно в центре геометрической тени (рис. 3.106, *в* — дифракция от круглого экрана) получило название *пятна Пуассона* по фамилии ученого, который при рассмотрении мемуаров Френеля в Парижской академии наук в 1818 г. обратил внимание на то, что из теории Френеля вытекает необходимость появления такого пятна, что противоречит здравому смыслу. Однако Араго произвел соответствующий опыт и показал, что выводы Пуассона верны и, следовательно, лишь подтверждают теорию Френеля.

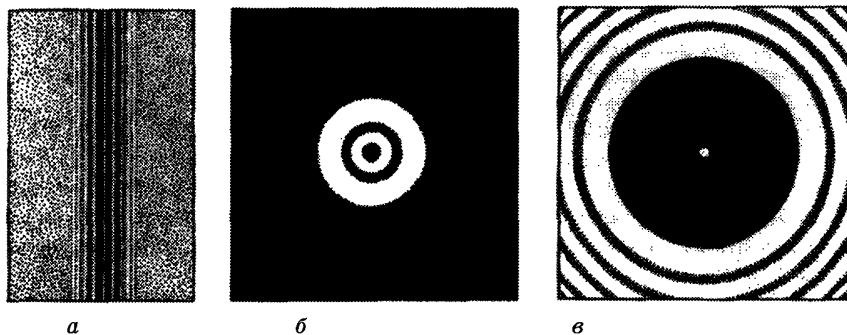


Рис. 3.106

Следует отметить, что, поскольку из-за малости световой волны угол отклонения света от направления прямолинейного распространения очень невелик, то для получения дифракционной картины следует либо использовать очень маленькие препятствия, либо же располагать экран далеко от препятствий.

3.6.11. Дифракционная решетка

Дифракционная решетка — оптический элемент, представляющий собой совокупность большого числа регулярно расположенных штрихов (канавок, щелей, выступов), нанесенных тем или иным способом на плоскую или вогнутую оптическую поверхность.

Дифракционная решетка (рис. 3.107) используется в спектральных приборах в качестве диспергирующей системы для пространственного разложения электромагнитного излучения в спектр. Фронт световой волны, падающий на дифракционную решетку, разбивается ее штрихами на отдельные когерентные пучки, которые, претерпев дифракцию на штрихах, интерферируют, образуя результирующее пространственное распределение интенсивности света — *спектр излучения*.

Рассмотрим элементарную теорию дифракционной решетки. Если ширина прозрачных щелей равна a , а ширина непрозрачных промежутков — b , то величину $a + b$ называют *периодом решетки*.

Пусть на решетку (рис. 3.108) падает плоская монохроматическая волна длиной λ . Вторичные источники в щелях создают световые волны, распространяющиеся по всем направлениям. Найдем условие, при котором волны, распространяющиеся от щелей в направлении, определяемом некоторым углом φ , усиливают друг друга. Разность хода между волнами от краев соседних щелей равна длине отрезка AC . Если на этом отрезке укладывается целое число длин волн, то волны от

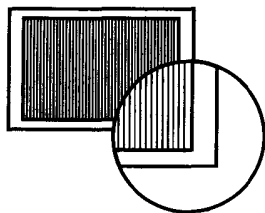


Рис. 3.107

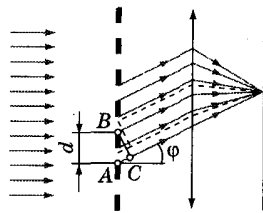


Рис. 3.108

всех щелей, складываясь, будут усиливать друг друга. Из треугольника ABC находим длину катета AC : $AC = AB \sin \varphi = d \sin \varphi$. Максимумы будут находиться под углом φ , определяемым условием:

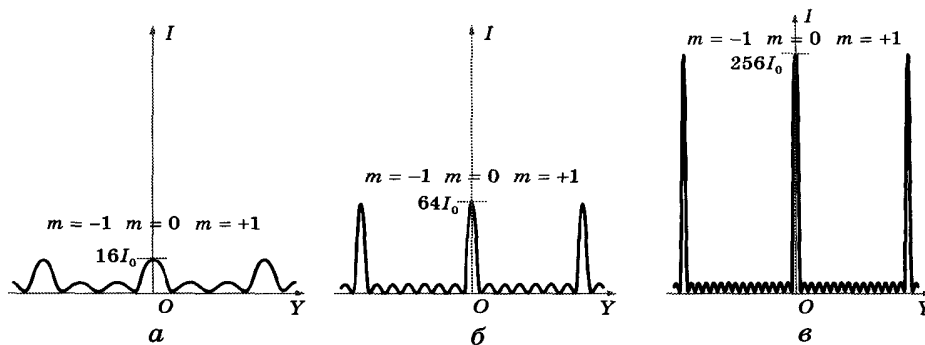
$$d \sin \varphi = m\lambda, \quad (3.36)$$

где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

При выполнении условия (3.36) усиливаются волны, идущие не только от одного из краев щелей, а от всех точек щелей, т. к. каждой точке в первой щели соответствует точка, находящаяся на расстоянии d во второй щели, поэтому разность хода вторичных волн, испускаемых этими точками, равна $m\lambda$, и они усиливаются.

Для наблюдения интерференционной картины дифрагировавших лучей за решеткой помещают линзу, а в ее фокальной плоскости — экран. На экране появляется изображение щелей — система цветных полос, каждая из которых соответствует спектру m -го порядка. В центре экрана — белая полоса, это спектр нулевого порядка ($m = 0$), для которого максимумы всех длин волн не зависят от угла φ . Чем больше длина волны, тем дальше располагается максимум интенсивности от центрального пятна.

Между максимумами расположены минимумы интенсивности. Чем больше число щелей, тем более резко очерчены максимумы и тем более широкими минимумами они разделены (рис. 3.108). При использовании решеток в различных областях спектра и при небольших порядках спектра m , число штрихов на 1 мм составляет: в ультрафиолетовой области — $3600 \div 1200$ штрих/мм, в видимой области — $1200 \div 600$ штрих/мм, в инфракрасной области — $300 \div 1$, штрих/мм. Для рентгеновского излучения ($\lambda < 10 \text{ \AA}$) дифракционными решетками служат монокристаллы, атомы и молекулы которых, расположенные в узлах кристаллической решетки образуют трехмерную структуру. Для радиоволн используют проволочные решетки, период которых соизмерим с длиной волны ($\lambda > 2 \text{ мм}$).



Интенсивность света за дифракционной решеткой:
а) четыре щели; б) восемь щелей; в) шестнадцать щелей

Рис. 3.108

3.6.12. Дисперсия света

Световые волны различных частот воспринимаются человеком как различные цвета (см. табл. 3.2).

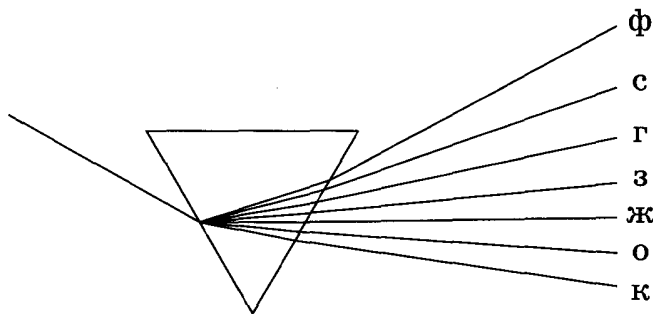
Таблица 3.2

Соответствие диапазонов длин волн и частот света определенным цветам

Цвет	Длина волны λ , нм	Частота $\nu \cdot 10^{-12}$ Гц
Красный	780–620	400–484
Оранжевый	620–590	484–508
Желтый	590–560	508–536
Зеленый	560–500	536–600
Голубой	500–480	600–625
Синий	480–450	625–667
Фиолетовый	450–400	667–780

Дисперсией (от лат. *dispergo* — рассеивать, развеивать, разгонять) света называется зависимость показателя преломления света в веществе от частоты колебаний или длины волны.

Дисперсия света впервые была экспериментально обнаружена Ньютоном в 1666 г. при разложении узкого пучка солнечного света стеклянной призмой на семь цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый (рис. 3.109). Из этого опыта Ньютон сделал вывод, что «световые пучки, отличающиеся по цвету, отличаются по степени преломления». Наиболее сильно преломляются фиолетовые лучи, меньше всех — красные. Зависимость показателя преломления света от его цвета Ньютон назвал *дисперсией*.



к) красный; о) оранжевый; ж) желтый; з) зеленый; г) голубой; с) синий; ф) фиолетовый

Рис. 3.109

Поскольку показатель преломления n зависит от скорости v света в веществе: $n = c/v$, а цвет видимого излучения определяется частотой колебаний или длиной волны, которые связаны известным соотношением со скоростью $\lambda = v/\nu$, то можно сказать, что *дисперсия — это зависимость скорости света в веществе от частоты волны*.

Попытка дальнейшего разложения одного из цветов с помощью призмы результатов не дает. Наоборот, собрать разложенный в спектр белый свет другой призмой снова в белый возможно.

Сложный состав белого света позволяет объяснить окраску предметов: она связана с преимущественным отражением света данной длины волны (данного цвета). Остальные цвета этим предметом поглощаются.

Часть 1

При выполнении заданий уровня А нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

A1 1 2 3 4

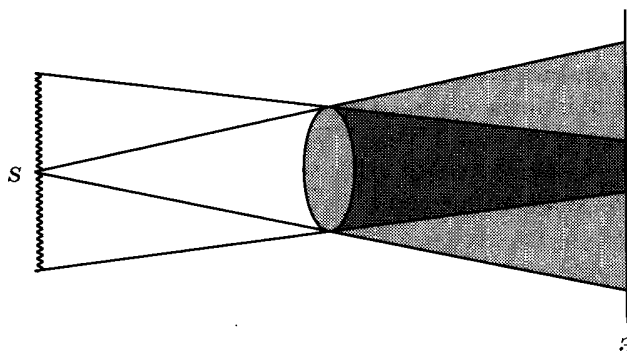
A1. Изображение, которое мы видим, разглядывая себя в обычном (плоском) зеркале, является

- 1) прямым, действительным, увеличенным
- 2) обратным (перевернутым), мнимым, уменьшенным
- 3) прямым, увеличенным, мнимым
- 4) прямым, мнимым, с увеличением, равным единице

A2 1 2 3 4

A2. Образование полутени, изображенной на рисунке, является следствием

- 1) прямолинейности распространения света
- 2) дифракции света
- 3) протяженности источника света
- 4) преломления света



A3 1 2 3 4

A3. Закон прямолинейного распространения света справедлив

- 1) всегда, во всех средах
- 2) в оптически однородной среде (т. е. в среде, в которой показатель преломления одинаков во всех точках)
- 3) в среде с заданным изменением показателя преломления
- 4) в оптически неоднородной среде

A4 1 2 3 4

A4. Основной постулат волновой теории — принцип Гюйгенса–Френеля — объясняет механизм распространения волн, в частности, механизм прямолинейного распространения света, основываясь на

- 1) идее об интерференции волн от вторичных источников, расположенных на волновой поверхности источника света
- 2) идее о дифракции вторичных волн
- 3) предположении о преломлении света на границе, представляющей собой волновой фронт
- 4) идее о рассеянии света на волновом фронте

A5 1 2 3 4

A5. Часто наблюдаемые в лужах воды цветные пятна тонких пленок (как правило, разлитого машинного масла, керосина, бензина) являются результатом:

- 1) дифракции света на тонких пленках
- 2) интерференции света на тонких пленках
- 3) преломления света на тонких пленках
- 4) рассеяния света на тонких пленках

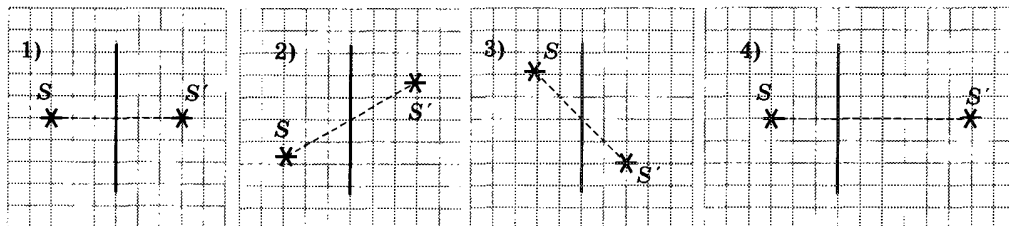
A6. Глядя на Солнце через ресницы полузакрытых век, можно наблюдать радужную картинку. Она является результатом

- 1) дифракции света
- 2) интерференции света
- 3) преломления света
- 4) рассеяния света

1 2 3 4 A6

A7. На каком из рисунков изображение точки в плоском зеркале построено правильно?

1 2 3 4 A7

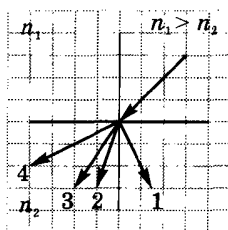


Часть 2

Ответом к заданиям В1—В4 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

В1. Укажите правильный номер, определяющий путь луча, преломленного на границе двух сред (см. рисунок).

B1



В2. Какова скорость распространения света в стекле с показателем преломления $n = 1,7$?

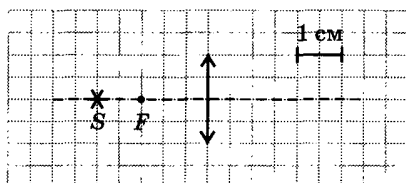
B2

В3. Определите период дифракционной решетки, если максимум первого порядка для длины волны 400 нм наблюдается под углом 30° . Ответ дайте в мкм.

B3

В4. Постройте изображение точки, лежащей на главной оптической оси собирающей линзы, определите расстояние от оси линзы до изображения. Расстояние выразите в см.

B4



Тренировочный тест к разделу 3 «Электродинамика»

Часть 1

При выполнении заданий этой части нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

A1. 1 2 3 4

- A1. На дифракционную решетку, имеющую 500 штрихов на 1 мм, падает нормально монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 500$ нм. Количество максимумов, которое можно наблюдать с помощью такой решетки, составляет
- 1) 15 2) 11 3) 9 4) 18

A2. 1 2 3 4

- A2. На пути одного из лучей света с $\lambda = 600$ нм в опыте Юнга установили трубку длиной 3 см, наполненную газом. При этом интерференционная картина сместилась на 40 полос. Показатель преломления газа равен
- 1) 1,001 2) 1,0001 3) 1,0008 4) 1,08

A3. 1 2 3 4

- A3. В опыте Юнга фиолетовый светофильтр, пропускающий $\lambda = 400$ нм, заменили на красный, пропускающий $\lambda = 650$ нм. Как при этом изменится интерференционная картина на экране?
- 1) ширина полос увеличится в 1,6 раза, и полосы сместятся соответственно вверх и вниз по экрану
- 2) ширина полос уменьшится в 2 раза, и полосы сместятся к центральной полосе
- 3) картина не изменится
- 4) по краям ширина полос увеличится в 3 раза, в середине не изменится

A4. 1 2 3 4

- A4. Скорость движения электрона по круговой орбите радиусом $5,3 \cdot 10^{-11}$ м вокруг ядра атома водорода составляет
- 1) $5 \cdot 10^9$ м/с 2) $2,9 \cdot 10^6$ м/с 3) $8 \cdot 10^7$ м/с 4) $2,5 \cdot 10^5$ м/с

A5. 1 2 3 4

- A5. Сколько витков имеет катушка с индуктивностью $L = 1$ мГн, если при силе тока в 1 А магнитный поток через катушку $\Phi = 2 \cdot 10^{-6}$ Вб
- 1) 500 2) 300 3) 150 4) 250

A6. 1 2 3 4

- A6. Каково расстояние между двумя электронами, если один электрон придает второму ускорение $6,3 \cdot 10^7$ м/с²?
- 1) 5 мм 2) 3 мм 3) 2 мм 4) 7 мм

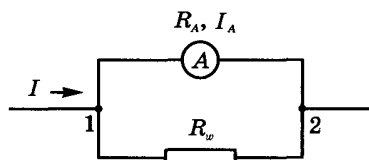
A7. 1 2 3 4

- A7. Электрон в кинескопе телевизора под действием разности потенциалов $U = 5 \cdot 10^3$ В (при начальной нулевой скорости) приобретает скорость, равную
- 1) $5 \cdot 10^7$ м/с 2) $3,1 \cdot 10^7$ м/с 3) $1,4 \cdot 10^8$ м/с 4) $4,1 \cdot 10^7$ м/с

A8. 1 2 3 4

- A8. Два конденсатора с емкостями $C_1 = 2C_2$ зарядили до напряжения $U_1 = 200$ В и $U_2 = 50$ В соответственно и соединили параллельно. После этого разность потенциалов между обкладками конденсаторов будет равна
- 1) 450 В 2) 100 В 3) 150 В 4) 285 В

- A9. К амперметру с сопротивлением $R_A = 0,27$ Ом подключен параллельно шунт с сопротивлением $R_{\text{ш}} = 0,09$ Ом. Амперметр показывает силу тока $I_A = 2$ А. Следовательно, сила тока I в цепи, изображенной на рисунке, равна



- 1) 3 А 2) 8 А 3) 15 А 4) 20 А
- A10. На железное кольцо в один слой намотано 180 витков изолированного провода. Чему равна энергия магнитного поля, если при токе в 2 А магнитный поток в железе равен $0,6 \cdot 10^{-3}$ Вб?
- 1) 5 Дж 2) 0,11 Дж 3) 10 Дж 4) 2,5 Дж
- A11. В вершинах квадрата со стороной 1 м находятся заряды одинаковой величины. В случае, когда два соседних заряда положительны, а два других отрицательны, напряженность поля в центре квадрата равна 36 В/м. Следовательно, величина зарядов составляет
- 1) 0,7 нКл 2) 10 нКл 3) 0,1 нКл 4) 15 нКл
- A12. Какова взаимная ориентация векторов $\vec{E}$, $\vec{H}$ и $\vec{v}$, в электромагнитной волне и какова разность фаз $\Delta\phi$ между колебаниями $\vec{E}$ и $\vec{H}$?
- 1) $\vec{E} \perp \vec{H} \perp \vec{v}$, $\Delta\phi = 0$
 2) $\vec{E} \parallel \vec{H} \perp \vec{v}$, $\Delta\phi = \pi$
 3) $\vec{E} \parallel \vec{H} \parallel \vec{v}$, $\Delta\phi = \pi/2$
 4) $\vec{E} \perp \vec{H} \parallel \vec{v}$, $\Delta\phi = \pi/2$
- A13. Магнитный поток через круглую площадку радиуса 5 см, нормаль к которой составляет 15° к вектору индукции магнитного поля $\vec{B}$ при $B = 1$ Тл, составляет
- 1) 0,5 Вб
 2) 0,0075 Вб
 3) 0,001 Вб
 4) 0,025 Вб
- A14. Витки обмоток электрических генераторов могут деформироваться и даже разорваться, если по ним проходит ток большой силы (ток короткого замыкания). Это явление объясняется
- 1) выделением тепла при прохождении тока
 2) действием сил Ампера
 3) электромагнитной индукцией
 4) действием сил Лоренца
- A15. В магнитном поле с индукцией 1,2 Тл перпендикулярно силовым линиям перемещается со скоростью 15 м/с проводник длиной 6 м. Возникающая при этом ЭДС в проводнике равна
- 1) 108 В 2) 51 В 3) 300 В 4) 207 В

1 2 3 4 A9

1 2 3 4 A10

1 2 3 4 A11

1 2 3 4 A12

1 2 3 4 A13

1 2 3 4 A14

1 2 3 4 A15

A16 1 2 3 4

A16. Две электролитические ванны с растворами азотнокислого серебра и медного купороса соединены последовательно. Какое количество меди выделится за время, в течение которого выделилось 0,36 г серебра?

- 1) 0,5 г 2) 0,106 г 3) 0,208 г 4) 11 г

A17 1 2 3 4

A17. Голубой цвет неба объясняется: А) частотной зависимостью интенсивности рассеянного света ($I_p \sim \omega^4$); Б) избирательным пропусканием атмосферы в видимой области спектра. Какое из утверждений верно?

- 1) только А 2) только Б 3) и А, и Б 4) ни А, ни Б

A18 1 2 3 4

A18. Отраженный от объекта сигнал источника (считать его точечным) электромагнитных волн радиолокационной станции был зарегистрирован через 0,2 мс после его отправки. Следовательно, расстояние до объекта составляет

- 1) 500 км 2) 30 км 3) 150 км 4) 35 км

A19 1 2 3 4

A19. При увеличении дальности радиосвязи с космическими кораблями в 2 раза мощность радиопередатчика необходимо увеличить в

- 1) 2 раза 2) 1,5 раза 3) 4 раза 4) 8 раз

A20 1 2 3 4

A20. Какова должна быть емкость конденсатора, чтобы с катушкой, имеющей коэффициент самоиндукции 25 мГн, обеспечить настройку в резонанс на длину волны 100 м?

- 1) 830 мкФ 2) 700 пФ 3) 250 пФ 4) 110 пФ

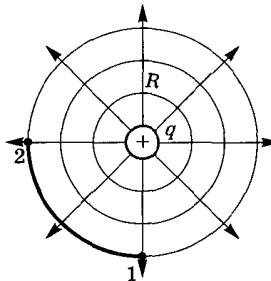
A21 1 2 3 4

A21. Число электромагнитных колебаний с длиной волны $\lambda = 375$ м, происходящих в течение одного периода звука с частотой $\nu = 5000$ Гц, составляет

- 1) 1600 2) 100 3) 500 4) 1000

A22 1 2 3 4

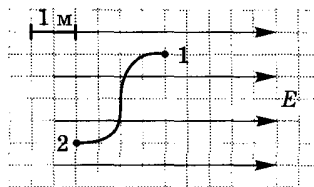
A22. Работа поля точечного заряда q по перемещению заряда q_1 из точки 1 в точку 2 по дуге окружности радиусом R (см. рисунок) равна



- 1) $\frac{2\pi k q q_1}{R}$ 2) $\frac{\pi k q q_1}{R}$ 3) 0 4) $\frac{\pi k q q_1}{2R}$

A23 1 2 3 4

A23. Для перемещения заряда +1 Кл в однородном электрическом поле напряженностью 3 В/м из точки 1 в точку 2 (см. рисунок) необходимо совершить работу



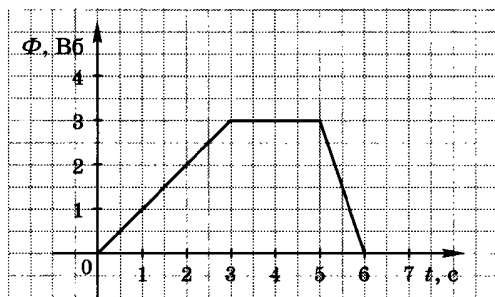
- 1) 3 Дж 2) -6 Дж 3) 12 Дж 4) -5 Дж

A24 1 2 3 4

A24. Увеличение дальности радиолокации в 2 раза требует увеличения мощности передатчика

- 1) в 2 раза 2) в 8 раз 3) в 16 раз 4) в 4 раза

- A25.** Из графика зависимости магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур проводника с сопротивлением 1 Ом, от времени (см. рисунок), следует, что силы тока в контуре через 2 секунды I_1 , через 4 секунды I_2 и через 6 секунд I_3 равны соответственно

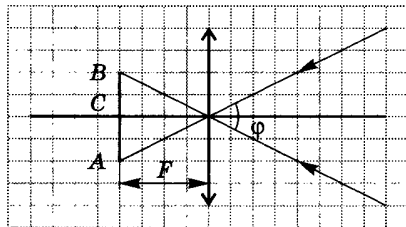


- 1) $I_1 = 1 \text{ A}$, $I_2 = 0$, $I_3 = -3 \text{ A}$ 3) $I_1 = 2 \text{ A}$, $I_2 = 0,75 \text{ A}$, $I_3 = -0,5 \text{ A}$
 2) $I_1 = 0,5 \text{ A}$, $I_2 = 1 \text{ A}$, $I_3 = 0$ 4) $I_1 = 1,5 \text{ A}$, $I_2 = 3 \text{ A}$, $I_3 = 0$

Часть 2

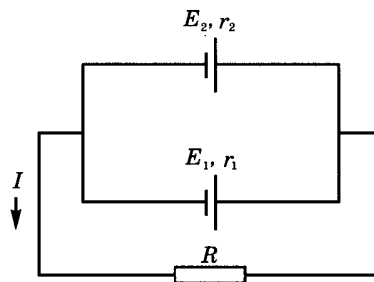
Ответом к заданиям В1—В5 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

- В1.** Угловой диаметр солнечного диска при наблюдении с Земли равен $\varphi = 32'$. Чему равен диаметр изображения Солнца, даваемого собирающей линзой с фокусным расстоянием $F = 0,5 \text{ м}$ (см. рисунок). Ответ дайте в мм.



- В2.** Четыре положительных точечных заряда по $7 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ каждый расположены в вершинах квадрата. Суммарная сила, действующая со стороны трех зарядов на четвертый, равна $2 \cdot 10^2 \text{ Н}$. Найдите длину квадрата. Ответ дайте в мм.
- В3.** В электрочайник с неисправной системой автоматического отключения с сопротивлением спирали 16 Ом налили 600 см^3 воды при температуре 10°C , включили и забыли выключить. Через сколько времени после включения вся вода в чайнике выкипит, если напряжение в сети 220 В, а КПД чайника 60%? Время выразите в минутах.

- В4.** Определите силу тока во всей цепи, изображенной на рисунке, если ЭДС элементов одинаковы и равны 1 В, их внутренние сопротивления $r_1 = 1 \text{ Ом}$, $r_2 = 1,5 \text{ Ом}$ и $R = 1,4 \text{ Ом}$.



В задании В5 на установление соответствия требуется указать последовательность цифр, соответствующих правильному ответу.

В5. Установите соответствие между названием закона и его математическим выражением.

А) Закон электромагнитной индукции

$$1) I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

$$4) I = \frac{U}{R}$$

Б) Закон Ома для участка цепи.

$$2) E_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

$$5) F = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r^2}$$

В) Закон Кулона

Г) Закон преломления света

$$3) Q = I^2 R t$$

$$6) \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$$

Д) Закон Джоуля-Ленца

Е) Закон Ома для полной цепи

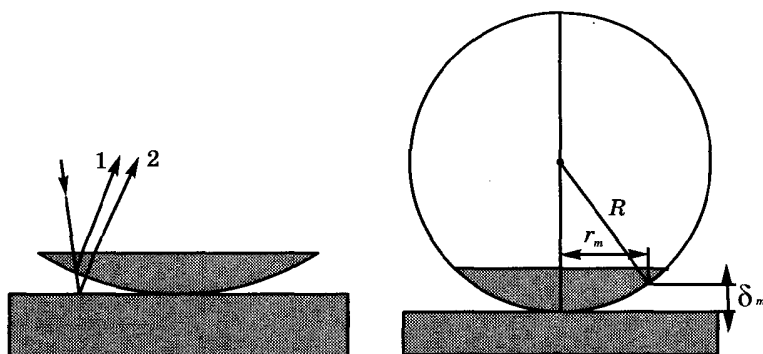
Впишите во вторую строку таблицы номера правильных ответов.

А	Б	В	Г	Д	Е

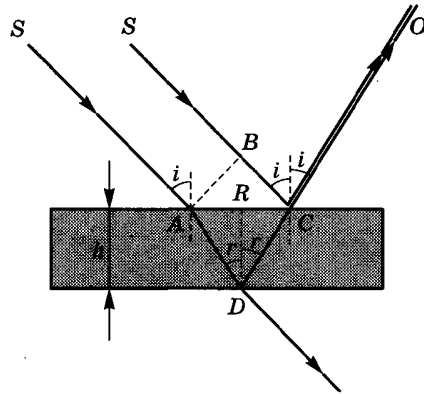
Часть 3

Полное правильное решение задач С1–С5 должно включать законы и формулы, применение которых необходимо и достаточно для решения задачи, а также математические преобразования, расчеты с численным ответом и, при необходимости, рисунок, поясняющий решение.

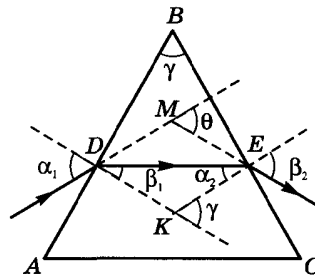
С1. В устройстве для наблюдения колец Ньютона (см. рисунок) падающий вертикально луч при отражении от нижней поверхности плосковыпуклой линзы и от верхней поверхности плоской пластинки разделяется на два когерентных луча 1 и 2 соответственно. Поскольку разность хода между этими лучами одинакова вдоль concentрических окружностей с центром в точке соприкосновения пластины с линзой, то интерференционная картина представляет собой кольца (радужные в белом свете и чередующиеся темные и светлые в монохроматическом свете). В месте соприкосновения пластин наблюдается темное пятно. Считая, что монохроматический свет падает нормально к поверхности пластины, рассчитайте радиус m -го темного кольца Ньютона: $r_m = f(m, \lambda, R)$.



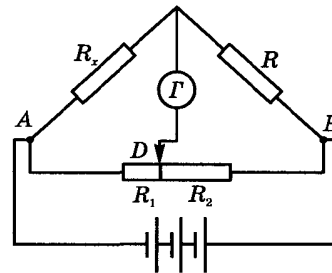
- С2. Выведите условия максимума и минимума интерференции при отражении плоской монохроматической световой волны от тонких пленок, выразив оптическую разность хода Δ когерентных лучей через n, r, h (см. рисунок). Считая, что параллельный пучок света с $\lambda = 560$ нм падает на пленку с показателем преломления $n = 1,6$ нормально, определите толщину пленки, при которой наблюдается максимум интерференции первого порядка.



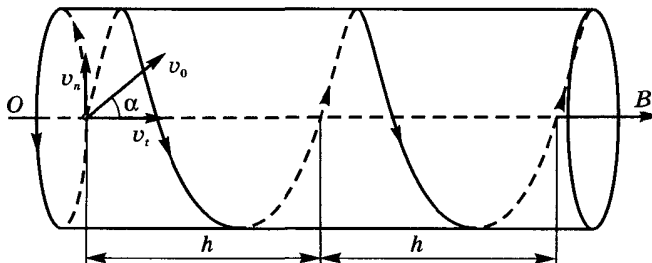
- С3. На боковую грань равнобедренной призмы падает луч, который после преломления идет параллельно основанию призмы. Найдите связь между преломляющим углом призмы γ , показателем преломления n и углом отклонения луча θ (см. рисунок). (Для описанного выше хода лучей в призме угол отклонения θ является углом наименьшего отклонения).



- С4. В схеме мостика Уитсона, предназначенного для точного определения величины неизвестного сопротивления R_x , изображенной на рисунке, сопротивления R_1 и R_2 подобраны так, чтобы ток через гальванометр был равен нулю. Выразите R_x через R, R_1 и R_2 и определите его величину при значениях $R = 50$ Ом, $R_1 = 10$ Ом и $R_2 = 40$ Ом.



- С5. Частица, заряд которой равен q , влетает в однородное магнитное поле с индукцией B под углом α к магнитным силовым линиям, имея скорость v_0 (см. рисунок). Определите период обращения и шаг спирали h , вдоль которой движется частица.





Основы специальной теории относительности. Квантовая физика

4.1. Постулаты СТО

Теория относительности — теория, описывающая универсальные пространственно-временные свойства физических процессов.

Альберт Эйнштейн создал новую теорию — теорию относительности, или релятивистскую механику (от лат. *relativus* — относительный).

Необходимость создания теории относительности была вызвана тем, что возникли сомнения в справедливости принципа относительности Галилея применительно к электромагнитным явлениям. Так, в опыте А. Майкельсона и Э. Морли (1881 г.), в котором сравнивали скорость распространения света вдоль направления орбитальной скорости Земли вокруг Солнца и перпендикулярно этому направлению, было установлено, что движение Земли вокруг Солнца не влияет на скорость распространения света. Это противоречит закону сложения скоростей Галилея.

Согласовать принцип относительности Галилея с электродинамикой Максвелла оказалось возможным, только отказавшись от классических представлений о пространстве и времени, согласно которым расстояния и течение времени не зависят от системы отсчета.

Главный вклад Эйнштейна в познание законов природы состоял в радикальном изменении основополагающих представлений о пространстве, времени, веществе и движении.

Специальная теория относительности (СТО) рассматривает взаимосвязь физических процессов, происходящих только в инерциальных системах отсчета, т. е. в системах отсчета, движущихся друг относительно друга равномерно и прямолинейно. СТО предполагает отсутствие гравитационных полей.

Общая теория относительности описывает взаимосвязь физических процессов, происходящих в ускоренно движущихся друг относительно друга (неинерциальных) системах отсчета. Общая теория относительности является релятивистской теорией тяготения (гравитации). Согласно этой теории физическое пространство не является простымместилищем объектов. Гравитационное поле физических тел приводит к неевклидовости пространства—времени.

Специальная теория относительности Эйнштейна основывается на двух постулатах.

1. Принцип относительности — главный постулат СТО. Он гласит: все процессы природы протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета.

2. Второй постулат гласит: скорость света в вакууме одинакова для всех инерциальных систем отсчета. Она не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приемника светового сигнала.

4.2. Следствия постулатов СТО

Теория относительности представляет собой новое учение о пространстве и времени, пришедшее на смену старым классическим представлениям. Согласно теории относительности, одновременность событий, расстояния и промежутки времени являются не абсолютными, а относительными. Они зависят от системы отсчета.

Причиной несостоятельности классических представлений о пространстве и времени является неправильное предположение о возможности мгновенной передачи взаимодействий и сигналов из одной точки пространства в другую. Существование предельной конечной скорости передачи взаимодействий вызывает необходимость глубокого изменения обычных представлений о пространстве и времени, основанных на повседневном опыте. Представление об абсолютном времени, которое течет в раз и навсегда заданном темпе, совершенно независимо от материи и ее движения, оказывается неправильным.

Основными следствиями, вытекающими из постулатов теории относительности, являются следующие.

Относительность расстояний, которая выражается формулой:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad (4.1)$$

где l_0 — длина тела в системе отсчета K , относительно которой тело покоится; l — длина тела в системе K_1 , относительно которой тело движется со скоростью $\vec{v}$. Как видно из формулы, $l < l_0$. Из нее следует, что наибольшей длиной обладает тело в той системе отсчета, относительно которой оно покоится. В этом состоит релятивистское сокращение размеров тела в движущихся системах отсчета.

Относительность промежутка времени выражается формулой:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (4.2)$$

где τ_0 — интервал времени между двумя событиями, происходящими в одной и той же точке инерциальной системы координат K , τ — интервал времени между теми же событиями в системе отсчета K_1 , движущейся относительно системы K со скоростью $\vec{v}$. Очевидно, что $\tau > \tau_0$.

Таким образом, длительность события оказывается наименьшей в неподвижной системе отсчета. При этом, чем больше относительная скорость движения двух систем, тем больше разница в длительности событий, измеренных в этих системах. Из формул (4.1) и (4.2) следует также, что скорость света — это предельная скорость тела при любом движении, поскольку при $v > c$ формулы теряют смысл.

Релятивистский закон сложения скоростей для частного случая движения тела со скоростью v_1 вдоль оси OX_1 системы отсчета K_1 , которая, в свою очередь, движется со скоростью v относительно системы отсчета K , причем так, что координатные оси OX и OX_1 совпадают, а координатные оси OY и OY_1 , OZ и OZ_1 остаются параллельными, имеет вид:

$$v_2 = \frac{v_1 + v}{1 + \frac{v_1 v}{c^2}}, \quad (4.3)$$

где v_2 — скорость движения тела относительно системы отсчета K .

Из этой формулы видно, что луч света, распространяющийся со скоростью $v_1 = c$ в движущейся системе координат, будет распространяться с той же скоростью c и в неподвижной системе координат.

4.3. Основной закон релятивистской динамики

Импульс тела в релятивистской динамике равен:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} , \quad (4.4)$$

Выражение $\frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m_p$ называется релятивистской массой и используется для сохранения привычного вида записи импульса $\vec{p} = m\vec{v}$.

Масса m (масса покоя) считается характеристикой тела (системы тел), не изменяющейся при переходе от одной системы отсчета к другой.

Основной же закон релятивистской динамики записывается в прежней форме:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F} .$$

4.4. Полная и кинетическая энергии частицы.

Энергия покоя

Эйнштейн установил формулу связи между энергией частицы, движущейся со скоростью v , и ее массой:

$$E = m_p c^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} . \quad (4.5)$$

Полная энергия тела или системы тел равна релятивистской массе, умноженной на квадрат скорости света.

Кинетическая энергия релятивистской частицы определяется выражением:

$$E_k = mc^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) .$$

Согласно формуле (4.5) тело обладает энергией и при скорости, равной нулю. Это энергия покоя:

$$E_0 = mc^2 . \quad (4.6)$$

Любое тело уже только благодаря факту своего существования обладает энергией, которая пропорциональна массе покоя m .

Уравнение (4.6) — это формула Эйнштейна, первая из двух великих формул физики (вторая — это формула Планка).

При превращениях элементарных частиц, обладающих массой покоя, в частицы, у которых $m = 0$, энергия покоя целиком превращается в кинетическую энергию вновь образовавшихся

частиц. Это является наиболее очевидным экспериментальным доказательством существования энергии покоя.

При скоростях движения, много меньших скорости света, справедливы классические представления о пространстве и времени и законы механики Ньютона. Это — проявление общего принципа соответствия физических теорий.

4.5. Основные уравнения релятивистской механики. Масса

В релятивистской механике полная энергия свободной частицы E равна сумме энергии покоя E_0 и кинетической энергии E_k : $E = E_0 + E_k$ (в отличие от классической механики, где $E = E_k + E_n$ — сумма кинетической и потенциальной энергии).

Основными уравнениями механики свободной релятивистской частицы являются:

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4;$$
$$\vec{p} = \frac{\vec{v} E}{c^2}.$$

Масса, входящая в первое из этих уравнений, та же, что и в уравнениях ньютоновской механики (масса покоя). Однако, в отличие от классической, в релятивистской механике, масса не является ни мерой инертности тела, ни источником гравитационного поля, ни мерой количества вещества. Масса системы не равна сумме масс составляющих ее частей, что очевидно доказывают примеры распада элементарных частиц с ненулевой массой покоя на фотоны. Массу в СТО можно рассматривать как меру энергии свободной частицы, а законы сохранения энергии и импульса в СТО имеют место.

Примеры заданий ЕГЭ по темам 4.1-4.5.
«Основы специальной теории относительности»

Часть 1

При выполнении заданий уровня А нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

A1 1 2 3 4

- A1. Специальная теория относительности рассматривает физические процессы, происходящие
- 1) в любых системах отсчета
 - 2) в гравитационном поле
 - 3) только в неинерциальных системах отсчета
 - 4) только в инерциальных системах отсчета и в отсутствие гравитационных полей

A2 1 2 3 4

- A2. Одним из выводов СТО является относительность расстояний, измеренных в двух системах отсчета, движущихся друг относительно друга с некоторой постоянной скоростью, причем
- 1) наибольшей длиной обладает тело в той системе отсчета, относительно которой оно покоится
 - 2) наибольшей длиной обладает тело в той системе отсчета, относительно которой оно движется
 - 3) длина тела не зависит от системы отсчета
 - 4) длина тела не зависит от скорости движения

A3 1 2 3 4

- A3. Следствием постулатов СТО является относительность одновременности, означающая, что
- 1) промежуток времени между двумя событиями, отсчитываемый в разных инерциальных системах отсчета, не зависит от относительной скорости движения систем координат
 - 2) длительность события оказывается наименьшей в неподвижной системе координат
 - 3) длительность события оказывается наибольшей в неподвижной системе отсчета
 - 4) длительность события обратно пропорциональна относительной скорости движения

A4 1 2 3 4

- A4. Формула Эйнштейна (первая из великих формул физики) устанавливает связь между
- 1) кинетической энергией тела и его массой
 - 2) полной энергией тела, его массой и скоростью света
 - 3) энергией покоя тела, его массой и скоростью света
 - 4) скоростью движения тела, массой тела и его кинетической энергией

- A5.** Постулат СТО о постоянстве скорости света в вакууме (скорость света в вакууме одинакова во всех ИСО), в частности, означает
- 1) скорость света во всех веществах одинакова
 - 2) скорость света не зависит от длины световой волны
 - 3) любые сигналы в природе распространяются со скоростями, меньшими скорости света
 - 4) вместо мгновенного действия на расстоянии или дальнего действия с бесконечной скоростью распространения должно существовать дальнее действие со скоростью света

1 2 3 4 A5

- A6.** Два тела движутся навстречу друг другу со скоростями $v_1 = v_2 = 2 \cdot 10^5$ км/с относительно неподвижного наблюдателя. Во сколько раз отличаются скорости их движения относительно друг друга, вычисленные по классической и релятивистской формулам сложения скоростей?
- 1) «классическая» скорость больше «релятивистской» в 1,5 раза
 - 2) «классическая» скорость меньше «релятивистской» в 2 раза
 - 3) скорости одинаковы
 - 4) «релятивистская скорость» составляет 0,93 классической

1 2 3 4 A6

- A7.** Самолет движется со скоростью v навстречу свету, излучаемому неподвижным источником. С какой скоростью v' сближается самолет с фотоном этого света?
- 1) со скоростью $v' = v + c$
 - 2) со скоростью $v' = c - v$
 - 3) со скоростью $v' = \frac{v + c}{c - v}$
 - 4) со скоростью $v' = c$

1 2 3 4 A7

Часть 2

Ответом к заданиям В1—В5 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

- В1.** При какой относительной скорости движения $\frac{v}{c}$ размеры тела сокращаются на 10%?
- В2.** Солнце излучает ежеминутно энергию, равную $6,5 \cdot 10^{21}$ квт · ч. Считая излучение Солнца постоянным, найдите, за какое время масса Солнца уменьшится в 2 раза? Ответ дайте в годах.
- В3.** При какой скорости релятивистская масса движущегося электрона вдвое больше его массы покоя?
- В4.** Во сколько раз увеличивается продолжительность существования нестабильной частицы (по часам неподвижного наблюдателя), если она начинает двигаться со скоростью, составляющей 99% скорости света?
- В5.** Какую часть скорости света должна составлять скорость частицы, чтобы ее кинетическая энергия была равна энергии покоя?

B1

B2

B3

B4

B5

4.6. Корпускулярно-волновой дуализм

4.6.1. Гипотеза Планка о квантах

Гипотеза Планка — предположение, что атомы испускают электромагнитную энергию (свет) не непрерывно, а отдельными порциями — квантами.

Энергия каждой порции пропорциональна частоте излучения:

$$E = h\nu, \quad (4.7)$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с — постоянная Планка, ν — частота света.

Постоянная Планка (квант действия) — фундаментальная физическая константа. Введена М. Планком в 1900 г. Наиболее точное значение постоянной Планка $h = 6,626176(36) \cdot 10^{-34}$ Дж · с. Чаще пользуются постоянной $\hbar = h/2\pi = 1,0545887(57) \cdot 10^{-34}$ Дж · с, также называемой постоянной Планка. Формула (4.7) — это вторая из простых великих формул физики (первая — формула Эйнштейна, связывающая энергию покоя тела с его массой). После открытия Планка начала развиваться квантовая теория.

4.6.2. Фотоэффект

Фотоэффект — испускание электронов веществом при поглощении им квантов электромагнитного излучения (фотонов).

Фотоэффект был открыт в 1887 г. Г. Герцем, который установил, что длина искры в разряднике увеличивается при попадании на его металлические электроды света от искры второго разрядника. Первые исследования фотоэффекта были выполнены русским ученым А. Г. Столетовым (1888 г.). Ф. Ленард и Дж. Томсон (1889 г.) доказали, что при фотоэффекте испускаются электроны.

4.6.3. опыты Столетова

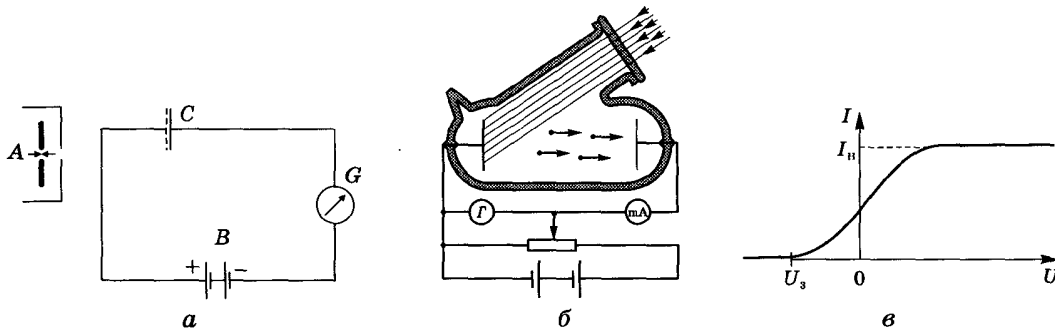


Рис. 4.1

Схема опытов и прибор Столетова по наблюдению фотоэффекта представлены на рис. 4.1, а. Здесь С — два металлических диска, установленных параллельно друг другу (один — латунная или железная металлическая сетка, второй диск — сплошной). Диски соединены между собой проволокой, в которую введены гальваническая батарея В и чувствительный гальванометр с большим сопротивлением (5212 Ом), А — источник света (лампа с вольтовой дугой). Таким образом, две металлические пластины представляют собой конденсатор, причем металлическая сетка является положительной обкладкой конденсатора. Свет от дуги А через сетку попадает на отрицательно заряженную сплошную металлическую пластину. Из опытов Столетова следовало, что фототок через гальванометр сильнее всего растет при освещении ультрафиолетовыми лучами,

сила фототока пропорциональна интенсивности освещения, и под действием света освобождаются только отрицательные заряды.

При изучении фотоэффекта строят зависимость тока I от напряжения U , подаваемого к электродам, один из которых (исследуемый фотокатод) освещается светом, (рис. 4.1, в). Из полученной зависимости $I(U)$ следует, что при $U = 0$ ток не равен нулю, а для того, чтобы ток стал равным нулю, необходимо подать некоторое напряжение обратной полярности (к освещенному электроду «+», к неосвещенному — «-»), которое называется задерживающим напряжением U_3 и определяется максимальной кинетической энергией вылетающих электронов: $mv^2/2 = eU_3$.

В процессе исследования фотоэффекта были установлены следующие закономерности.

1. Количество электронов, вырываемых светом с поверхности металла за 1 с, прямо пропорционально поглощаемой за это время энергии световой волны.
2. Скорость электронов, вылетающих из тела при фотоэффекте, определяется его частотой ν и не зависит от интенсивности.
3. Для каждого вещества существует предельная наименьшая частота света $\nu_{\min}$ (красная граница фотоэффекта), при которой возможен фотоэффект. Излучение с частотой $\nu < \nu_{\min}$ не вызывает явления фотоэффекта.

Второй и третий законы фотоэффекта нельзя объяснить в рамках классической электромагнитной теории. Они имеют квантовый характер.

4.6.4. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

Объяснение фотоэффекта было дано в 1905 г. Эйнштейном, развившим идею Планка о прерывистом испускании света: $E = h\nu$. Согласно Эйнштейну, из явления фотоэффекта следует, что *свет имеет прерывистую структуру: излученная порция световой энергии $E = h\nu$ сохраняет свою индивидуальность и в дальнейшем. Поглотиться может только вся порция целиком. Эта порция называется фотоном.*

Если фотон передает электрону энергию $h\nu$, большую или равную величине работы A по удалению электрона с поверхности металла, то электрон покидает поверхность этого металла. Разность между $h\nu$ и A приведет к возникновению кинетической энергии электрона. Из закона сохранения энергии следует:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}. \quad (4.8)$$

Эта формула называется *уравнением Эйнштейна*. Оно описывает все законы фотоэффекта. Из уравнения Эйнштейна следует, что кинетическая энергия электрона линейно зависит от частоты ν и не зависит от интенсивности излучения. Поскольку общее число электронов n , покидающих поверхность металла, пропорционально числу падающих фотонов, то величина n пропорциональна интенсивности падающего излучения.

Красную границу фотоэффекта можно получить из (4.8), если скорость электрона, покидающего металл, приравнять к нулю:

$$\nu_{\min} = \frac{A}{h}, \quad (4.9)$$

то есть красная граница фотоэффекта зависит только от работы выхода A . Учитывая, что $\lambda_{\min} = \frac{c}{\nu_{\min}}$, из (4.9) получим значение предельной длины волны:

$$\lambda_{\min} = \frac{ch}{A}.$$

При длинах волн, больших $\lambda_{\min}$, т. е. расположенных ближе к красным волнам, фотоэффект не наблюдается. Отсюда и название предельной длины волны $\lambda_{\min}$ — красная граница фотоэффекта.

4.6.5. Фотоны. Энергия и импульс фотона

Фотон (обозначение — γ) — элементарная частица, квант электромагнитного излучения.

При испускании и поглощении свет ведет себя подобно потоку частиц с энергией, зависящей от частоты ν :

$$E = h\nu,$$

где h — постоянная Планка.

Эти свойства света были названы *корпускулярными*, а сама частица — *фотоном*.

Энергию фотона часто выражают через циклическую частоту $\omega = 2\pi\nu$. При этом вместо h используют величину $\hbar$ (читается «аш с чертой»), равную $\hbar = h/2\pi$. Тогда энергия фотона выражается так:

$$E = h\nu = \hbar\omega.$$

Согласно теории относительности, энергия связана с массой соотношением $E = mc^2$. Поскольку энергия фотона равна $h\nu$, то его релятивистская масса m_p равна:

$$m_p = \frac{h\nu}{c^2}. \quad (4.10)$$

Фотон лишен массы покоя m , т. е. он не существует в состоянии покоя и при рождении сразу имеет скорость c . Масса, определяемая формулой (4.10), — это масса движущегося фотона. Зная массу и скорость фотона, определяют его импульс:

$$p = m_p c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Импульс фотона направлен по световому лучу. Чем больше частота, тем больше энергия и импульс фотона и тем отчетливее выражены корпускулярные свойства света. Энергия фотонов зеленого света составляет $4 \cdot 10^{-19}$ Дж. Тем не менее в своих замечательных опытах С. И. Вавилов установил, что человеческий глаз, этот тончайший из оптических приборов, чувствует освещенность, вызванную единицами квантов.

4.6.6. Корпускулярно-волновой дуализм. Гипотеза де Бройля о волновых свойствах частиц

Корпускулярно-волновой дуализм (от лат. *dualis* — двойственный) — важнейшее универсальное свойство природы, заключающееся в том, что всем микрообъектам присущи одновременно и корпускулярные, и волновые характеристики.

Так, например, электрон, нейтрон, фотон в одних условиях проявляют себя как частицы, движущиеся по классическим траекториям и обладающие определенной энергией и импульсом, а в других — обнаруживают свою волновую природу, характерную для явлений интерференции и дифракции частиц.

Впервые корпускулярно-волновой дуализм был установлен для света. Распространение света в виде потока фотонов и квантовый характер взаимодействия света с веществом подтверждены в многочисленных экспериментах. Однако целый ряд оптических явлений (поляризация, интерференция, дифракция) неопровержимо свидетельствуют о волновых свойствах света.

Классическая физика всегда четко разграничивала объекты, имеющие волновую природу (например, свет и звук), и объекты, имеющие дискретную корпускулярную структуру (например, системы материальных точек). Одно из наиболее значительных достижений современной физики — убеждение в ошибочности противопоставления волновых и квантовых свойств света. Рассматривая свет как поток фотонов, а фотоны — как кванты электромагнитного излучения, обладающие одновременно и волновыми, и корпускулярными свойствами, современная физика смогла объединить, казалось бы, непримиримые теории — волновую и корпускулярную. В результа-

те возникло представление о корпускулярно-волновом дуализме, лежащее в основе современной физики (корпускулярно-волновой дуализм является первичным принципом квантовой механики и квантовой теории поля).

Квант света — не волна и не корпускула в понимании Ньютона. Фотоны — особые микро-частицы, энергия и импульс которых (в отличие от обычных материальных точек) выражаются через материальные характеристики — частоту и длину волны.

В 1924 г. французский ученый Луи де Бройль высказал гипотезу о том, что корпускулярно-волновой дуализм присущ всем без исключения видам материи — электронам, протонам, атомам, причем количественные соотношения между волновыми и корпускулярными свойствами частиц те же, что и установленные ранее для фотонов. То есть, если частица имеет энергию E и импульс, абсолютное значение которого равно p , то с этой частицей связана волна частотой $\nu = E/h$ и длиной

$$\lambda = h/p, \quad (4.11)$$

где h — постоянная Планка.

Это знаменитая *формула де Бройля* — одна из основных в физике микромира.

Следует отметить, что длина волны де Бройля тем меньше, чем больше масса частицы m и ее скорость v : для частиц с $v \ll c$ выполняется $\lambda = h/mv$. Так, частице массой 1 г, движущейся со скоростью 1 м/с, соответствует волна де Бройля длиной $\lambda \approx 10^{-18}$ А, настолько малой, что это недоступно наблюдению. Поэтому волновые свойства несущественны в механике макроскопических тел, что полностью согласуется с принципом соответствия.

4.6.7. Дифракция электронов

Дифракция электронов была открыта американскими физиками К. Дэвиссоном и Л. Джермером. Они использовали электроны с энергией около 100 эВ (так называемые медленные электроны). Тонкий пучок электронов падал на грань монокристалла никеля нормально к ее поверхности. Регистрация рассеянных под разными углами электронов показала наличие четких максимумов, подобных тем, которые получаются при дифракции рентгеновских лучей на монокристаллах. Монокристалл представляет для электронов, как и для рентгеновских лучей, своего рода дифракционную решетку. Аналогичный опыт в более поздней постановке выглядит следующим образом. Пучок электронов, движущихся с большой скоростью, направляется на тонкую фольгу Φ , и, пройдя фольгу, попадает на люминесцирующий экран $\mathcal{E}$ (рис. 4.2, а). На экране высвечиваются четкие дифракционные кольца (рис. 4.2, б). На рис. 4.2, в представлена аналогичная фотография, полученная при облучении фольги рентгеновскими лучами. Вывод очевиден.

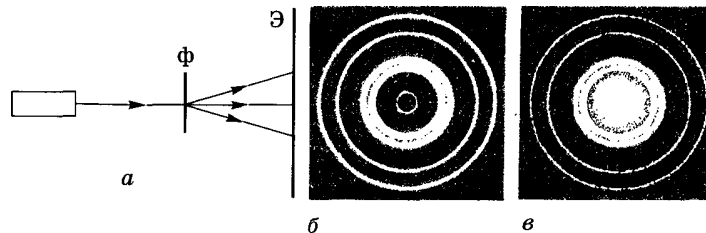


Рис. 4.2

Чтобы ответить на вопрос, присущи ли волновые свойства отдельному электрону (а не только потоку электронов, использованному в опытах К. Дэвиссона и Л. Джермера), Л. И. Биберман, Н. Т. Сушкин, В. А. Фабрикант провели опыт, в котором поток электронов был настолько слабым, что через прибор электроны проходили заведомо поодиночке. При большом времени экспозиции была получена такая же дифракционная картина, как и с пучком электронов большой интенсивности. Это говорит о том, что волновые свойства присущи и отдельному электрону, а не только пучку электронов. Была обнаружена также дифракция протонов, нейтронов, атомных и молекулярных пучков. Гипотеза де Бройля была подтверждена экспериментально.

Примеры заданий ЕГЭ по теме 4.6.
«Корпускулярно-волновой дуализм»

Часть 1

При выполнении заданий уровня А нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

A1 1 2 3 4

- A1. Слово «фотон» в физике означает
- 1) прибор для фотографирования
 - 2) луч света
 - 3) единицу измерения интенсивности света
 - 4) элементарную частицу, являющуюся квантом электромагнитного излучения.

A2 1 2 3 4

- A2. Постоянная Планка определяется в физике как
- 1) порция света
 - 2) единица измерения энергии
 - 3) квант действия
 - 4) элементарная частица

A3 1 2 3 4

- A3. Чему равен импульс фотона красного света ($\lambda = 630$ нм)? Как он отличается от фотона фиолетового света ($\lambda = 400$ нм)? Выберите правильный ответ

- 1) $p_{\kappa} = 1 \cdot 10^{-27}$ кг · м/с $\frac{p_{\kappa}}{p_{\phi}} = 0,63$
- 2) $p_{\kappa} = 1 \cdot 10^{-26}$ кг · м/с $\frac{p_{\kappa}}{p_{\phi}} = 0,5$
- 3) $p_{\kappa} = 5 \cdot 10^{-27}$ кг · м/с $\frac{p_{\kappa}}{p_{\phi}} = 2$
- 4) $p_{\kappa} = 3 \cdot 10^{-27}$ кг · м/с $\frac{p_{\kappa}}{p_{\phi}} = 1,5$.

A4 1 2 3 4

- A4. Формула де Бройля, являющаяся математическим выражением идеи о волновых свойствах любых микрочастиц, имеет вид

- 1) $\lambda = \nu \cdot \nu$
- 2) $E = mc^2$
- 3) $E = \frac{hc}{\lambda}$
- 4) $\lambda = \frac{h}{p}$

A5 1 2 3 4

- A5. Укажите, какая из длин волн спектра излучения ртутной лампы может вызывать фотоэффект в металле с красной границей фотоэффекта $\lambda_{\kappa} = 500$ нм

- 1) 436 нм
- 2) 546 нм
- 3) 577 нм
- 4) 579 нм

А6. Длина волны де Бройля медленных электронов с энергией около 100 эВ, использованных в опытах К. Дэвиссона и Л. Джермера по обнаружению дифракции электронов составляла

- 1) 5,2 А
- 2) 1,23 А
- 3) 3,1 А
- 4) 0,51 А

1 2 3 4 А6

А7. Длина волны де Бройля шарика массой 1 г, движущегося со скоростью 1 см/с составляет

- 1) $8,1 \cdot 10^{-26}$ см
- 2) $16,6 \cdot 10^{-25}$ см
- 3) $5 \cdot 10^{-20}$ см
- 4) $6,6 \cdot 10^{-27}$ см.

1 2 3 4 А7

Часть 2

Ответом к заданиям В1—В7 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

В1. Определите энергию пучка синего света с длиной волны $\lambda = 450$ нм, состоящего из 10 фотонов.

В1

В2. Какова релятивистская масса эквивалентна энергии фотона рентгеновского излучения с $\lambda = 10$ нм?

В2

В3. Какова длина волны де Бройля α -частицы, движущейся со скоростью 30000 км/с? Импульс частицы можно вычислять по классической формуле.

В3

В4. Какова красная граница фотоэффекта для платины, если работа выхода электронов $A = 1 \cdot 10^{-18}$ Дж?

В4

В5. Красная граница фотоэффекта для вольфрама $\lambda_k = 275$ нм. Найдите наибольшую скорость фотоэлектронов, вылетающих из вольфрама при освещении его светом с $\lambda = 180$ нм.

В5

В6. Найдите работу выхода электронов из металла, если фотоэффект начинается при частоте падающего света $6 \cdot 10^{14}$ с⁻¹.

В6

В7. Заряженная частица, прошедшая разность потенциалов 200 В имеет длину волны де Бройля, равную 0,0202 Å. Заряд частицы равен заряду электрона. Какова масса частицы?

В7

4.7. Физика атома

Атом — это наименьшая частица химического элемента, способная к самостоятельному существованию и обладающая его свойствами.

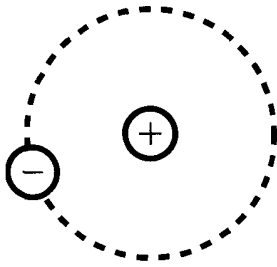
Каждому элементу соответствует определенный род атомов, обозначаемый химическим символом этого элемента. Например, атом кислорода обозначается символом О, атом водорода Н, атом гелия Не.

Атомы могут существовать в свободном состоянии (в виде отдельных атомов) в газах. В жидкостях и твердых телах они существуют в виде молекул, в которых соединяются с атомами того же элемента или других химических элементов (или, как принято говорить, существуют *в связанном состоянии*).

Со времен Демокрита (ок. 460–370 гг. до н. э.) и до конца XIX в. атом считался неделимой частицей — кирпичиком мироздания. После открытия электрона в 1897 г. английским ученым Дж. Дж. Томсоном стало ясно, что атом — сложная система.

4.7.1. Планетарная модель атома

С целью выяснения распределения положительного заряда в атоме английский ученый Э. Резерфорд исследовал рассеяние α -частиц фольгой из различных веществ. Большинство α -частиц беспрепятственно, почти без отклонений, проникало через фольгу, и только 1 из 2000 частиц отклонялась на углы, большие 90° . В результате этих экспериментов в 1911 г. Резерфорд предложил следующую модель строения атома.



Атом водорода

Рис. 4.3

Атом состоит из положительно заряженного ядра, вокруг которого обращаются электроны, каждый на своей орбите, подобно планетам Солнечной системы, обращающимся вокруг Солнца. Поэтому модель называют *планетарной* (рис. 4.3).

Расстояние от электронов до ядра очень велико по сравнению с размерами ядра. Оценки Резерфорда показали, что диаметр ядра составляет порядка 10^{-12} – 10^{-13} см. Размер самого атома 10^{-8} см.

Положительный заряд ядра $q_{\text{ядра}}$ связан с числом электронов Z в атоме соотношением:

$$q_{\text{ядра}} = +Z \cdot e,$$

где e — заряд электрона.

Заряд ядра и число электронов в атоме, соответственно, совпадает с порядковым номером элемента в таблице Д. И. Менделеева.

В целом атом электронейтрален. При отрыве электрона от атома или присоединении электрона к атому (в результате столкновений, например, или при различных химических процессах) могут образоваться положительно или отрицательно заряженные ионы.

Простая и наглядная модель атома Резерфорда прекрасно объясняла результаты его опытов. Однако на основании этой модели нельзя объяснить факт существования атома, его устойчивость. Согласно законам электродинамики Максвелла электрон, движущийся по орбите с немалым ускорением, должен излучать электромагнитные волны с частотой, равной частоте его обращения вокруг ядра, в результате чего в скором времени, потеряв в результате излучения всю энергию, упасть на ядро. Согласно расчетам, основанным на механике Ньютона и электродинамике Максвелла, время это составляет всего 10^{-8} с. В действительности ничего подобного не происходит. Нейтральные невозбужденные атомы существуют неограниченно долго.

Это несоответствие опыта выводам теории связано с попыткой применения законов классической физики к внутриатомным явлениям (которые, как оказалось, подчиняются законам квантовой механики).

Выход из создавшейся в теории атома ситуации был найден датским физиком Нильсом Бором.

4.7.2. Постулаты Бора

Основу квантовой теории атома Бора составляют два постулата.

Первый постулат Бора гласит: атомная система может находиться только в особых стационарных, или квантовых, состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия E_n ; в стационарном состоянии атом не излучает энергию.

Этот постулат противоречит классической механике, согласно которой энергия движущихся электронов может быть любой. Он противоречит также и электродинамике Максвелла, так как допускает возможность ускоренного движения электронов без излучения электромагнитных волн.

Второй постулат Бора: излучение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией E_k в стационарное состояние с меньшей энергией E_n . Энергия излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n.$$

Отсюда можно получить частоту излучения:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h} = \frac{E_k}{h} - \frac{E_n}{h}.$$

При поглощении света атом переходит из стационарного состояния с меньшей энергией в стационарное состояние с большей энергией.

Модель атома водорода Бора

Для построения модели простейшей системы — атома водорода — Бор постулировал также правило определения стационарных значений энергии атома (уровней энергии) — так называемое правило квантования.

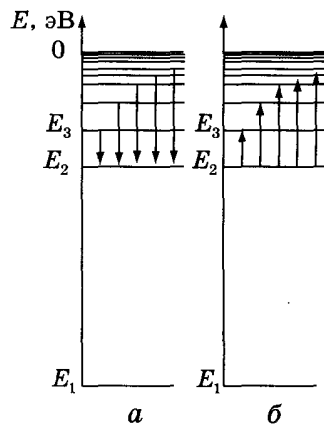
Правило квантования орбит Бора заключается в следующем.

Стационарным состояниям атома соответствуют разрешенные дискретные значения энергии электрона, такие, что при движении по стационарным круговым орбитам электрон должен иметь дискретные значения момента количества движения:

$$m_e v r = n \frac{h}{2\pi}, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

где m_e — масса электрона, v — его скорость, r — радиус орбиты, h — постоянная Планка. n называется *главным квантовым числом* (является номером орбиты в спектре атома водорода, в частности).

Используя законы механики Ньютона и правило квантования, Бор вычислил допустимые радиусы орбит и значения энергии стационарных состояний. Минимальный радиус орбиты определяет размер атома (он оказался равным $0,53 \cdot 10^{-10}$ м). Значения энергий стационарных состояний в электронвольтах отложены на вертикальной оси (рис. 4.4). (В атомной физике энергию выражают в электронвольтах, сокращенно — эВ. 1 эВ — это энергия, приобретаемая электроном при прохождении разности потенциалов 1 В. 1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.)



$$E_1 = -13,55 \text{ эВ}$$

Рис. 4.4

Правило квантования орбит и постулаты Бора позволили ему самому и другим ученым объяснить наблюдавшиеся закономерности в оптическом спектре излучения атома водорода, а также в рентгеновских спектрах, и дать физическое истолкование Периодического закона элементов.

Поглощение света

Поглощение света — процесс, обратный излучению, при котором атом с нижних энергетических уровней переходит на верхние уровни. При этом он поглощает излучение тех же частот, которые излучает при переходе с верхних энергетических уровней на нижние. На рис. 4.4, б стрелками изображены переходы атома из одних состояний в другие с поглощением света.

4.7.3. Оптические спектры

Спектр (от лат. *spectrum* — представление, образ) — совокупность всех значений какой-либо физической величины, характеризующей систему или процесс.

Чаще всего пользуются понятиями частотного спектра колебаний (в частности, электромагнитных), спектра энергий, импульсов и масс частиц. Спектр может быть непрерывным и дискретным (прерывистым).

Оптические спектры — спектры электромагнитных излучений в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазонах длин волн. Оптические спектры разделяют на спектры испускания, спектры поглощения (абсорбционные спектры), спектры рассеяния и спектры отражения.

Оптические спектры получают от источников света при разложении их излучения по длинам волн λ (или частотам $\nu = c/\lambda$, или волновым числам $1/\lambda = \nu/c$, которые тоже обозначают ν) с помощью спектральных приборов. Для характеристики распределения излучения по частотам вводят *спектральную плотность излучения $I(\nu)$, равную интенсивности излучения I , приходящейся на единичный интервал частот* (интенсивность излучения I — это плотность потока электромагнитного излучения, приходящегося на все частоты). Интенсивность излучения, приходящаяся на небольшой спектральный интервал $\Delta\nu$, равна $I(\nu)\Delta\nu$. Суммируя подобные выражения по всем частотам спектра, получим *плотность потока излучения I* .

Виды спектров

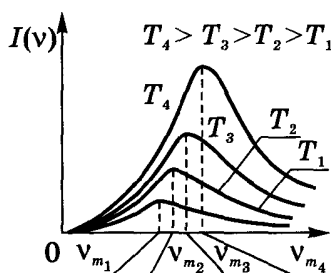


Рис 4.5

Спектральный состав излучения веществ весьма разнообразен. Не смотря на это, все спектры можно разделить на три типа: *непрерывные, линейчатые и полосатые спектры*.

Непрерывные спектры, или сплошные спектры, как показывает опыт, дают тела, находящиеся в твердом или жидком состоянии, а также сильно сжатые газы. Для получения непрерывного спектра тело нужно нагреть до высокой температуры.

Непрерывные спектры определяются не только излучательной способностью самих атомов, но в значительной степени зависят от взаимодействия атомов друг с другом.

На рис. 4.5 приведена кривая зависимости спектральной плотности интенсивности теплового излучения от частоты (спектр) тела с очень черной поверхностью. Кривая имеет максимум при некоторой частоте $\nu_{\max}$, зависящей от температуры тела. При увеличении температуры максимум энергии излучения сдвигается к большим частотам. Энергия излучения, приходящаяся на очень малые ($\nu \rightarrow 0$) и очень большие ($\nu \rightarrow \infty$) частоты, ничтожно мала. В сплошном спектре представлены все длины волн.

Линейчатые спектры состоят из отдельных спектральных линий (рис. 4.6); это означает, что вещество излучает свет определенных длин волн в определенных, очень узких спектральных интервалах. Каждая линия имеет конечную ширину.

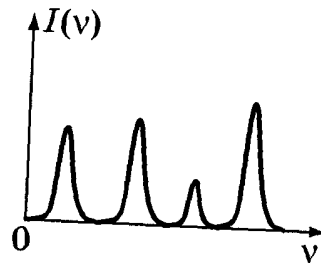


Рис. 4.6

Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном (но не молекулярном) состоянии. В этом случае излучают атомы, не взаимодействующие друг с другом. Это самый фундаментальный, основной тип спектров.

Изолированные атомы излучают строго определенные длины волн, характерные для данного типа атомов.

Классическим примером линейчатого спектра является спектр атома водорода.

Спектральные закономерности в спектре атома водорода. Все частоты излучений атома водорода составляют ряд серий, каждая из которых образуется при переходе атома в одно из энергетических состояний из всех верхних энергетических состояний, т. е. состояний с большей энергией, пользуясь терминологией спектроскопии — переходов электрона с верхних возбужденных уровней энергии на нижние уровни. На рис. 4.4, а изображены переходы на второй возбужденный энергетический уровень, составляющие *серию Бальмера*, частоты излучения которой лежат в видимой области спектра. Серия названа по имени швейцарского учителя И. Бальмера, который еще в 1885 г. на основе экспериментальных результатов вывел простую формулу для определения частот видимой части спектра водорода:

$$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (4.12)$$

где $n = 3, 4, 5, \dots$; R — постоянная Ридберга, определенная из спектральных данных и позднее вычисленная на основе теории атома Бора. В этой формуле ν — не частота, измеряемая в с^{-1} , а *волновое число*, равное обратному значению длины волны $1/\lambda$ и измеряемое в м^{-1} .

Для определения частот излучения других серий атома водорода вместо двойки в знаменателе первой дроби в формуле (4.12) нужно поставить числа 1, 3, 4, 5. Ниже в табл. 4.1 приведены номера нижних энергетических уровней, при переходе на которые с верхних уровней излучаются соответствующие серии.

Таблица 4.1

Номер нижнего уровня	Название серии (фамилия ученого) и год ее открытия	Область спектра излучения
1	Лаймана, 1916	Ультрафиолетовая
2	Бальмера, 1885	Видимая
3	Пашена, 1908	Инфракрасная
4	Брекета, 1922	Инфракрасная
5	Пфунда, 1924	Инфракрасная

Полосатые спектры состоят из отдельных полос, разделенных темными промежутками. С помощью очень хорошего спектрального аппарата можно обнаружить, что каждая полоса состоит из большого числа тесно расположенных линий. Полосатые спектры излучают молекулы, не связанные или слабо связанные друг с другом.

Для наблюдения молекулярных спектров, как и для наблюдения линейчатых спектров, используют свечение паров в пламени или свечение газового разряда.

Спектры поглощения делятся на те же три типа (сплошные, линейчатые и полосатые), что и спектры испускания. Поглощение света также зависит от длины волны. Так, красное стекло пропускает волны, соответствующие красному свету ($\lambda \approx 8 \cdot 10^{-5} \text{ см}$), и поглощает все остальные.

Газ наиболее интенсивно поглощает свет тех длин волн, которые он испускает в сильно нагретом состоянии.

Так, если пропускать белый свет сквозь холодный неизлучающий газ, то на фоне непрерывного спектра излучения появятся темные линии. Это линии поглощения, образующие в совокупности *спектр поглощения*.

Спектральные приборы

Спектральные приборы — это приборы для исследования спектрального состава электромагнитных излучений по длинам волн (в оптическом диапазоне $10^{-3} \dots 10^3 \text{ мкм}$), определения спектральных характеристик излучателей и объектов, взаимодействовавших с излучением, а также спектрального анализа.

Простейшим способом получения распределения интенсивности света по частотам является разложение его в спектр с помощью призмы с последующим сканированием полученного спектра чувствительным элементом (рис. 4.7). В качестве чувствительного элемента можно использовать чувствительную к нагреванию пластину термометра сопротивления, покрыв ее предварительно сажей для лучшего поглощения света. Ширина Δl пластины будет соответствовать спектральному участку $\Delta \nu$ (рис. 4.8). Сигнал, снимаемый с термометра сопротивления, будет пропорционален поглощенной энергии света в интервале частот $\Delta \nu$ — спектральной плотности интенсивности излучения. Откладывая по оси абсцисс значения частот, соответствующих серединам интервалов

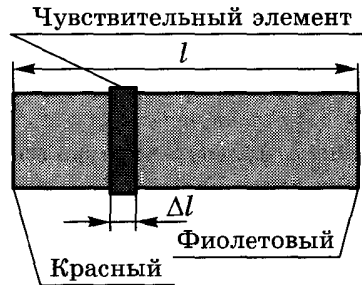


Рис. 4.7

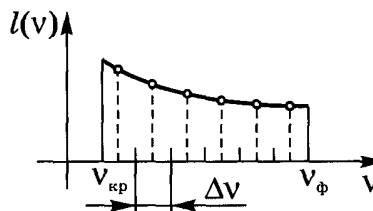


Рис. 4.8

$\Delta\nu$, а по оси ординат — спектральную плотность интенсивности излучения, получим кривую распределения энергии по частотам (рис. 4.8). На рис. 4.8 представлена видимая часть спектра электрической дуги.

Спектральные аппараты используют для точного исследования спектров. Схема устройства такого аппарата — спектрографа — представлена на рис. 4.9. Исследуемое излучение поступает в *коллиматор*, представляющий собой трубку, на одном конце которой расположена входная щель, а на другом — собирающая линза L_1 . Щель находится в фокусе линзы. После линзы параллельный пучок света попадает на призму — диспергирующий элемент прибора (его главная часть). Выходящие из призмы параллельные пучки попадают на линзу L_2 , в фокусе которой расположен экран — фотопластина или матовое стекло. Линза L_2 фокусирует параллельные пучки лучей на экране, где вместо одного изображения щели получается целый ряд изображений. Каждому узкому спектральному интервалу соответствует свое изображение. Все эти изображения вместе и образуют *спектр*.

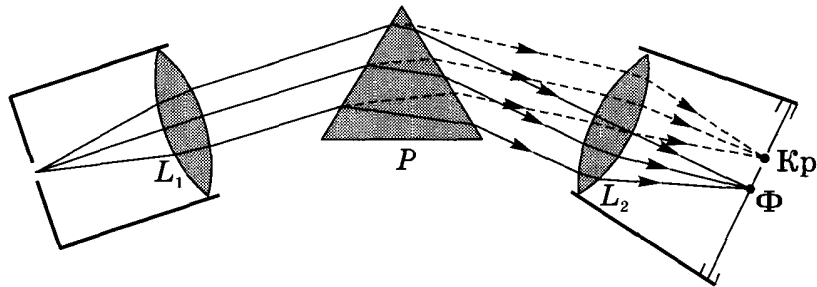


Рис. 4.9

Призмы могут быть изготовлены не только из стекла, но и из кварца, каменной соли и др., — в зависимости от того, какой интервал частот (или длин волн) спектра излучения подлежит исследованию — видимый, ультрафиолетовый или инфракрасный. Вместо призмы в качестве диспергирующего элемента используется также дифракционная решетка.

4.7.4. Лазер

Лазер (оптический квантовый генератор, аббревиатура английской фразы *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, означающей «усиление света вынужденным излучением») — это устройство, преобразующее различные виды энергии (электрическую, световую, тепловую, химическую и др.) в энергию когерентного электромагнитного излучения оптического диапазона.

В обычных источниках света (нагретые тела — лампы накаливания и др.) атомы получают энергию за счет возбуждения валентных электронов, находящихся на внешних электронных оболочках. Перейдя в возбужденное состояние, электрон атома примерно через 10^{-8} – 10^{-7} с без какого-либо внешнего воздействия, спонтанно (самопроизвольно) возвращается в основное состояние, излучая фотон. Атомы возбуждаются и излучают фотоны независимо друг от друга, поэтому излучаемые ими фотоны некогерентны друг с другом.

Возможными процессами взаимодействия атома с фотоном, энергия которого равна разности энергий основного E_1 и возбужденного E_2 состояний (уровней энергии) атома $h\nu = E_2 - E_1$, являются следующие.

1. *Поглощение света.* Электрон атома, находящийся в основном состоянии с энергией E_1 , может поглотить фотон, перейдя в возбужденное состояние с энергией $E_2 > E_1$ (рис. 4.10). Интенсивность поглощенного излучения пропорциональна концентрации n_1 атомов, находящихся в основном состоянии.

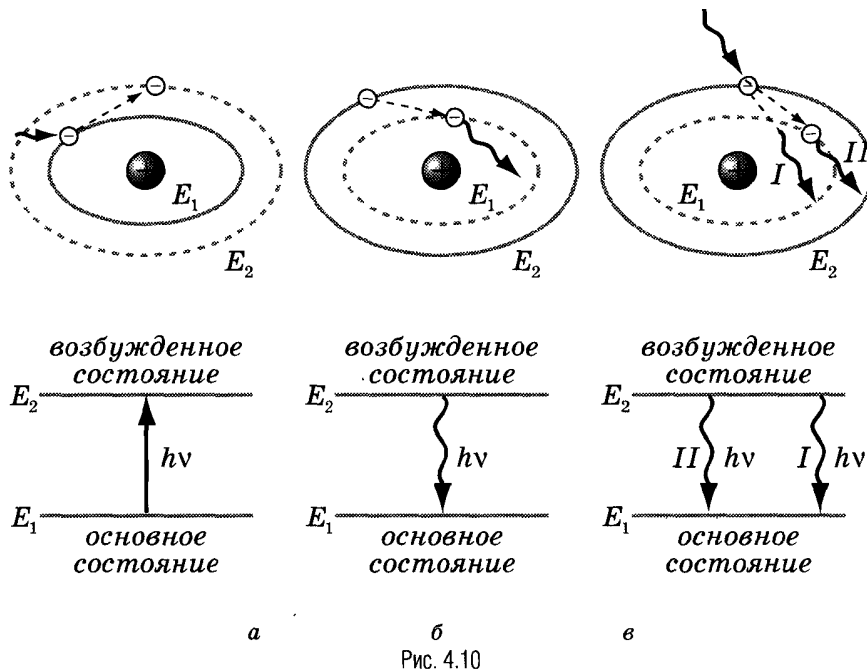


Рис. 4.10

2. *Спонтанное излучение.* В отсутствие внешних полей или столкновений с другими частицами электрон, находящийся в возбужденном состоянии, через время порядка 10^{-8} – 10^{-7} с спонтанно (самопроизвольно) возвращается в основное состояние, излучая фотон (рис. 4.10, б).

Спонтанное излучение — это излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома из одного состояния в другое.

Спонтанное излучение различных атомов происходит некогерентно, т. к. каждый атом начинает и заканчивает излучать независимо от других.

3. *Индукированное излучение.* В 1917 г. Эйнштейн предсказал, что возбужденный атом может излучать под действием падающего на него света (рис. 4.10, в).

Индукированное (вынужденное) излучение — излучение атома, возникающее при переходе на более низкий энергетический уровень под действием внешнего электромагнитного излучения.

Интенсивность индукированного излучения пропорциональна концентрации n_2 атомов, находящихся в возбужденном состоянии. При этом световая волна, возникающая при индукированном излучении, имеет ту же частоту, поляризацию, фазу и направление распространения, что и падающая на атом волна. Это означает, что интенсивность падающего излучения увеличивается, т. е. возникает оптическое усиление.

Принцип действия лазера

В 1939 г. российский физик В. А. Фабрикант наблюдал экспериментально усиление электромагнитных волн (оптическое усиление) в результате процесса индукированного излучения. Российские ученые Н. Г. Басов и А. М. Прохоров и американский физик Ч. Таунс, создавшие в 1954 г. квантовый генератор излучения, работавший в сантиметровом диапазоне, были удостоены в 1964 г. Нобелевской премии по физике. Первый лазер, работающий на кристалле рубина в видимом диапазоне, был создан в 1960 г. американским физиком Т. Мейманом.

Усиление излучения, падающего на среду, будет происходить тогда, когда число частиц на возбужденном уровне n_2 превысит число частиц на основном уровне энергии: $n_2 > n_1$. Такое состояние системы называется *инверсной населенностью*. В состоянии термодинамического равновесия, когда система занимает основное состояние с наименьшей энергией E_1 , т. е. когда $n_1 > n_2$, усиления света не будет.

Инверсная населенность энергетических уровней — неравновесное состояние среды, при котором концентрация атомов в возбужденном состоянии больше, чем концентрация атомов в основном состоянии.

Однако спонтанные переходы препятствуют накоплению атомов в возбужденном состоянии. Этим можно пренебречь, если возбужденное состояние метастабильно.

Метастабильным называется возбужденное состояние электрона в атоме, в котором он может находиться гораздо дольше (например, 10^{-3} с), чем в обычном возбужденном состоянии (10^{-8} с).

На этом основан принцип действия рубинового лазера. Рубин, используемый в качестве активного элемента в лазере, представляет собой монокристалл Al_2O_3 , в котором часть ионов алюминия замещена ионами Cr^{3+} .

С помощью лампы-вспышки (оптической накачки) ионы хрома переводятся из основного состояния E_1 в возбужденное — E_3 (рис. 4.11). Через 10^{-8} с ионы, передавая часть энергии кристаллической решетке, переходят из возбужденного состояния E_3 в метастабильное состояние $E_2 < E_3$, в котором начинают накапливаться. Малая вероятность перехода с этого уровня на основной приводит к инверсной заселенности ($n_2 > n_1$) этого уровня. Случайный фотон с энергией $h\nu = E_2 - E_1$ может вызвать лавину индуцированных когерентных фотонов. Индуцированное излучение, распространяющееся вдоль оси цилиндрического монокристалла рубина, многократно отражается от его торцов и быстро усиливается.

Один из торцов рубинового стержня делают зеркальным, а другой — частично прозрачным. Через него выходит мощный импульс когерентного монохроматического излучения красного цвета с длиной волны 694,3 нм.

В настоящее время существует много различных типов и конструкций лазеров.

Лазерное излучение обладает следующими особенностями:

- 1) исключительной монохроматичностью и когерентностью;
- 2) пучок света лазера имеет очень малый угол расхождения (около 10^{-5} рад);
- 3) лазер — наиболее мощный искусственный источник света. Напряженность электрического поля в электромагнитной волне, излучаемой лазером, превышает напряженность поля внутри атома.

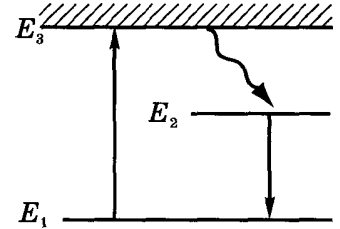


Рис. 4.11

Примеры заданий ЕГЭ по теме 4.7. «Физика атома»

Часть 1

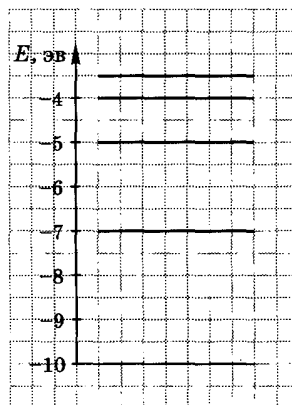
При выполнении заданий уровня А нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

A1 1 2 3 4

- A1. Планетарная модель атома Резерфорда входила в противоречие с представлениями классической физики по причине
- 1) невозможности экспериментальной проверки модели
 - 2) сложности состава атома
 - 3) противоречия с представлениями древних атомистов
 - 4) невозможности объяснения устойчивости атома

A2 1 2 3 4

- A2. На рисунке изображены энергии квантовых состояний (уровни энергии) атомной системы. Ниже перечислены некоторые значения энергий (в эВ) стационарных состояний E_n и энергий фотонов $h\nu_{kn}$ излучения этой системы. Какие из них не противоречат постулатам Бора?



- 1) $E_n = -9$ $-7,5$ $h\nu_{kn} = 6$ $1,2$
- 2) $E_n = -8$ -6 $h\nu_{kn} = 0,5$ $1,8$
- 3) $E_n = -7$ -5 $h\nu_{kn} = 3$ 1
- 4) $E_n = -11$ $-5,5$ $h\nu_{kn} = -12$ $2,5$

A3 1 2 3 4

- A3. С помощью каких приборов изучают спектральный состав электромагнитного излучения оптического диапазона?
- 1) спектрографы, спектрометры
 - 2) микроскопы
 - 3) фотоаппараты
 - 4) зрительные трубы

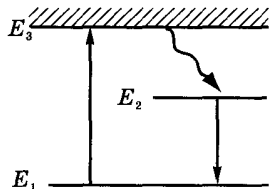
A4 1 2 3 4

- A4. Главной отличительной особенностью излучения лазера по сравнению с естественными источниками света является
- 1) большая интенсивность излучения
 - 2) спектральный состав
 - 3) время излучения
 - 4) когерентность излучения

A5 1 2 3 4

- A5. Во сколько раз кулоновская сила больше силы тяготения электрона и ядра в атоме водорода (радиус атома водорода $\sim 0,5 \cdot 10^{-10}$ м)?
- 1) $2 \cdot 10^{39}$ раз
 - 2) 10^{20} раз
 - 3) 10^{35} раз
 - 4) 10^{37} раз

- A6.** Условием, необходимым для индуцированного излучения трехуровневой системы, изображенной на рисунке, является



- 1) большое значение $E_3 - E_2$
- 2) большое время жизни уровня E_3
- 3) инверсная населенность метастабильного уровня E_2
- 4) большая интенсивность света накачки

Часть 2

Ответом к заданиям В1—В4 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

- В1.** Найдите значение постоянной Ридберга в формуле Бальмера, зная, что наименьшая частота излучения в видимой части спектра водорода равна $4,6 \cdot 10^{14}$ Гц. Ответ дайте в м^{-1} .
- В2.** Определите наибольшую длину волны в ультрафиолетовой серии атома водорода.
- В3.** Каково изменение энергии атомов водорода при излучении им линии с частотой $4,57 \cdot 10^{14}$ Гц?
- В4.** Определите длину волны излучения, соответствующего переходу атома водорода из одного энергетического состояния в другое, разница в энергиях которых составляет $3,027 \cdot 10^{-19}$ Дж. Ответ дайте в нм.

В задании В5 на установление соответствия требуется указать последовательность цифр, соответствующих правильному ответу.

- В5.** Установите соответствие между названием оптического спектра (левый столбец) и источником такого спектра (правый столбец).
- | | |
|-----------------------|--|
| А) Линейчатые спектры | 1) сильно нагретое черное тело; |
| Б) Полосатые спектры | 2) спектр Солнца |
| В) Сплошные спектры | 3) молекулярные спектры слабых растворов |
| | 4) газы в атомарном состоянии; |
| | 5) твердые тела |
| | 6) спектры звезд |
| | 7) газы в молекулярном состоянии |

Впишите во вторую строку таблицы номера правильных ответов.

А	Б	В

1 2 3 4 A6

B1

B2

B3

B4

B5

4.8. Физика атомного ядра

4.8.1. Состав ядра

Атомное ядро — это центральная часть атома, состоящая из протонов и нейтронов (которые вместе называются нуклонами).

Ядро было открыто Э. Резерфордом в 1911 г. при исследовании прохождения α -частиц через вещество. Оказалось, что почти вся масса атома (99,95%) сосредоточена в ядре. Размер атомного ядра имеет порядок величины 10^{-13} – 10^{-12} см, что в 10 000 раз меньше размера электронной оболочки.

Предложенная Э. Резерфордом планетарная модель атома и экспериментальное наблюдение им ядер водорода, выбитых α -частицами из ядер других элементов (1919–1920 гг.), привели ученого к представлению о *протоне*. Термин *протон* был введен в начале 20-х гг XX ст.

Протон (от греч. *protos* — первый, символ *p*) — стабильная элементарная частица, ядро атома водорода.

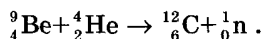
Протон — положительно заряженная частица, заряд которой по абсолютной величине равен заряду электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Масса протона в 1836 раз больше массы электрона. Масса покоя протона $m_p = 1,6726231 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 1,007276470$ а.е.м.

Второй частицей, входящей в состав ядра, является *нейтрон*.

Нейтрон (от лат. *neuter* — ни тот, ни другой, символ *n*) — это элементарная частица, не имеющая заряда, т. е. нейтральная.

Масса нейтрона в 1839 раз превышает массу электрона. Масса нейтрона почти равна (незначительно больше) массе протона: масса покоя свободного нейтрона $m_n = 1,6749286 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 1,0008664902$ а.е.м. и превосходит массу протона на 2,5 массы электрона. Нейтрон, наряду с протоном под общим названием *нуклон* входит в состав атомных ядер.

Нейтрон был открыт в 1932 г. учеником Э. Резерфорда Д. Чедвигом при бомбардировке бериллия α -частицами. Возникающее при этом излучение с большой проникающей способностью (преодолевало преграду из свинцовой пластины толщиной 10–20 см) усиливало свое действие при прохождении через парафиновую пластину (рис. 4.12). Оценка энергии этих частиц по трекам в камере Вильсона, сделанная супругами Жолио-Кюри, и дополнительные наблюдения позволили исключить первоначальное предположение о том, что это γ -кванты. Большая проникающая способность новых частиц, названных нейтронами, объяснялась их электронейтральностью. Ведь заряженные частицы активно взаимодействуют с веществом и быстро теряют свою энергию. Существование нейтронов было предсказано Э. Резерфордом за 10 лет до опытов Д. Чедвига. При попадании α -частиц в ядра бериллия происходит следующая реакция:



Здесь ${}^1_0\text{n}$ — символ нейтрона; заряд его равен нулю, а относительная атомная масса приблизительно равна единице. Нейтрон — нестабильная частица: свободный нейтрон за время ~ 15 мин. распадается на протон, электрон и нейтрино — частицу, лишенную массы покоя.

После открытия Дж. Чедвиком нейтрона в 1932 г. Д. Иваненко и В. Гейзенберг независимо друг от друга предложили *протонно-нейтронную (нуклонную) модель ядра*. Согласно этой модели, ядро состоит из протонов и нейтронов. Число протонов Z совпадает с порядковым номером элемента в таблице Д. И. Менделеева.

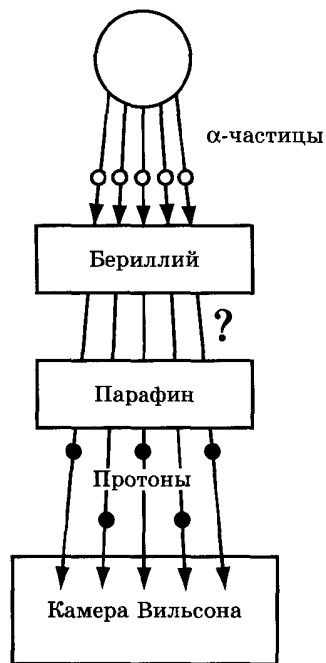


Рис. 4.12

Заряд ядра Q определяется числом протонов Z , входящих в состав ядра, и кратен абсолютной величине заряда электрона e :

$$Q = +Ze.$$

Число Z называется *зарядовым числом ядра* или *атомным номером*.

Массовым числом ядра A называется общее число нуклонов, т. е. протонов и нейтронов, содержащихся в нем. Число нейтронов в ядре обозначается буквой N . Таким образом, массовое число равно:

$$A = Z + N.$$

Нуклонам (протону и нейтрону) приписывается массовое число, равное единице, электрону — нулевое значение.

Представлению о составе ядра содействовало также открытие *изотопов*.

Изотопы (от греч. *isos* — равный, одинаковый и *topos* — место) — это разновидности атомов одного и того же химического элемента, атомные ядра которых имеют одинаковое число протонов (Z) и различное число нейтронов (N).

Изотопами называются также ядра таких атомов. Изотопы являются *нуклидами* одного элемента. Нуклид (от лат. *nucleus* — ядро) — любое атомное ядро (соответственно атом) с заданными числами Z и N . Общее обозначение нуклидов имеет вид ${}_Z^AX_N$, где X — символ химического элемента, $A = Z + N$ — массовое число.

Изотопы занимают одно и то же место в Периодической системе элементов, откуда и произошло их название. По своим ядерным свойствам (например, по способности вступать в ядерные реакции) изотопы, как правило, существенно отличаются. Химические (и почти в той же мере физические) свойства изотопов одинаковы. Это объясняется тем, что химические свойства элемента определяются зарядом ядра, поскольку именно он влияет на структуру электронной оболочки атома.

Исключением являются изотопы легких элементов. Изотопы водорода ${}^1\text{H}$ — *протий*, ${}^2\text{H}$ — *дейтерий*, ${}^3\text{H}$ — *тритий* столь сильно отличаются по массе, что и их физические и химические свойства различны. Дейтерий стабилен (т. е. не радиоактивен) и входит в качестве небольшой примеси (1 : 4500) в обычный водород. При соединении дейтерия с кислородом образуется тяжелая вода. Она при нормальном атмосферном давлении кипит при 101,2 °C и замерзает при +3,8 °C. Тритий β -радиоактивен с периодом полураспада около 12 лет.

У всех химических элементов имеются изотопы. У некоторых элементов имеются только нестабильные (радиоактивные) изотопы. Для всех элементов искусственно получены радиоактивные изотопы.

Изотопы урана. У элемента урана есть два изотопа — с массовыми числами 235 и 238. Изотоп ${}_{92}^{235}\text{U}$ составляет всего 1/140 часть от более распространенного ${}_{92}^{238}\text{U}$.

4.8.2. Ядерные силы

Поскольку протоны в ядре имеют одинаковый положительный заряд, они отталкиваются. Для того чтобы удержать их вместе, должны существовать силы, намного превышающие силы электрического и гравитационного взаимодействия. Эти силы называются *ядерными силами*. Они в 100 раз превосходят электрические (кулоновские) силы. Это самые мощные силы из всех, которыми располагает природа. Поэтому взаимодействие ядерных частиц относят к *сильным взаимодействиям* — особому типу взаимодействия, присущему большинству элементарных частиц наряду с электромагнитными взаимодействиями. Ядерные силы заметно проявляются лишь на расстояниях порядка 10^{-13} – 10^{-12} см, равных по порядку величины размерам ядра, что показали опыты Резерфорда по рассеянию α -частиц ядрами.

4.8.3. Энергия связи нуклонов в ядре

Устойчивость атомного ядра характеризуется энергией связи ($E_{\text{св}}$). Энергия связи — это энергия, которую надо затратить, чтобы расщепить ядро. Ее принято выражать в мегаэлектронвольтах (МэВ) ($1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$).

Под энергией связи ядра понимают ту энергию, которая необходима для полного расщепления ядра на отдельные нуклоны. На основании закона сохранения энергии можно также утверждать, что энергия связи равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц. Энергия связи атомных ядер очень велика. Определить ее можно, применяя соотношение Эйнштейна между массой и энергией: $E = mc^2$.

Точнейшие измерения показывают, что масса покоя ядра $M_{\text{я}}$ всегда меньше суммы масс покоя составляющих ее протонов и нейтронов: $M_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n$. Существует положительная разность масс, называемая *дефектом массы*: $\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}$. Для гелия масса ядра на 0,75 % меньше суммы масс двух протонов и двух нейтронов. Для одного моля гелия $\Delta M = 0,03 \text{ г}$.

Уменьшение массы при образовании ядра из нуклонов означает, что при этом уменьшается энергия этой системы нуклонов на значение энергии связи $E_{\text{св}}$:

$$E_{\text{св}} = \Delta Mc^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}})c^2.$$

Энергия связи переходит в энергию излучаемых при ядерных превращениях γ -квантов, которая равна как раз $E_{\text{св}}$, и масса которых $\Delta M = E_{\text{св}}/c^2$.

Удельной энергией связи называют энергию связи, приходящуюся на один нуклон ядра. Ее определяют экспериментально. Зависимость $E_{\text{уд}}$ от массового числа A приведена на рис. 4.13. Как видно из рисунка, удельная энергия связи примерно постоянна (не считая самых легких ядер) и равна 8 МэВ/нуклон. Слабый максимум (8,6 МэВ) приходится на элементы с массовыми числами от 50 до 60, т. е. на железо и близкие к нему по порядковому номеру элементы. Ядра этих элементов наиболее устойчивы.

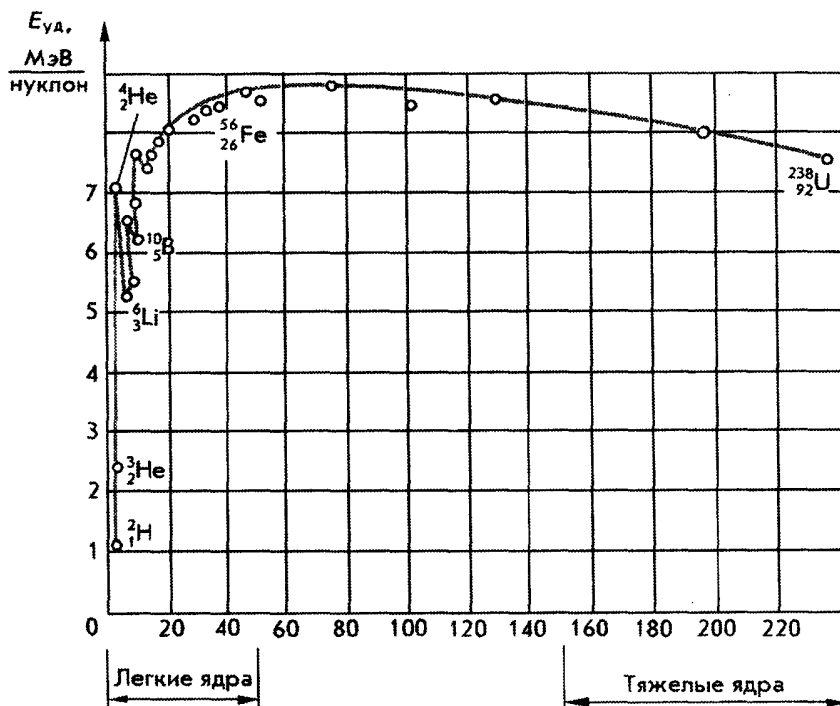


Рис. 4.13

У тяжелых ядер удельная энергия связи уменьшается за счет растущей с увеличением Z кулоновской энергии отталкивания протонов. Кулоновские силы стремятся разорвать ядро.

4.8.4. Радиоактивность

Радиоактивность (от лат. *radio* — излучаю и *activus* — деятельный) — свойство атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) изменять свой состав — заряд Z , массовое число A путем испускания элементарных частиц или ядерных фрагментов.

Открытие радиоактивности

Явление радиоактивности было открыто Беккерелем в 1896 г. при его исследованиях люминесценции солей урана: он обнаружил спонтанное испускание неизвестного излучения. Исследование других химических элементов на предмет радиоактивности позволило в 1898 г. Марии Склодовской-Кюри во Франции (и другим ученым) обнаружить свечение тория, а затем выделить неизвестный ранее элемент — полоний (названный так в честь родины Марии Кюри — Польши). Спустя некоторое время был открыт элемент радий, дающий очень интенсивное излучение. Явление самопроизвольного излучения по предложению Марии и Пьера Кюри было названо радиоактивностью. Вскоре Э. Резерфорд и супруги Кюри установили, что радиоактивное излучение состоит из лучей трех видов: α -лучей, состоящих из положительных α -частиц (являющихся ядрами гелия), β -лучей, или отрицательно заряженных β -частиц (которые оказались электронами), и γ -лучей, не имеющих заряда, которые оказались γ -квантами (жестким электромагнитным излучением). Классический опыт, позволивший обнаружить сложный состав радиоактивного излучения, изображен на рис. 4.14. На излучение препарата радия, помещенного на дно узкого канала в куске свинца, действовало сильное магнитное поле с линиями индукции, перпендикулярными лучу. Перпендикулярно каналу располагалась фотопластинка. Вся установка размещалась в вакууме. По отклонению луча определялся заряд частиц, его составляющих.

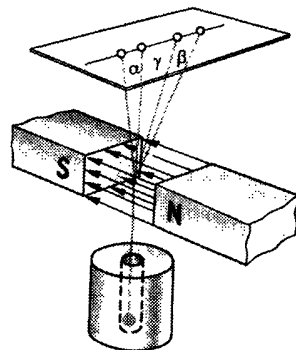


Рис. 4.14

Гамма-лучи

То, что это электромагнитная волна, было доказано опытами по дифракции на кристаллах. В ходе этих опытов была определена длина волны γ -лучей: от 10^{-8} до 10^{-11} см. Их проникающая способность гораздо выше, чем у рентгеновских лучей. На шкале электромагнитных волн γ -лучи следуют непосредственно за рентгеновскими. Скорость распространения, как у всех электромагнитных волн, — 300 000 км/с.

Бета-лучи

Бета-лучи были идентифицированы как электроны, движущиеся со скоростями, близкими к скорости света, по сильному отклонению как в магнитном, так и электрическом поле. Скорости β -частиц, испущенных радиоактивным элементом, различны, что приводит к расширению пучка (рис. 4.14).

Альфа-частицы

Альфа-частицы отклоняются в магнитном и электрическом полях меньше других, что затрудняло их идентификацию. Окончательно природу α -частиц удалось выяснить Э. Резерфорду. С помощью экспериментов в магнитном поле он определил соотношение заряда и массы. С по-

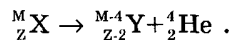
мощью счетчика Гейгера измерил количество частиц, испущенных препаратом за определенное время, а с помощью электрометра определил их суммарный заряд, рассчитав, таким образом, заряд одной α -частицы (+2). Экспериментально природа альфа-частиц была подтверждена с помощью спектрального анализа газа, образовавшегося за несколько дней в резервуаре, в котором Резерфорд собирал α -частицы. Каждая α -частица захватывала два электрона и превращалась в гелий.

Радиоактивные превращения. Альфа-, бета-, гамма-распад

В процессе исследования явления радиоактивности обнаружилось, что радиоактивные элементы в результате испускания радиоактивного излучения превращаются в другие элементы. При радиоактивном распаде происходит цепочка последовательных превращений атомов.

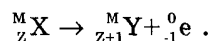
После того, как было открыто атомное ядро, сразу стало ясно, что именно оно претерпевает превращения при радиоактивных распадах. Ведь на электронных оболочках нет α -частиц, а уменьшение числа электронов оболочки превращает атом в ион, а не в новый химический элемент.

Правило смещения. Превращения ядер подчиняются так называемому правилу смещения, сформулированному впервые Содди: *при α -распаде ядро теряет положительный заряд $2e$, и масса его убывает приблизительно на четыре атомные единицы массы. В результате элемент смещается на две клетки к началу Периодической системы.* Это записывается так:



Здесь элемент обозначается общепринятыми символами. Заряд ядра указывается в виде индекса внизу слева от символа элемента, а атомная масса — в виде индекса слева сверху символа. Для α -частицы, являющейся ядром атома гелия, применяют обозначение ${}^4_2 \text{He}$.

При β -распаде атом теряет электрон. В результате заряд ядра увеличивается на единицу, масса остается почти неизменной:



Здесь ${}^0_{-1} e$ обозначает электрон: индекс 0 сверху означает, что масса его очень мала по сравнению с атомной единицей массы. После β -распада элемент смещается на одну клетку ближе к концу Периодической системы.

Гамма-излучение не сопровождается изменением заряда; масса же ядра меняется ничтожно мало.

Правила смещения показывают, что при радиоактивном распаде сохраняется суммарный электрический заряд и приблизительно сохраняется относительная атомная масса ядер.

Возникшие при радиоактивном распаде ядра обычно тоже радиоактивны.

4.8.5. Закон радиоактивного распада. Период полураспада

Резерфорд, исследуя превращения радиоактивных веществ, установил опытным путем, что их активность убывает с течением времени*. Так, активность радона убывает в два раза уже через одну минуту. Активность урана, тория и радия тоже убывает со временем, но гораздо медленнее. Происходящий со временем спад активности характеризуется периодом полураспада. *Период полураспада T — это время, в течение которого распадается половина наличного числа радиоактивных атомов.*

* Под активностью понимают число ядер, распадающихся в единицу времени.

Математически закон радиоактивного распада выражается формулой:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}. \quad (4.13)$$

Здесь N_0 — число радиоактивных атомов в начальный момент времени $t = 0$. По формуле (4.13) находят число нераспавшихся атомов N в любой момент времени.

Период полураспада — основная величина, определяющая скорость радиоактивного распада. Для разных веществ эта скорость может отличаться очень существенно. Так, период полураспада урана равен 4,5 млрд лет, радия — 1600 лет, в то же время есть радиоактивные элементы с периодом полураспада в миллионные доли секунды.

Следует отметить, что радиоактивный распад — статистический процесс. Радиоактивные атомы не «стареют». Нельзя сказать, какой именно атом распадется в данный момент времени. Можно определить лишь *среднее время жизни* τ ($\tau = \frac{T}{\ln 2}$) большого числа молекул. Закон радиоактивного распада определяет *среднее число атомов*, распадающихся за определенный интервал времени.

Говорить о законе радиоактивного распада для малого числа атомов не имеет смысла. Этот закон справедлив в среднем для большого количества частиц.

4.8.6. Экспериментальные методы регистрации элементарных частиц

Методы основаны на использовании систем в долгоживущем неустойчивом состоянии, в которых под действием пролетающей заряженной частицы происходит переход в устойчивое состояние.

Счетчик Гейгера

Счетчик Гейгера — детектор частиц, действие которого основано на возникновении самостоятельного электрического разряда в газе при попадании частицы в его объем. Изобретен в 1908 г. Х. Гейгером и Э. Резерфордом, позднее был усовершенствован Гейгером и Мюллером.

Счетчик Гейгера (рис. 4.15) состоит из металлического цилиндра — катода — и тонкой проволоочки, натянутой вдоль его оси — анода, заключенных в герметический объем, заполненный газом (обычно аргоном) под давлением порядка 100–260 гПа (100–260 мм рт. ст.). Между катодом и анодом прикладывается напряжение порядка 200–1000 В. Заряженная частица, попав в объем счетчика, образует некоторое количество электронно-ионных пар, которые движутся к соответствующим электродам и при большом напряжении на длине свободного пробега (на пути до следующего столкновения) набирают энергию, превосходящую энергию ионизации, и ионизируют молекулы газа. Образуется лавина, ток в цепи возрастает. С нагрузочного сопротивления импульс напряжения подается на регистрирующее устройство. Резкое увеличение падения напряжения на нагрузочном сопротивлении приводит к резкому уменьшению напряжения между анодом и катодом, разряд прекращается, и трубка готова к регистрации следующей частицы.

Счетчиком Гейгера регистрируют в основном электроны и γ -кванты (последние, правда, с помощью дополнительного материала, наносимого на стенки сосуда, из которых γ -кванты выбивают электроны).

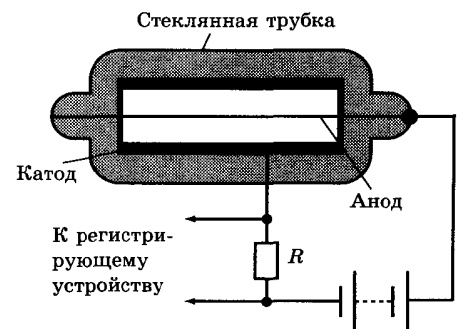


Рис. 4.15

Камера Вильсона

Камера Вильсона — трековый (от англ. *track* — след, траектория) детектор частиц.

Создана Ч. Вильсоном в 1912 г. С помощью камеры Вильсона был сделан ряд открытий в ядерной физике и физике элементарных частиц, таких, как открытие широких атмосферных ливней (в области космических лучей) в 1929 г., позитрона в 1932 г., обнаружение следов мюонов, открытие странных частиц.

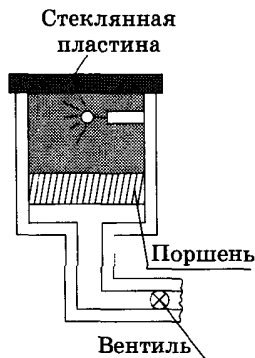


Рис. 4.16

В дальнейшем камера Вильсона была практически вытеснена пузырьковой

камерой как более быстродействующей. Камера Вильсона представляет собой сосуд, заполненный парами воды или спирта, близкими к насыщению (рис. 4.16). Действие ее основано на конденсации перенасыщенного пара (воды или спирта) на ионах, образованных пролетевшей частицей. Перенасыщенный пар создается резким опусканием поршня (см. рис. 4.16) (пар в камере при этом адиабатически расширяется, вследствие чего температура его резко падает).

Капельки жидкости, осевшие на ионах, делают видимым след пролетевшей частицы — *трек*, что дает возможность его сфотографировать. По длине трека можно определить энергию частицы, а по числу капелек на единицу длины трека — оценить ее скорость. Помещение камеры в магнитное поле позволяет определить по кривизне трека отношение заряда частицы к ее массе (впервые предложено советскими физиками П. Л. Капицей и Д. В. Скобельцыным).

Пузырьковая камера

Пузырьковая камера — прибор для регистрации следов (треков) заряженных частиц, действие которого основано на вскипании перегретой жидкости вдоль траектории частицы.

Первая пузырьковая камера (1954 г.) представляла собой металлическую камеру со стеклянными окнами для освещения и фотографирования, заполненную жидким водородом. В дальнейшем она создавалась и совершенствовалась во всех лабораториях мира, оснащенных ускорителями заряженных частиц. От колбочки объемом 3 см³ размер пузырьковой камеры достиг нескольких кубических метров. Большинство пузырьковых камер имеют объем 1 м³. За изобретение пузырьковой камеры Глейзеру в 1960 г. была присуждена Нобелевская премия.

Длительность рабочего цикла пузырьковой камеры составляет 0,1 с. Преимущество ее перед камерой Вильсона — в большей плотности рабочего вещества, позволяющей регистрировать частицы больших энергий.

4.8.7. Ядерные реакции

Ядерные реакции — это процессы, идущие при столкновении ядер или элементарных частиц с другими ядрами, в результате которых изменяются квантовое состояние и нуклонный состав исходного ядра, а также появляются новые частицы среди продуктов реакции.

При этом возможны *реакции деления*, когда ядро одного атома в результате бомбардировки (например, нейтронами) делится на два ядра разных атомов. При *реакциях синтеза* происходит превращение легких ядер в более тяжелые.

Искусственное превращение атомных ядер. Впервые в истории человечества искусственное (целенаправленное) превращение ядер осуществил Резерфорд в 1919 г. Бомбардируя α -частицами большой энергии, испускаемыми радием, ядра атома азота ${}^{14}_7\text{N}$, Резерфорд обнаружил появление протонов — ядер атома водорода. В первых опытах регистрация протонов проводилась методом

сцинтилляций, позднее более точно — в камере Вильсона. При этом ядро атома азота превращается в ядро изотопа кислорода:



Другими исследователями были обнаружены превращения под влиянием α -частиц ядер фтора, натрия, алюминия и др., сопровождающиеся испусканием протонов. Ядра тяжелых элементов не испытывали превращений. Очевидно, что их большой электрический заряд не позволял α -частице приблизиться к ядру вплотную.

Ядерная реакция на быстрых протонах

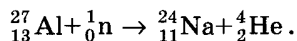
Для осуществления ядерной реакции необходимо приближение частиц вплотную к ядру, что возможно для частиц с очень большой энергией (особенно для положительно заряженных частиц, которые отталкиваются от ядра). Такая энергия (до 10^5 МэВ) сообщается в ускорителях заряженных частиц протонам, дейтронам и др. частицам. Этот метод гораздо эффективнее, чем использование ядер гелия, испускаемых радиоактивным элементом (энергия которых составляет около 9 МэВ).

Первая ядерная реакция на быстрых протонах была осуществлена в 1932 г. Удалось расщепить литий на две α -частицы:



Ядерные реакции на нейтронах

Открытие нейтронов явилось поворотным пунктом в исследовании ядерных реакций. Лишенные заряда нейтроны беспрепятственно проникают в атомные ядра и вызывают их изменения, например:



Великий итальянский физик Энрико Ферми обнаружил, что медленные нейтроны (около 10^4 эВ) более эффективны в реакциях ядерных превращений, чем быстрые нейтроны (около 10^5 эВ). Поэтому быстрые нейтроны замедляют в обыкновенной воде, содержащей большое число ядер водорода — протонов. Эффект замедления объясняется тем, что при столкновении шаров одинаковой массы происходит наиболее эффективная передача энергии.

Законы сохранения заряда, массового числа и энергии

Многочисленные эксперименты по различного рода ядерным взаимодействиям показали, что во всех без исключения случаях **сохраняется суммарный электрический заряд частиц**, участвующих во взаимодействии. Другими словами, суммарный электрический заряд частиц, вступающих в ядерную реакцию, равен суммарному электрическому заряду продуктов реакции (как это и следует ожидать согласно закону сохранения заряда для замкнутых систем). Кроме того, в ядерных реакциях обычного типа (без образования античастиц) наблюдается сохранение массового ядерного числа (т.е. полного числа нуклонов).

Сказанное подтверждается всеми приведенными выше типами реакций (суммы соответствующих коэффициентов при ядрах с левой и правой сторон уравнений реакции равны), см. табл. 4.2.

Оба закона сохранения относятся также и к ядерным превращениям типа радиоактивных распадов.

В соответствии с законом сохранения энергии изменение кинетической энергии в процессе ядерной реакции равно изменению энергии покоя участвующих в реакции ядер и частиц.

Энергетическим выходом реакции называется разность энергий покоя ядер и частиц до реакции и после реакции. Согласно сказанному ранее, энергетический выход ядерной реакции равен также изменению кинетической энергии частиц, участвующих в реакции.

Реакция	Электрический заряд	Массовое число
${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0n$	$4 + 2 = 6 + 0$	$9 + 4 = 12 + 1$
${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$	$7 + 2 = 8 + 1$	$14 + 4 = 17 + 1$
${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$	$3 + 1 = 2 + 2$	$7 + 1 = 4 + 4$
${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^1_0n \rightarrow {}^{24}_{11}\text{Na} + {}^4_2\text{He}$	$13 + 0 = 11 + 2$	$27 + 1 = 24 + 4$
${}^{239}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{239}_{93}\text{Np} + {}^0_{-1}e$	$92 = 93 - 1$	$239 = 239 + 0$
${}^{239}_{93}\text{Np} \rightarrow {}^{239}_{94}\text{Pu} + {}^0_{-1}e$	$93 = 94 - 1$	$239 = 239 + 0$

Если кинетическая энергия ядер и частиц после реакции больше, чем до реакции, то говорят о выделении энергии, в противном случае — о ее поглощении. Последний случай осуществляется при бомбардировке азота α -частицами (4.14), часть энергии переходит во внутреннюю энергию вновь образовавшихся ядер. При ядерной реакции (4.15) кинетическая энергия образовавшихся ядер гелия на 17,3 МэВ больше кинетической энергии вступавшего в реакцию протона.

4.8.8. Деление и синтез ядер

Деление ядер — процесс, при котором из одного атомного ядра возникают два (реже три) ядра-осколка, близких по массе.

Этот процесс выгоден для всех β -стабильных ядер с массовым числом $A > 100$.

Деление ядер урана было обнаружено в 1939 г. Ганом и Штрассманом, которые однозначно доказали, что при бомбардировке нейтронами ядер урана U появляются радиоактивные ядра с массами и зарядами, примерно в два раза меньшими, чем масса и заряд ядра U . В том же году Л. Мейтнер и О. Фриш ввели термин «деление ядер» и отметили, что при этом выделяется огромная энергия, а Ф. Жолио-Кюри и Э. Ферми одновременно обнаружили, что при делении происходит испускание нескольких нейтронов (*нейтроны деления*). На основании этого была выдвинута идея *самоподдерживающейся цепной реакции деления* и использования деления ядер в качестве источника энергии. Основой современной ядерной энергетики служит деление ядер ${}^{235}\text{U}$ и ${}^{239}\text{Pu}$ под действием нейтронов.

Деление ядра возможно благодаря тому, что масса покоя тяжелого ядра больше суммы масс покоя осколков, возникающих при делении. Из графика на рис. 4.13 понятно, что такой процесс энергетически выгоден.

Механизм деления ядра объясняется на основе *капельной модели*, согласно которой сгусток нуклонов напоминает капельку заряженной жидкости (рис. 4.17). Ядро удерживают от распада ядерные силы притяжения, большие, чем силы кулоновского отталкивания, действующие между протонами и стремящиеся разорвать ядро.

Ядро ${}^{235}\text{U}$ имеет форму шара. После поглощения нейтрона оно возбуждается и деформируется, приобретая вытянутую форму (рис. 4.17, б), и растягивается до тех пор, пока силы отталкивания между половинками вытянутого ядра не станут больше сил притяжения, действующих в перешейке (рис. 4.17, в). После этого ядро разрывается на две части (рис. 4.17, г). Осколки под действием кулоновских сил отталкивания разлетаются со скоростью, равной $1/30$ скорости света.

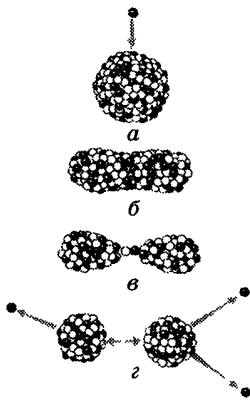


Рис. 4.17

Испускание нейтронов в процессе деления, о котором говорилось выше, объясняется тем, что относительное число нейтронов (по отношению к числу протонов) в ядре растет с увеличением атомного номера, и для образовавшихся при делении осколков число нейтронов оказывается большим, чем это допустимо для ядер атомов с меньшими номерами.

Деление обычно происходит на осколки неравной массы. Эти осколки радиоактивны. После серии β -распадов в конце концов получаются стабильные ионы.

Кроме вынужденного, описанного выше, существует и *спонтанное деление ядер урана*, открытое в 1940 г. советскими физиками Г. Н. Флеровым и К. А. Петржаком. Период полураспада для спонтанного деления равен 10^{16} лет, что в два миллиона раз больше периода полураспада при α -распаде урана.

Синтез ядер осуществляется в термоядерных реакциях. **Термоядерные реакции — это реакции слияния легких ядер при очень высокой температуре.** Выделяющаяся при слиянии (синтезе) энергия оказывается наибольшей при синтезе легких элементов, обладающих минимальной энергией связи. При соединении двух легких ядер, например, дейтерия и трития, образуется более тяжелое ядро гелия с большей энергией связи:



При таком процессе ядерного синтеза выделяется значительная энергия (17,6 Мэв), равная разности энергий связи тяжелого ядра ${}^4_2\text{He}$ и двух легких ядер ${}^2_1\text{H}$ и ${}^3_1\text{H}$. Образующийся при реакциях нейтрон приобретает 70% этой энергии. Сравнение энергии, приходящейся на один нуклон в реакциях ядерного деления (0,9 Мэв) и синтеза (17,6 Мэв), показывает, что *реакция синтеза легких ядер энергетически более выгодна, чем реакция деления тяжелых*.

Слияние ядер происходит под действием сил ядерного притяжения, поэтому они должны сблизиться до расстояний, меньших 10^{-14} м, на которых действуют ядерные силы. Этому сближению препятствует кулоновское отталкивание положительно заряженных ядер. Оно может быть преодолено только за счет большой кинетической энергии ядер, превышающей энергию их кулоновского отталкивания. Соответствующие расчеты показывают, что кинетическая энергия ядер, необходимая для реакции синтеза, может быть достигнута при температурах порядка сотен миллионов градусов, поэтому эти реакции называются *термоядерными*.

Термоядерный синтез — реакция, в которой при высокой температуре, большей 10^7 К, из легких ядер синтезируются более тяжелые.

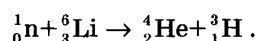
Термоядерный синтез — источник энергии всех звезд, в том числе, и Солнца.

Основным процессом, при котором происходит освобождение термоядерной энергии в звездах, является превращение водорода в гелий. За счет дефекта массы в этой реакции масса Солнца уменьшается каждую секунду на 4 млн тонн.

Большую кинетическую энергию, необходимую для термоядерного синтеза, ядра водорода получают в результате сильного гравитационного притяжения к центру звезды. Затем при слиянии ядер гелия образуются и более тяжелые элементы.

Термоядерные реакции играют решающую роль в эволюции химического состава вещества во Вселенной. Все эти реакции сопровождаются выделением энергии, излучаемой звездами в виде света на протяжении миллиардов лет.

Осуществление управляемого термоядерного синтеза предоставило бы человечеству новый, практически неисчерпаемый источник энергии. И дейтерий, и тритий, необходимые для его осуществления (4.16), вполне доступны. Первый содержится в воде морей и океанов (в количестве, достаточном для использования в течение миллиона лет), второй может быть получен в ядерном реакторе при облучении жидкого лития (запасы которого огромны) нейтронами:



Одним из важнейших преимуществ управляемого термоядерного синтеза является отсутствие радиоактивных отходов при его осуществлении (в отличие от реакций деления тяжелых ядер урана).

Главным препятствием на пути осуществления управляемого термоядерного синтеза является невозможность удержания высокотемпературной плазмы с помощью сильных магнитных полей в течение 0,1–1 с. Однако существует уверенность в том, что рано или поздно термоядерные реакторы будут созданы.

Пока же удалось осуществить лишь *неуправляемую реакцию* синтеза взрывного типа в водородной бомбе.

Цепные ядерные реакции

Ядерные цепные реакции — это ядерные реакции, в которых частицы, вызывающие их, образуются и как продукты этих реакций. Такой реакцией является деление урана и некоторых трансурановых элементов (например, ^{239}Pu) под действием нейтронов. Впервые она была осуществлена Э. Ферми в 1942 г. После открытия *деления ядер* У. Зинн, Л. Силард и Г. Н. Флеров показали, что при делении ядра урана U вылетает больше одного нейтрона: $n + \text{U} \rightarrow \text{A} + \text{B} + \nu$. Здесь A и B — осколки деления с массовыми числами A от 90 до 150, ν — число вторичных нейтронов.

Коэффициент размножения нейтронов. Для течения цепной реакции необходимо, чтобы среднее число освобожденных нейтронов в данной массе урана не уменьшалось со временем, или чтобы *коэффициент размножения нейтронов* k был больше или равен единице.

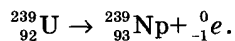
Коэффициентом размножения нейтронов называют отношение числа нейтронов в каком-либо поколении к числу нейтронов предшествующего поколения. Под сменой поколений понимают деление ядер, при котором поглощаются нейтроны старого поколения и рождаются новые нейтроны.

Если $k \geq 1$, то число нейтронов увеличивается с течением времени или остается постоянным, и цепная реакция идет. При $k < 1$ число нейтронов убывает, и цепная реакция невозможна.

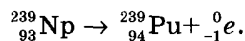
В силу ряда причин из всех ядер, встречающихся в природе, для осуществления цепной ядерной реакции пригодны лишь ядра изотопа $^{235}_{92}\text{U}$. Коэффициент размножения определяется: 1) захватом медленных нейтронов ядрами $^{235}_{92}\text{U}$ с последующим делением и захватом быстрых нейтронов ядрами $^{235}_{92}\text{U}$ и $^{238}_{92}\text{U}$, также с последующим делением; 2) захватом нейтронов без деления ядрами урана; 3) захватом нейтронов продуктами деления, замедлителем и конструктивными элементами установки; 4) вылетом нейтронов из делящегося вещества наружу.

Лишь первый процесс сопровождается увеличением числа нейтронов. Для стационарного течения реакции k должно быть равно 1. Уже при $k = 1,01$ почти мгновенно произойдет взрыв.

Образование плутония. В результате захвата изотопом урана $^{238}_{92}\text{U}$ нейтрона образуется радиоактивный изотоп $^{239}_{92}\text{U}$ с периодом полураспада 23 мин. При распаде возникает первый трансурановый элемент *нептуний*:



β -Радиоактивный нептуний (с периодом полураспада около двух дней), испуская электрон, превращается в следующий трансурановый элемент — плутоний:



Период полураспада плутония 24 000 лет, и его важнейшим свойством является способность делиться под влиянием медленных нейтронов так же, как и изотоп $^{235}_{92}\text{U}$. С помощью плутония может быть осуществлена цепная реакция с выделением огромного количества энергии.

Цепная реакция сопровождается выделением огромной энергии: при делении каждого ядра выделяется 200 МэВ. При делении 1 г ядер урана выделяется такая же энергия, как при сжигании 3 т угля или 2,5 т нефти.

Ядерный реактор

Ядерный реактор — это установка, содержащая ядерное топливо, в которой осуществляется управляемая цепная реакция деления.

Ядра урана, особенно изотопа $^{235}_{92}\text{U}$, наиболее эффективно захватывают медленные нейтроны, вероятность захвата которых с последующим делением ядер в сотни раз больше, чем быстрых. Поэтому в ядерных реакторах, работающих на естественном уране, используют замедлители нейтронов для повышения коэффициента размножения нейтронов.

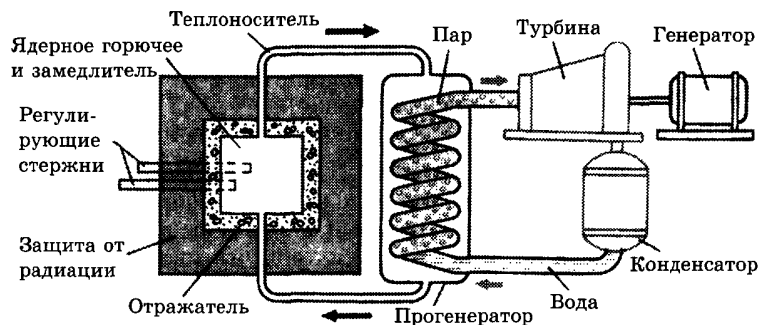


Рис. 4.18

Основными элементами ядерного реактора (рис. 4.18) являются: 1) ядерное горючее ($^{235}_{92}\text{U}$, $^{239}_{92}\text{Pu}$, $^{238}_{92}\text{U}$ и др.); 2) теплоноситель для вывода энергии, образующейся при работе реактора (вода, жидкий натрий и др.); 3) устройство для регулирования скорости реакции (вводимые в рабочее пространство реактора стержни, содержащие кадмий или бор — вещества, которые хорошо поглощают нейтроны).

Снаружи реактор окружает защитной оболочкой из бетона с железным наполнителем, задерживающей γ -излучение и нейтроны. Лучшим замедлителем считается тяжелая вода. Обычная вода сама захватывает нейтроны и превращается в тяжелую воду. Хорошим замедлителем является графит, ядра которого не поглощают нейтроны.

Критическая масса. Коэффициент размножения k может стать равным единице лишь при условии, что размеры реактора и соответственно масса урана превышают некоторые критические значения. *Критической массой называют наименьшую массу делящегося вещества, при которой может протекать цепная ядерная реакция.*

Критические размеры системы и соответственно критическая масса определяются типом ядерного горючего, замедлителем и конструктивными особенностями реактора. Для чистого (без замедлителя) $^{235}_{92}\text{U}$, имеющего форму шара, критическая масса приблизительно равна 50 кг. Радиус шара равен примерно 9 см (плотность урана очень велика). Применяя замедлители нейтронов и отражающую нейтроны оболочку из бериллия, удалось снизить критическую массу до 250 г.

Управление реактором осуществляется введением в активную зону стержней, позволяющих в любой момент приостановить развитие цепной реакции.

Реакторы на быстрых нейтронах работают без замедлителя на обогащенной смеси урана, содержащего не менее 15 % изотопа $^{235}_{92}\text{U}$. Их преимуществом является образование в процессе работы значительного количества плутония, который сам может быть использован в дальнейшем в качестве ядерного топлива. Такие реакторы называются *реакторами-размножителями*, поскольку они воспроизводят делящийся материал. *Коэффициент воспроизводства* таких реакторов достигает 1,5. Это означает, что в реакторе при делении 1 кг изотопа $^{235}_{92}\text{U}$ получается до 1,5 кг плутония. В обычных реакторах коэффициент воспроизводства достигает 0,6–0,7.

Примеры заданий ЕГЭ по теме 4.8. «Физика атомного ядра»

Часть 1

При выполнении заданий уровня А нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

1 2 3 4

- A1.** α -лучи представляют собой
- 1) поток нейтронов
 - 2) поток частиц с зарядом $+e$
 - 3) поток ядер атома гелия ${}^4_2\text{He}$
 - 4) поток лучей неизвестной природы

1 2 3 4

- A2.** β -частицы — это
- 1) осколки ядер урана, образованных в результате радиоактивного распада
 - 2) электромагнитное излучение рентгеновского диапазона
 - 3) космические лучи
 - 4) электроны

1 2 3 4

- A3.** γ -лучи представляют собой
- 1) электромагнитные волны — кванты электромагнитного излучения с длиной волны 10^{-3} – 10^{-11} см
 - 2) поток нейтральных частиц с массой электрона
 - 3) поток кварков
 - 4) электромагнитное излучение радиодиапазона

1 2 3 4

- A4.** Период полураспада радиоактивного вещества определяет:
- 1) время жизни данного атома
 - 2) время, по истечении которого распадается 1 кг радиоактивного вещества
 - 3) время, в течение которого распадается половина наличного количества атомов
 - 4) время полного распада всех наличных атомов

1 2 3 4

- A5.** Количество радиоактивного радона уменьшилось в 8 раз за 11,4 дня. Каков период полураспада радона?
- 1) 2 дня
 - 2) 4 дня
 - 3) 3,5 дня
 - 4) 3,8 дня

1 2 3 4

- A6.** Каков состав ядра кюрия ${}^{247}_{96}\text{Cm}$?
- 1) число протонов $Z = 151$, число нейтронов $N = 96$, массовое число $A = 237$
 - 2) число протонов $Z = 96$, число нейтронов $N = 151$, массовое число $A = 237$
 - 3) число протонов $Z = 96$, число нейтронов $N = 151$, массовое число $A = 247$
 - 4) число протонов $Z = 247$, число нейтронов $N = 151$, массовое число $A = 96$

1 2 3 4

- A7.** В реакции ${}^{55}_{25}\text{Mn} + ? \rightarrow {}^{55}_{26}\text{Fe} + {}^1_0n$ вместо вопросительного знака следует вписать
- 1) ${}^4_2\text{He}$
 - 2) ${}^1_1\text{H}$
 - 3) β
 - 4) ${}^2_1\text{H}$

A8. Ядерные силы относятся к следующему типу взаимодействия:

- 1) гравитационному с радиусом действия ∞
- 2) электромагнитному с радиусом действия ∞
- 3) сильному с радиусом действия 10^{-15} м
- 4) слабому с радиусом действия 10^{-17} м

A9. Число электронов и число протонов в нейтральном атоме ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ составляет

- 1) 60 и 20
- 2) 40 и 25
- 3) 20 и 20
- 4) 30 и 30

A10. Энергия связи приходящаяся на один нуклон изотопа ${}^{15}_7\text{N}$ составляет

- 1) 7,7 МэВ
- 2) 5,6 МэВ
- 3) 8,1 МэВ
- 4) 6,1 МэВ

Часть 2

Ответом к заданиям B1—B5 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

B1. Активность радиоактивного элемента уменьшилась в 4 раза за 8 дней. Найдите период полураспада. Ответ дайте в днях.

 B1

B2. Какое количество α - и β -распадов радиоактивного ${}^{236}_{82}\text{Pb}$ приводит к образованию ${}^{40}_{20}\text{Ca}$?

 B2

B3. При упругом центральном столкновении нейтрона с неподвижным ядром замедляющего вещества кинетическая энергия нейтрона уменьшилась в 1,4 раза, а направление скорости изменилось на обратное. Какова масса ядер замедляющего вещества? Ответ дайте в а.е.м.

 B3

B4. Определите энергетический выход ядерной реакции ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$. Ответ дайте в МэВ.

 B4

B5. Неподвижный нейтральный π -мезон, распадаясь превращается в два одинаковых фотона. Определите энергию каждого фотона, если масса покоя π -мезона $M = 264,2m_e$. Ответ дайте в МэВ.

 B5

Часть 3

Полное правильное решение задачи C1 должно включать законы и формулы, применение которых необходимо и достаточно для решения задачи, а также математические преобразования, расчеты с численным ответом и, при необходимости, рисунок, поясняющий решение.

C1. Запишите ядерную реакцию, происходящую при бомбардировке атомов бора ${}^{11}_5\text{B}$ α -частицами, сопровождающуюся выбиванием нейтронов.

Тренировочный тест к разделу 4
«Основы специальной теории относительности. Квантовая физика»

Часть 1

При выполнении заданий этой части нужно поставить знак «х» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного варианта ответа.

A1 1 2 3 4

A1. Энергия излучения с длиной волны 1 мкм составляет 10^{-7} Дж. Число фотонов в излучении равно

- | | |
|----------------------|----------------------|
| 1) $5 \cdot 10^{11}$ | 3) $3 \cdot 10^9$ |
| 2) $1 \cdot 10^{10}$ | 4) $8 \cdot 10^{11}$ |

A2 1 2 3 4

A2. Минимальная энергия γ -кванта, необходимая для осуществления реакции ${}^2_1\text{H} + \gamma \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^1_0\text{n}$, составляет

- | | |
|------------|------------|
| 1) 5,1 МэВ | 3) 151 МэВ |
| 2) 2,2 МэВ | 4) 3,2 МэВ |

A3 1 2 3 4

A3. Зная величину задерживающего напряжения $U_3 = 7,9$ В и длину волны света $\lambda = 0,1$ мкм, вырывающего электроны, определите работу выхода из металла.

- | | |
|-----------|-----------|
| 1) 5,5 эВ | 3) 4,5 эВ |
| 2) 3 эВ | 4) 1,5 эВ |

A4 1 2 3 4

A4. Работа выхода электронов для натрия равна 2,27 эВ. Следовательно, красная граница фотоэффекта для натрия составляет

- | | |
|-----------|-----------|
| 1) 450 нм | 3) 600 нм |
| 2) 180 нм | 4) 560 нм |

A5 1 2 3 4

A5. Напряжение, под которым должна работать рентгеновская трубка, чтобы минимальная длина волны излучения равнялась 1 нм, составляет

- | | |
|-----------|-----------|
| 1) 2,5 кВ | 3) 1,2 кВ |
| 2) 5,8 кВ | 4) 1,7 кВ |

A6 1 2 3 4

A6. Скорость, с которой должен двигаться электрон, чтобы количество его движения равнялось количеству движения фотона с $\lambda = 520$ нм

- | | |
|-------------|------------|
| 1) 1400 м/с | 3) 180 м/с |
| 2) 2500 м/с | 4) 800 м/с |

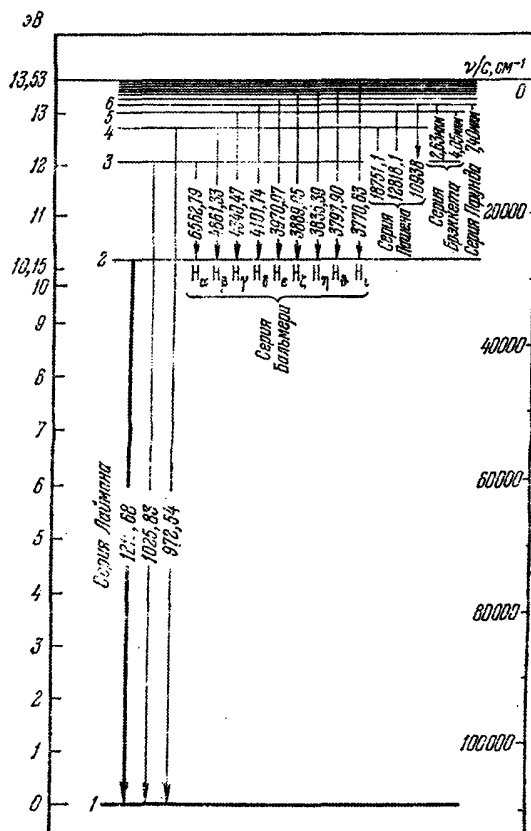
A7 1 2 3 4

A7. Наименьшая энергия, которую должны иметь электроны, чтобы при соударении с атомом водорода вызвать свечение всех линий всех серий атома водорода, составляет (см. рисунок к A8)

- | | |
|------------|------------|
| 1) 15 эВ | 3) 17,1 эВ |
| 2) 13,6 эВ | 4) 11 эВ |

- A8. В каких пределах должна лежать энергия электронов E при бомбардировке ими атомов водорода, чтобы в спектре последнего (см. рисунок) появилась только одна линия излучения и какова длина волны этой линии?

1 2 3 4 A8



- 1) $10,2 \text{ эВ} \leq E \leq 12,1 \text{ эВ}$, $\lambda = 121,5 \text{ нм}$
- 2) $1,2 \text{ эВ} \leq E \leq 5,1 \text{ эВ}$, $\lambda = 250,5 \text{ нм}$
- 3) $14 \text{ эВ} \leq E \leq 17,1 \text{ эВ}$, $\lambda = 340,8 \text{ нм}$
- 4) $2 \text{ эВ} \leq E \leq 5,1 \text{ эВ}$, $\lambda = 400,7 \text{ нм}$

- A9. В каких пределах должны лежать длины волн монохроматического света, чтобы при возбуждении атома водорода (см. рисунок к A8) квантами этого света наблюдались три спектральные линии?

1 2 3 4 A9

- 1) $80,3 \text{ нм} \leq \lambda \leq 150,6 \text{ нм}$
- 2) $97,3 \text{ нм} \leq \lambda \leq 102,6 \text{ нм}$
- 3) $101,5 \text{ нм} \leq \lambda \leq 505 \text{ нм}$
- 4) $50,5 \text{ нм} \leq \lambda \leq 80,7 \text{ нм}$

- A10. Электрон, пройдя разность потенциалов $4,9 \text{ В}$, сталкивается с атомом ртути и переводит его в первое возбужденное состояние. Длина волны фотона, соответствующая переходу атома ртути в нормальное состояние, равна

1 2 3 4 A10

- 1) 150 нм
- 2) 313 нм
- 3) 405 нм
- 4) 254 нм

- A11. Сколько квантов различных энергий могут испустить атомы водорода, электроны которых находятся на третьей орбите?

1 2 3 4 A11

- 1) 3
- 2) 1
- 3) 2
- 4) 4

1 2 3 4

A12. При электрическом разряде в трубке, наполненной ${}_{86}\text{Kr}$, излучаются световые кванты, соответствующие разности энергий двух состояний атома $E_2 - E_1 = 3,278 \cdot 10^{-19}$ Дж. Каковы цвет и длина волны этого излучения? (Длина волны этого излучения с 1960 по 1983 гг. была эталоном длины, принятым во всем мире).

- 1) $\approx 580,1$ нм, желтый
- 2) $\approx 650,3$ нм, красный
- 3) $\approx 605,8$ нм, оранжевый
- 4) $\approx 550,5$ нм, зеленый

1 2 3 4

A13. Лазер мощностью 20 Вт испускает 10^{20} фотонов в секунду. Длина волны излучения этого лазера равна

- 1) ≈ 3 мкм
- 2) ≈ 5 мкм
- 3) ≈ 1 мкм
- 4) $\approx 2,5$ мкм

1 2 3 4

A14. Какое свойство лазерного излучения позволило произвести локацию ряда планет, таких, как Венера, Марс, Юпитер?

- 1) большая мощность излучения
- 2) когерентность излучения
- 3) монохроматичность излучения
- 4) очень малая расходимость пучка

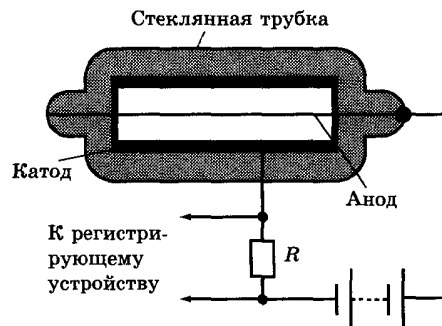
1 2 3 4

A15. Какое свойство лазерного излучения позволяет делать отверстия в сверхтвердых металлах и алмазах?

- 1) большая мощность излучения
- 2) когерентность излучения
- 3) монохроматичность излучения
- 4) очень малая расходимость пучка

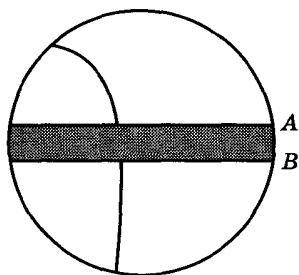
1 2 3 4

A16. Регистрирующее устройство счетчика Гейгера (см. рисунок) — вольтметр — показывает 20 В. Сколько пар одновалентных ионов образовалось в счетчике, если емкость его равна 24 пФ?



- 1) $3 \cdot 10^9$
- 2) $7 \cdot 10^9$
- 3) $9 \cdot 10^{11}$
- 4) $1 \cdot 10^9$

- A17. На рисунке показан трек частицы в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле ($\vec{B}$ перпендикулярно плоскости чертежа и направлено от читателя). Частица прошла через слой свинца AB . Каков знак заряда частицы? Как двигалась частица: сверху вниз или снизу вверх?



- 1) положительный, снизу вверх 3) положительный, сверху вниз
2) отрицательный, сверху вниз 4) отрицательный, снизу вверх

- A18. Какого вида излучение регистрирует счетчик Гейгера, если радиоактивный препарат установлен на расстоянии 10 см от счетчика?

- 1) α -частицы 3) β - и γ -излучение
2) все виды излучения 4) α - и β -частицы

- A19. Если из ядра выбрасывается протон, то массовое число M и порядковый номер элемента Z изменяются следующим образом:

- 1) M увеличивается на 1, Z не изменяется
2) M уменьшается на 1, Z уменьшается на 1
3) M не изменяется, Z уменьшается на 1
4) не изменяются

- A20. Доля радиоактивного изотопа, распавшегося за время его жизни, составляет

- 1) 50,2% 2) 45,3% 3) 71,5% 4) 63,2%

- A21. Радиоактивный изотоп технеция ${}_{43}^{95}\text{Tc}$, не обнаруженный в природе, был получен искусственно в результате реакции: ${}_{42}^{94}\text{Mo} + {}_1^2\text{H} \rightarrow {}_{43}^{95}\text{Tc} + ?$, в которой вместо «?» следует вставить

- 1) ${}_1^1\text{p}$ 2) ${}_0^1\text{n}$ 3) ${}_2^4\text{He}$ 4) ${}_1^1\text{H}$

- A22. В результате бомбардировки бора ${}_5^{11}\text{B}$ быстрыми протонами ${}_1^1\text{H}$ в камере Вильсона получены три почти одинаковых следа частиц. Это

- 1) ядра дейтерия ${}_1^2\text{H}$ 3) ядра гелия ${}_2^4\text{He}$
2) ядра водорода ${}_1^1\text{H}$ 4) нейтроны ${}_0^1\text{n}$

- A23. Какая из частиц: α или β сильнее отклоняется магнитным полем? Сравните радиусы кривизны R_α и R_β при скоростях $v_\beta = 15v_\alpha$ в поле с $\vec{B} \perp \vec{v}$.

- 1) β -частица отклоняется сильнее, $\frac{R_\alpha}{R_\beta} = 240$
2) α -частица отклоняется сильнее, $\frac{R_\alpha}{R_\beta} = 0,12$
3) β -частица отклоняется сильнее, $\frac{R_\alpha}{R_\beta} = 10$
4) отклонение одинаково, $\frac{R_\alpha}{R_\beta} = 1$

1 2 3 4

1 2 3 4

1 2 3 4

1 2 3 4

1 2 3 4

1 2 3 4

1 2 3 4

A24 1 2 3 4

A24. Укажите длину волны де Бройля для электрона, движущегося по первой боровской орбите $r_1 = 0,53 \cdot 10^{-10}$ м в атоме водорода

- 1) $\lambda_B = 0,55$ нм
- 2) $\lambda_B = 0,73$ нм
- 3) $\lambda_B = 0,33$ нм
- 4) $\lambda_B = 0,91$ нм

A25 1 2 3 4

A25. Вычислите длину волны де Бройля протона, энергия которого равна 10^{-18} Дж

- 1) $\lambda_B = 1 \cdot 10^{-11}$ м
- 2) $\lambda_B = 7 \cdot 10^{-10}$ м
- 3) $\lambda_B = 9 \cdot 10^{-12}$ м
- 4) $\lambda_B = 5 \cdot 10^{-13}$ м

Часть 2

Ответом к заданиям В1—В3 будет некоторое число. Это число нужно записать без указания единиц измерения физических величин.

B1

B1. В опыте Столетова заряженная отрицательно цинковая пластинка облучалась светом вольтовой дуги. До какого максимального отрицательного потенциала зарядится цинковая пластинка, если она будет облучаться монохроматическим светом длиной волны 324 нм (ближний ультрафиолетовый свет)?

B2

B2. Квант света с энергией 14,5 эВ выбивает фотоэлектрон из атома водорода. Какова скорость электрона вдали от атома?

B3

B3. На дифракционную решетку нормально падает пучок света от разрядной трубки, наполненной атомарным водородом. Постоянная решетки равна $5 \cdot 10^{-4}$ см. Переходу электрона между какими уровнями ($n \rightarrow k$) соответствует спектральная линия, наблюдаемая при помощи этой решетки в спектре пятого порядка под углом 41° ?

В заданиях В4—В5 на установление соответствия требуется указать последовательность цифр, соответствующих правильному ответу.

B4

B4. Установите соответствие между частицей (левый столбец) и формулой для вычисления длины волны де Бройля частицы λ по ее энергии E (правый столбец).

А) Квант света

Б) Классическая частица, движущаяся со скоростью $v \ll c$

В) Релятивистская частица, движущаяся со скоростью, близкой к скорости света

1) $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}}$

2) $\lambda = \frac{hc}{E}$

3) $\lambda = \frac{h \cdot c}{\sqrt{E^2 - m^2 c^4}}$

Впишите во вторую строку таблицы номера правильных ответов.

А	Б	В

В5. Установите соответствие между типом взрыва (левый столбец) и условиями, ограничивающими его мощность (правый столбец).

- | | |
|-----------------------|--|
| А) Атомный взрыв | 1) запасы сырья |
| Б) Термоядерный взрыв | 2) нет таких условий |
| | 3) критическая масса отдельных кусков горючего |

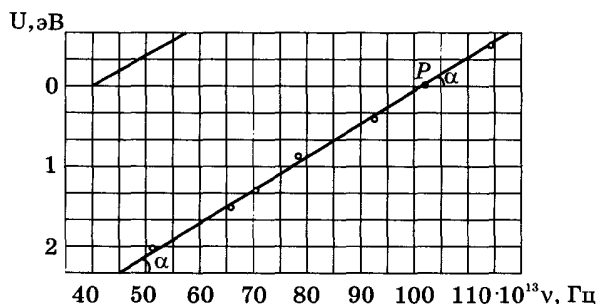
Впишите во вторую строку таблицы номера правильных ответов.

А	Б

Часть 3

Полное правильное решение каждой задачи С1–С6 должно включать законы и формулы, применение которых необходимо и достаточно для решения задачи, а также математические преобразования, расчеты с численным ответом и, при необходимости, рисунок, поясняющий решение.

- С1. Пользуясь приведенным на рисунке экспериментальным графиком зависимости задерживающего напряжения U_z от частоты падающего света ν (опыты Милликена, 1916 г., подтвердившие теоретическое уравнение Эйнштейна для фотоэффекта), рассчитайте постоянную Планка h , работу выхода A и красную границу фотоэффекта ν_0 и λ_0 для исследуемого металла.



- С2. Электроны, падающие на алюминиевую фольгу, дают дифракционную картину, причем угловое отклонение спектра первого порядка $\varphi = 1^\circ$. Постоянная решетки алюминия $a = 4,05$ А. Какова скорость электронов?
- С3. Какова должна быть скорость v микрочастицы массой m (например, электрона, нейтрона, протона), чтобы при рассеянии на монокристалле с постоянной решетки a наблюдалась четкая дифракционная картина?
- С4. При какой температуре кинетическая энергия молекулы двухатомного газа равна энергии фотона с длиной волны $\lambda = 5,89 \cdot 10^{-4}$ мм?
- С5. α -частица движется по окружности радиусом 0,83 см в однородном магнитном поле, индукция которого 0,025 Тл. Найдите длину волны де Бройля для этой α -частицы.

Ответы к примерам заданий ЕГЭ

1.1

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2
4	1	1	3	2	1	4	10,1	3

1.2

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	C1
2	3	3	4	3	1	4	0,4	~7100	14	2143	$\mu = \operatorname{tg} \alpha$

1.3

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5
1	1	4	4	3	4	2	155	7,2	20	0,04	0,22

1.4

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	C1
3	2	3	2	3	4	4	3,3	2	-343	2311	$v'_1 = \frac{2m_2 v_2 + v_1(m_1 - m_2)}{m_1 + m_2} = 1,16 \text{ м/с};$ $v'_2 = \frac{2m_1 v_1 + v_2(m_2 - m_1)}{m_1 + m_2} = 0,66 \text{ м/с}.$

1.5

A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
3	4	4	2	3	0	7,4	1	36452	23541

Ответы к тренировочному тесту к разделу 1

Часть 1

№ задания	Ответ	№ задания	Ответ	№ задания	Ответ
A1	2	A11	1	A21	2
A2	1	A12	3	A22	3
A3	3	A13	4	A23	1
A4	1	A14	2	A24	1
A5	3	A15	1	A25	3
A6	2	A16	3		
A7	3	A17	1		
A8	4	A18	1		
A9	3	A19	4		
A10	3	A20	3		

Часть 2

№ задания	Ответ
B1	9
B2	> 60
B3	67,5
B4	≈ 1,7
B5	2147365

Часть 3

№ задания	Ответ
C1	$t_1 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{R}{g}}; t_2 = 2\sqrt{\frac{R}{g}}; t_2 > t_1.$
C2	$T = 2\pi \sqrt{\frac{(h + R_3)^3}{GM_3}}.$
C3	$h = \frac{R}{3}.$
C4	$h = \frac{l(F_{\text{в}} - mg)}{2mg} = 0,88 \text{ м}.$
C5	$a_2 = \frac{2m_1 - m_2}{4m_1 + m_2} g \approx 3,3 \text{ м/с}^2; a_1 = 2a_2 \approx 6,5 \text{ м/с}^2; F_{\text{в}} = \frac{3m_1 m_2}{4m_1 + m_2} g = 13,1 \text{ Н}.$
C6	$\rho = \frac{R_1^3 (\rho_2 - \rho_1) + R_2^3 \rho_1}{R_2^3}.$

Ответы к примерам заданий ЕГЭ

2.1

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3
3	3	2	4	2	1	2	3	4	0,3	83000	231

2.2

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A7	B1	B2	B3
2	2	4	3	1	1	4	1	~4	74	248; 357; 169

Ответы к тренировочному тесту к разделу 2

Часть 1

№ задания	Ответ	№ задания	Ответ	№ задания	Ответ
A1	2	A11	3	A21	4
A2	3	A12	1	A22	4
A3	2	A13	3	A23	1
A4	1	A14	4	A24	2
A5	1	A15	4	A25	1
A6	3	A16	2		
A7	3	A17	1		
A8	4	A18	1		
A9	3	A19	1		
A10	3	A20	2		

Часть 2

№ задания	Ответ
B1	1,5
B2	22700
B3	111
B4	3415
B5	4123

Часть 3

№ задания	Ответ
C1	$V_2 = \frac{V_1 T_2 (p_1 + p_a)}{(\rho g h + p_a)} \approx 582,3 \text{ л.}$
C2	$Q = \frac{p V i}{2} \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \approx 6,1 \text{ кДж.}$
C3	$v = \sqrt{2(c\Delta T + \lambda)} = 356 \text{ м/с.}$
C4	$A' = p_1 (V_2 - V_1) = 400 \text{ кДж; } \Delta U = \frac{i}{2} (p_1 \Delta V + V_2 \Delta p) = 3,25 \text{ МДж;}$ $Q = A' + \Delta U = 3,65 \text{ МДж.}$
C5	$N = \frac{p_1 V_1 T_2}{p_2 V_2 T_1} = 3745.$
C6	$\Delta U = \frac{i}{2} p_1 \Delta V = 1,5 \text{ кДж.}$

Ответы к примерам заданий ЕГЭ

3.1

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	B1	B2	B3	B4
3	2	4	1	4	3	3	2	400	$1,8 \cdot 10^{-6}$	6	360

3.2

A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5
4	1	3	3	4	1	0,064	11,8	~1,7	~807	634; 56

3.3

A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5
2	2	1	4	3	3	$4,8 \cdot 10^{-14}$	5	$\approx 10^4$	0,05	1122

3.4

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4
3	1	2	1	2	3	3	3,2	12,7	36810; 14579	231

3.5

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3
4	1	4	1	3	3	1	3	3	$5 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	2500

3.6

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4
4	3	2	1	2	1	1	4	$1,76 \cdot 10^8$	0,8	3,75

Ответы к тренировочному тесту к разделу 3

Часть 1

№ задания	Ответ	№ задания	Ответ	№ задания	Ответ
A1	3	A11	1	A21	1
A2	3	A12	1	A22	3
A3	1	A13	2	A23	2
A4	2	A14	2	A24	3
A5	1	A15	1	A25	1
A6	3	A16	2		
A7	4	A17	1		
A8	3	A18	2		
A9	2	A19	3		
A10	2	A20	4		

Часть 2

№ задания	Ответ
B1	4,6
B2	6,5
B3	14,5
B4	0,5
B5	245631

Часть 3

№ задания	Ответ
C1	$r_m = \sqrt{Rm\lambda}.$
C2	$2nh \cdot \cos r = (2m + 1) \frac{\lambda}{2};$ $2nh \cdot \cos r = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2...);$ $h = 0,26 \text{ мкм}.$
C3	$\sin\left(\frac{\gamma + \theta}{2}\right) = n \sin \frac{\gamma}{2}.$
C4	$R_x = R \cdot \frac{R_1}{R_2} = 12,5 \text{ Ом}.$
C5	$T = \frac{2\pi m}{eB};$ $h = \frac{2\pi m v_0 \cos \alpha}{eB}.$
C6	$P_{\text{сум}} = m_e I \cdot l = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$

Ответы к примерам заданий ЕГЭ

4.1-4.5

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5
4	1	2	3	4	4	4	0,436	$7 \cdot 10^{12}$	$2,6 \cdot 10^8$	7,1	0,866

4.6

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
4	3	1	4	1	2	4	$4,4 \cdot 10^{-18}$	$2,2 \cdot 10^{-18}$	$3,3 \cdot 10^{-15}$	$2 \cdot 10^7$	$9 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^{19}$	$1,67 \cdot 10^{27}$

4.7

A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5
4	3	1	4	1	3	$1,1 \cdot 10^7$	$1,21 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-19}$	654	4; 357; 126

4.8

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	B1	B2	B3	B4	B5	C1
3	4	1	3	4	3	2	3	3	1	4	8; 6	12	17,3	67,5	${}^{11}_5\text{B} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^1_0n.$

Ответы к тренировочному тесту к разделу 4

Часть 1

№ задания	Ответ	№ задания	Ответ	№ задания	Ответ
A1	1	A11	1	A21	2
A2	2	A12	2	A22	3
A3	3	A13	3	A23	1
A4	4	A14	4	A24	3
A5	3	A15	1	A25	3
A6	1	A16	1		
A7	2	A17	1		
A8	1	A18	3		
A9	3	A19	2		
A10	4	A20	4		

Часть 2

№ задания	Ответ
B1	1,71
B2	$5,6 \cdot 10^5$
B3	$3 \rightarrow 2$
B4	213
B5	32

Часть 3

№ задания	Ответ
C1	$h = \operatorname{tg} \alpha = 6,4 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с};$ $\nu_0 = PO \approx 1,025 \cdot 10^{15} \text{ Гц}; \lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} \approx 293 \text{ нм.}$ $A = h\nu_0 \approx 4,1 \text{ эВ.}$
C2	$v = \frac{h}{m_e \cdot a \cdot \sin \varphi} = 1 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$
C3	$v \approx \frac{h}{am}.$
C4	$T = \frac{2h \cdot c}{5k \cdot \lambda} = 9744 \text{ К.}$
C5	$\lambda_B = \frac{h}{RBq} = 0,1 \text{ А.}$
C6	$\lambda_B = \frac{hc}{\sqrt{eU(2mc^2 + eU)}}.$



Физические постоянные

Заряд электрона	$e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,486 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00728 \text{ а.е.м.}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00866 \text{ а.е.м.}$
Скорость света в вакууме	$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Гравитационная постоянная	$G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$
Постоянная Планка	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с},$ $h = 1,054887 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Молярная газовая постоянная	$R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ $R = k \cdot N_A$
Энергия покоя электрона	$E_{0e} = 8,187 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} = 0,511 \text{ МэВ}$
Энергия покоя протона	$E_{0p} = 1,503 \cdot 10^{10} \text{ Дж} = 938,26 \text{ МэВ}$
Энергия покоя нейтрона	$E_{0n} = 1,505 \cdot 10^{10} \text{ Дж} = 939,55 \text{ МэВ}$
Коэффициент взаимосвязи массы и энергии	$c^2 = 8,9874 \cdot 10^{16} \text{ Дж/кг} = 931,5 \text{ МэВ/а.е.м.}$
Отношение заряда электрона к его массе	$\frac{ e }{m_e} = 1,759 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Отношение заряда протона к его массе	$\frac{m_p}{m_e} = 1836,15152$
Атомная единица массы	$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 931,5 \text{ МэВ}$ $1 \text{ МэВ} = 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$
Ускорение свободного падения	$g = 9,80665 \text{ м/с}^2$

Объем моля идеального газа при нормальных условиях ($p_0 = 7101325 \text{ Па}$; $T_0 = 273,15 \text{ °К}$)	$V = 22,41383 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$
Нормальное атмосферное давление	$p_0 = 760 \text{ мм рт.ст.} = 101325 \text{ Па}$

Некоторые астрономические величины

Средний радиус Земли	$\sim 6371 \text{ км}$
Масса Солнца	$1,97 \cdot 10^{30} \text{ кг}$
Масса Земли	$6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$
Масса Луны	$7,4 \cdot 10^{22} \text{ кг}$
Расстояние от Земли до Луны	$3,8 \cdot 10^8 \text{ м}$

Множители и приставки СИ для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Приставка		Множитель
Наименование	Обозначение	
экса	Э	$1\,000\,000\,000\,000\,000\,000 = 10^{18}$
пета	П	$1\,000\,000\,000\,000\,000 = 10^{15}$
тера	Т	$1\,000\,000\,000\,000 = 10^{12}$
гига	Г	$1\,000\,000\,000 = 10^9$
мега	М	$1\,000\,000 = 10^6$
кило	к	$1000 = 10^3$
гекто	г	$100 = 10^2$
дека	да	$10 = 10^1$
деци	д	$0,1 = 10^{-1}$
санти	с	$0,01 = 10^{-2}$
милли	м	$0,001 = 10^{-3}$
микро	мк	$0,000\,001 = 10^{-6}$
нано	н	$0,000\,000\,001 = 10^{-9}$
пико	п	$0,000\,000\,000\,001 = 10^{-12}$

Единицы для измерения малых длин

Единица длины	Обозначение	м
Микрометр	мкм	10^{-6}
Нанометр	нм	10^{-9}
Ангстрем	Å	10^{-10}
Пикометр	пм	10^{-12}

Плотности веществ

Плотность твердых веществ

Вещество	10^3 кг/м^3	Вещество	10^3 кг/м^3
Алмаз	3,5	Никелин	8,8
Алюминий	2,7	Никель	8,8
Антрацит	1,5	Олово	7,3
Береза (сухая)	0,7	Парафин	0,9
Бетон (среднее значение)	2,2	Песок (сухой)	1,5
Вольфрам	19,0	Платина	21,5
Графит	2,1	Поваренная соль	2,1
Гранит	2,6	Пробка	0,2
Дуб (сухой)	0,8	Свинец	11,4
Ель (сухая)	0,6	Серебро	10,5
Железо	7,8	Сосна сухая	0,5
Золото	19,3	Сталь	7,9
Каменный уголь	1,3	Стекло (бутылочное)	2,7
Кирпич	1,8	Стекло (оконное)	2,5
Латунь	8,5	Фарфор	2,3
Лед	0,9	Цемент	1,4
Медь	8,9	Цинк	7,1
Мед	2,4	Чугун	7,0
Мрамор	2,7	Эбонит	1,8

Плотность жидкостей

Вещество	10^3 кг/м^3	Вещество	10^3 кг/м^3
Бензин	0,70	Насыщенный раствор медного купороса	1,15
Вода (4 °C)	1,00	Ртуть (0 °C)	13,60
Вода морская	1,03	Серная кислота (крепкая)	1,84
Глицерин	1,26	Скипидар	0,86
Керосин	0,80	Спирт	0,80
Масло оливковое	0,92	Эфир	0,72
Нефть	0,76		

Плотность газов при 0 °С и давлении 760 мм рт. ст.

Вещество	кг/м³	Вещество	кг/м³
Азот	1,25	Гелий	0,18
Аммиак	0,77	Кислород	1,43
Ацетилен	1,17	Неон	0,90
Воздух	1,29	Углекислый газ	1,98
Водород	0,09	Хлор	3,21

Удельная теплоемкость некоторых веществ, Дж/(кг · °К)

Твердые вещества

Вещество	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{К}}$	Вещество	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{К}}$
Алюминий	920	Парафин	3200
Бетон	880	Песок	970
Дерево	2400	Платина	125
Железо, сталь	460	Сера	712
Золото	130	Свинец	130
Кирпич	750	Серебро	250
Латунь	380	Стекло	840
Лед (снег)	2090	Цемент	800
Медь	380	Цинк	400
Нафталин	1300	Чугун	550
Олово	250		

Жидкости

Вещество	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{К}}$	Вещество	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{К}}$
Вода	4187	Ртуть	125
Глицерин	2430	Спирт этиловый	2430
Керосин	2140	Скипидар	1760
Масло машинное	2100	Эфир	230
Масло трансформаторное	2093		

Удельная теплоемкость газов

Газ	$C_p \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{К}}$	$C_v \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{К}}$	$\frac{C_p}{C_v}$
Азот	1,051	0,745	1,4
Аммиак	2,244	1,675	1,31
Водород	14,269	10,132	1,41
Воздух	1,009	0,720	1,4
Гелий	5,296	3,182	1,66
Кислород	0,913	0,653	1,4
Углекислый газ	0,837	0,653	1,3
Сероводород	1,026	0,804	1,34

Удельная теплота плавления. Температура плавления

Вещество	$t_{пл}, ^\circ\text{С}$	$\lambda, 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Вещество	$t_{пл}, ^\circ\text{С}$	$\lambda, 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Алюминий	659	38	Платина	1773	11,3
Вода, лед	0	33,5	Ртуть	-39	1,25
Вода тяжелая	3,82	31,6	Свинец	327	2,5
Вольфрам	3410	2,6	Сера	112,8	5,5
Железо	1530	27	Серебро	960	8,8
Золото	1064	6,6	Сплав Вуда	68	3,2
Медь	1083	18	Сталь	1400	8,4
Нафталин	80	15,1	Цинк	419	12,2
Олово	232	5,9	Чугун белый	1200	13
Парафин	54	1,5	Чугун серый	1150	9,7

Удельная теплота парообразования (при температурах кипения). Температура кипения

Вещество	T, К	t, °С	r, 10 ⁸ Дж/кг
Аммиак	239,6	−33,4	13,7
Ацетон	329,2	56,2	5,2
Бензин	423	150	3
Вода	373	100	22,6
Вода тяжелая	374,43	101,43	20,6
Воздух	81	−192	2,1
Железо	3323	3050	0,58
Ртуть	530	357	2,85
Скипидар	433	160	2,94
Спирт этиловый	351	78	8,57
Фреон-12	243,2	−29,8	16,8
Эфир этиловый	308	35	3,52

Удельная теплота сгорания некоторых видов топлива

Вещество	10 ⁷ Дж/кг	Вещество	10 ⁷ Дж/кг
Порох	0,38	Древесный уголь	3,4
Дрова сухие	1,0	Природный газ	4,4
Торф	1,4	Нефть	4,4
Каменный уголь	2,9	Бензин	4,6
Спирт	2,9	Керосин	4,6
Антрацит	3,0	Водород	12
Дизельное топливо	4,2	Топливо для реактивных самолетов (ТС-1)	4,3
Условное топливо	2,9		

Диэлектрические проницаемости веществ

Вакуум	1	Плексиглас	3,3
Воздух	1,0006	Парафин	2
Вода	81	Слюда	6
Керосин	2,1	Стекло	7
Масло	2,5	Текстолит	7
Парафинированная бумага	2,2	Спирт	33
Эбонит	4,3	Янтарь	2,8

Работа выхода электронов

Вещество	Работа выхода		Вещество	Работа выхода	
	10^{-19} Дж	эВ		10^{-19} Дж	эВ
Барий	3,8	2,4	Оксид меди (I)	8,3	5,2
Барий на вольфраме	1,8	1,1	Платина	8,5	5,3
Вольфрам	7,2	4,5	Серебро	6,9	4,3
Германий	7,7	4,8	Торий	5,4	3,4
Золото	6,9	4,3	Торий на вольфраме	4,2	2,6
Кальций	4,5	2,8	Цезий	2,9	1,8
Молибден	6,9	4,3	Цезий на вольфраме	2,2	1,4
Никель	7,2	4,5	Цезий на платине	2,1	1,3
Оксид бария	1,6	1,0	Цинк	6,0	3,74

Предельные углы полного отражения света

Алмаз	24°	Глицерин	43°
Бензин	45°	Спирт	47°
Вода	49°	Стекло различных сортов	30–42°

Показатели преломления веществ

Алмаз	2,42	Лед	1,31
Вода	1,33	Плексиглас	1,50
Воздух	1,00029	Сероуглерод	1,63
Глицерин	1,47	Скипидар	1,47
Каменная соль	1,54	Спирт этиловый	1,36
Кварц	1,54	Стекло (тяжелый флинт)	1,80
Кедровое масло	1,52	Стекло (легкий крон)	1,57

Энергия связи некоторых ядер

Химический элемент	Обозначение изотопа	Масса изотопа, а.е.м.	Энергия связи ядра	
			10^{-23} Дж	МэВ
Водород	${}^1_1\text{H}$	1,007825	—	—
Водород	${}^2_1\text{H}$, D	2,014102	3,5632	2,2241
Водород	${}^3_1\text{H}$, T	3,016049	13,589	8,4820
Гелий	${}^3_2\text{He}$	3,016022	12,375	7,7243
Гелий	${}^4_2\text{He}$	4,002603	45,329	28,2937
Литий	${}^6_3\text{Li}$	6,015125	51,246	31,9870
Литий	${}^7_3\text{Li}$	7,016004	62,865	39,239
Бериллий	${}^9_4\text{Be}$	9,012186	98,167	58,153
Бор	${}^{10}_5\text{B}$	10,012939	103,73	64,744
Бор	${}^{11}_5\text{B}$	11,009305	122,07	76,192
Углерод	${}^{12}_6\text{C}$	12,000000	147,64	92,156
Углерод	${}^{13}_6\text{C}$	13,003354	155,57	97,102
Азот	${}^{14}_7\text{N}$	14,003074	167,57	104,653
Азот	${}^{15}_7\text{N}$	15,000107	185,02	115,486
Кислород	${}^{16}_8\text{O}$	15,994915	204,49	127,612
Кислород	${}^{17}_8\text{O}$	16,999133	211,08	131,754
Кислород	${}^{18}_8\text{O}$	17,999160	223,96	139,789

Таблицы значений синусов и тангенсов для углов 0-90°

α	$\sin \alpha$	$\operatorname{tg} \alpha$	α	$\sin \alpha$	$\operatorname{tg} \alpha$	α	$\sin \alpha$	$\operatorname{tg} \alpha$
0	0,0000	0,0000	31	0,5150	0,6009	61	0,8746	1,804
1	0,0175	0,0175	32	0,5299	0,6249	62	0,8829	1,881
2	0,0349	0,0349	33	0,5446	0,6494	63	0,8910	1,963
3	0,0523	0,0524	34	0,5592	0,6745	64	0,8988	2,050
4	0,0698	0,0699	35	0,5736	0,7002	65	0,9063	2,145
5	0,0872	0,0875	36	0,5878	0,7265	66	0,9135	2,246
6	0,1045	0,1051	37	0,6018	0,7536	67	0,9205	2,356
7	0,1219	0,1228	38	0,6157	0,7813	68	0,9272	2,475
8	0,1392	0,1405	39	0,6293	0,8098	69	0,9336	2,605
9	0,1564	0,1584	40	0,6428	0,8391	70	0,9397	2,747
10	0,1736	0,1763	41	0,6561	0,8693	71	0,9455	2,904
11	0,1908	0,1944	42	0,6691	0,9004	72	0,9511	3,078
12	0,2079	0,2126	43	0,6820	0,9325	73	0,9563	3,271
13	0,2250	0,2309	44	0,6947	0,9657	74	0,9613	3,487
14	0,2419	0,2493	45	0,7071	1,0000	75	0,9659	3,732
15	0,2588	0,2679	46	0,7193	1,036	76	0,9703	4,011
16	0,2756	0,2867	47	0,7314	1,072	77	0,9744	4,331
17	0,2924	0,3057	48	0,7431	1,111	78	0,9781	4,705
18	0,3090	0,3249	49	0,7547	1,150	79	0,9816	5,145
19	0,3256	0,3443	50	0,7660	1,192	80	0,9848	5,671
20	0,3420	0,3640	51	0,7771	1,235	81	0,9877	6,314
21	0,3584	0,3839	52	0,7880	1,280	82	0,9903	7,115
22	0,3746	0,4040	53	0,7986	1,327	83	0,9925	8,144
23	0,3907	0,4245	54	0,8090	1,376	84	0,9945	9,514
24	0,4067	0,4452	55	0,8192	1,428	85	0,9962	11,43
25	0,4226	0,4663	56	0,8290	1,483	86	0,9976	14,30
26	0,4384	0,4877	57	0,8387	1,540	87	0,9986	19,08
27	0,4540	0,5095	58	0,8480	1,600	88	0,9994	28,64
28	0,4695	0,5317	59	0,8572	1,664	89	0,9998	57,29
29	0,4848	0,5543	60	0,8660	1,732	90	1,0000	∞
30	0,5000	0,5774						

ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ



Вариант 1



Вариант 2



Вариант 3



Вариант 4



Ответы



ИНСТРУКЦИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Для выполнения экзаменационной работы по физике отводится 3,5 ч (210 мин). Работа состоит из 3 частей, включающих 36 заданий.

Часть 1 содержит 25 заданий (A1–A25). К каждому заданию дается 4 ответа, из которых только один правильный.

Часть 2 содержит 5 задания (B1–B5), на которые следует дать краткий ответ. Для заданий B1 и B2 ответ необходимо записать в виде набора цифр, для заданий B3–B5 — в виде числа.

Часть 3 состоит из 6 заданий (C1–C6), на которые требуется дать развернутый ответ.

При выполнении заданий части 2 и части 3 значение искомой величины следует записать в тех единицах, которые указаны в условии задания. Если такого указания нет, то значение величины следует записать в Международной системе единиц (СИ). При вычислении разрешается использовать непрограммируемый калькулятор.

Внимательно прочитав каждое задание и предлагаемые варианты ответа, если они имеются, следует отвечать только после того, как понят вопрос и проанализированы все варианты ответа.

Выполняются задания в том порядке, в котором они даны. Если какое-то задание вызывает затруднение, его можно пропустить, а затем вернуться к нему, если останется время.

Выполнение различных по сложности заданий оценивается одним или более баллами. Полученные баллы суммируются. Чтобы набрать наибольшее количество баллов, надо выполнить как можно больше заданий.

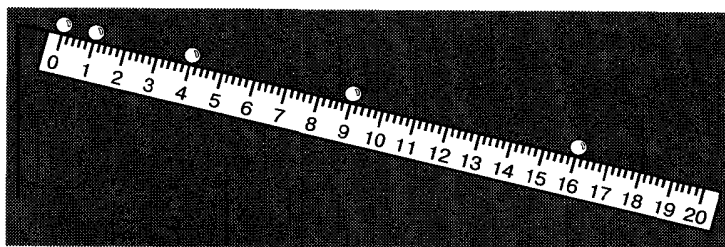
Ниже приведены справочные данные, которые могут понадобиться при выполнении работы.

ВАРИАНТ 1*

Часть 1

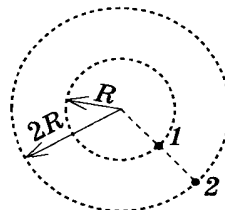
При выполнении заданий части 1 в бланке ответов № 1 под номером выполняемого задания (А1–А25) поставьте знак «X» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного ответа.

- А1.** На рисунке приведена стробоскопическая фотография движения шарика по желобу. Известно, что промежуток времени между двумя последовательными вспышками равен 0,2 с. На шкале указаны деления в дециметрах. С каким ускорением двигался шарик?



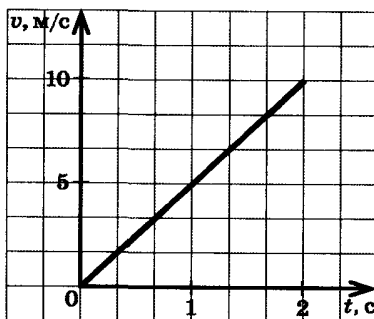
- 1) 0 2) 5 дм/с² 3) 5 м/с² 4) 10 м/с²

- А2.** Два велосипедиста совершают кольцевую гонку с одинаковой угловой скоростью. В некоторый момент времени они оказались на одной прямой 1–2 (см. рис.). Чему равно отношение центростремительных ускорений велосипедистов $\frac{a_2}{a_1}$ в этот момент времени?



- 1) 4 2) 2 3) $\frac{1}{2}$ 4) $\sqrt{2}$

- А3.** Мальчик, находясь на балконе дома, случайно выронил футбольный мяч массой 400 г. На рисунке изображен график зависимости скорости движения мяча от времени. Значение равнодействующей силы, приложенной к мячу, равно



- 1) 0,08 Н 2) 2 Н 3) 80 Н 4) 2000 Н

* Автор тренировочных тестов (вариант 1–3) А. А. Фадеева

1 2 3 4 A1

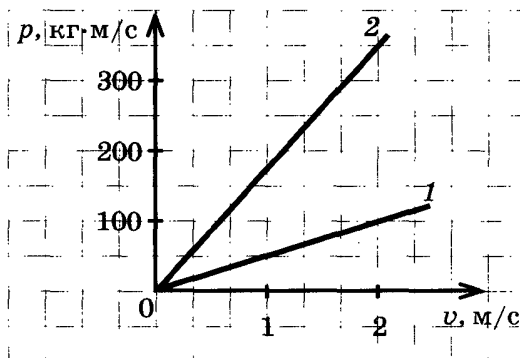
1 2 3 4 A2

1 2 3 4 A3

A4

1 2 3 4

- A4. На рисунке изображены графики зависимости импульса от скорости движения двух тел. Масса какого тела больше и во сколько раз?

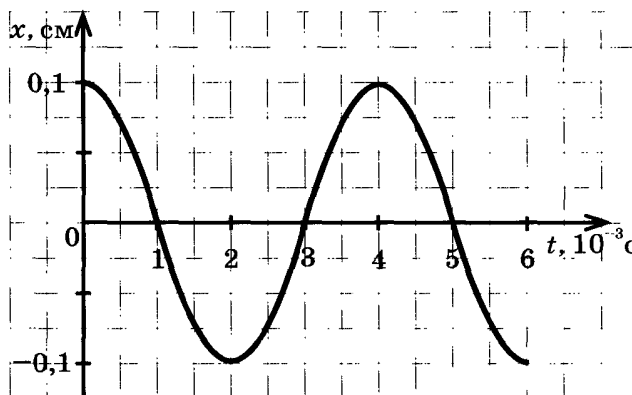


- 1) Массы тел одинаковы
- 2) Масса тела 1 больше в 3,5 раза
- 3) Масса тела 2 больше в 3,5 раза
- 4) По графикам нельзя сравнить массы тел

A5

1 2 3 4

- A5. На рисунке изображен график колебаний одной из точек струны. Согласно этому графику период колебаний равен



- 1) $1 \cdot 10^{-3}$ с
- 2) $2 \cdot 10^{-3}$ с
- 3) $3 \cdot 10^{-3}$ с
- 4) $4 \cdot 10^{-3}$ с

A6

1 2 3 4

- A6. Движение легкового автомобиля задано уравнением:

$$x = 150 + 30t + 0,7t^2, \text{ м}$$

Чему равно значение равнодействующей силы, приложенной к автомобилю? Масса автомобиля 1,5 т.

- 1) 1,05 кН
- 2) 2,1 кН
- 3) 45 кН
- 4) 225 кН

A7

1 2 3 4

- A7. Две тележки движутся навстречу друг другу с одинаковыми скоростями v . Массы тележек m и $2m$. Какой будет скорость движения тележек после их абсолютно неупругого столкновения?

- 1) $3v$
- 2) $\frac{3}{2}v$
- 3) $\frac{2}{3}v$
- 4) $\frac{1}{3}v$

A8. В молекулярной физике используется понятие «идеальный газ». Это понятие применимо тогда, когда можно пренебречь:

- А. Средней кинетической энергией поступательного движения атомов или молекул.
- Б. Энергией взаимодействия атомов или молекул.
- В. Массой атомов или молекул.

Какое(-ие) из утверждений правильно(-ы)?

- 1) только А 2) только Б 3) только В 4) и А и В

1 2 3 4 A8

A9. Газ представляет собой ионизованный гелий (смесь α -частиц и электронов). Масса α -частицы примерно в 7300 раз больше массы электрона. Во сколько раз средняя квадратичная скорость электронов больше, чем у α -частиц? Газ считать идеальным.

- 1) 7300 раз 2) 1800 раз 3) 85 раз 4) 43 раза

1 2 3 4 A9

A10. Относительная влажность воздуха в закрытом сосуде равна 30%. Какой будет относительная влажность, если объем сосуда при неизменной температуре увеличить в 3 раза?

- 1) 5% 2) 10% 3) 60% 4) 90%

1 2 3 4 A10

A11. Имеются два бруска: из гранита и из кирпича. Начальные температуры брусков одинаковы. Гранитный брусок получил количество теплоты Q . Как изменится количество теплоты, полученное кирпичным бруском в процессе нагревания его до той же температуры, что и гранитный брусок? Массы брусков считать одинаковыми. Для ответа на вопрос используйте табличные данные.

1 2 3 4 A11

Вещество	Удельная теплоемкость, Дж/(кг · К)
Железо	500
Медь	400
Цинк	900
Гранит	800
Кирпич	800
Латунь	400
Сталь	500

- 1) увеличится
- 2) уменьшится
- 3) не изменится
- 4) может как увеличиться, так и уменьшиться

A12. Чтобы увеличить КПД тепловой машины, нужно:

- А. Повысить температуру нагревателя.
- Б. Понизить температуру холодильника.

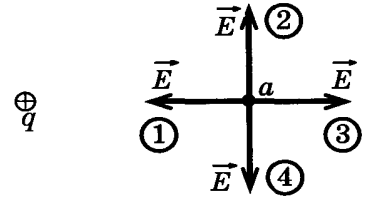
Какое(-ие) из утверждений правильно(-ы)?

- 1) только А 2) только Б 3) А и Б 4) ни А, ни Б

1 2 3 4 A12

A13 1 2 3 4

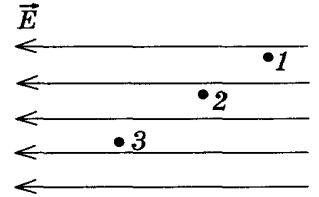
A13. Электрическое поле создано положительным зарядом q (см. рис.). Какое направление имеет вектор напряженности в точке a ?



- 1) 1
- 2) 2
- 3) 3
- 4) 4

A14 1 2 3 4

A14. На рисунке изображены линии напряженности электрического поля. В какой точке поля потенциал меньше?



- 1) 1
- 2) 2
- 3) 3
- 4) во всех точках поля потенциал одинаков

A15 1 2 3 4

A15. Какими заряженными частицами создается ток в полупроводниках, *не содержащих* примесей?

- 1) только ионами
- 2) только электронами
- 3) электронами и ионами
- 4) электронами и дырками

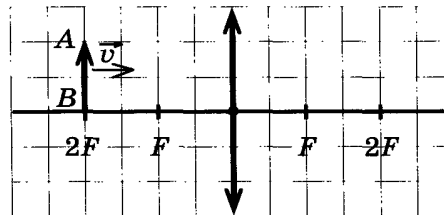
A16 1 2 3 4

A16. Колебательный контур радиоприемника настроен на станцию, передающую радиовещание на длине волны 100 м. Как нужно изменить емкость конденсатора колебательного контура радиоприемника, чтобы он был настроен на длину волны 25 м? Индуктивность катушки считать неизменной.

- 1) увеличить в 4 раза
- 2) уменьшить в 4 раза
- 3) увеличить в 16 раз
- 4) уменьшить в 16 раз

A17 1 2 3 4

A17. Предмет AB , расположенный в двойном фокусе тонкой собирающей линзы, передвигают к фокусу линзы (см. рис.). Изображение предмета при этом



- 1) удаляется от двойного фокусного расстояния линзы
- 2) удаляется от фокуса линзы
- 3) приближается к фокусу линзы
- 4) приближается к двойному фокусу линзы

A18. Как изменится сила, действующая на проводник с током, при уменьшении индукции магнитного поля в 3 раза?

- 1) не изменится
- 2) уменьшится в 3 раза
- 3) увеличится в 3 раза
- 4) уменьшится в 9 раз

1 2 3 4 A18

A19. Дифракционная решетка освещается монохроматическим зеленым светом. При освещении решетки монохроматическим красным светом картина дифракционного спектра

- 1) сузится
- 2) расширится
- 3) исчезнет
- 4) не изменится

1 2 3 4 A19

A20. Какое из приведенных ниже утверждений правильно описывает способность атомов к излучению и поглощению энергии? Атомы могут

- 1) излучать любую порцию энергии, а поглощать лишь некоторый дискретный набор значений энергии
- 2) поглощать любую порцию энергии, а излучать лишь некоторый дискретный набор значений энергии
- 3) излучать и поглощать лишь некоторый дискретный набор значений энергии
- 4) излучать и поглощать любую порцию энергии

1 2 3 4 A20

A21. Отношение импульсов p_1/p_2 двух фотонов равно 2. Отношение частот ν_1/ν_2 этих фотонов равно

- 1) $\frac{1}{2}$
- 2) 2
- 3) $\frac{1}{4}$
- 4) 4

1 2 3 4 A21

A22. Как изменится масса системы, состоящей из нескольких свободных протонов и нейтронов, при их соединении в атомное ядро?

- 1) увеличится
- 2) уменьшится
- 3) не изменится
- 4) увеличится, если образуется радиоактивное ядро; уменьшится, если образуется стабильное ядро

1 2 3 4 A22

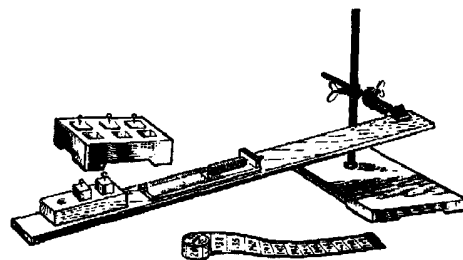
A23. Изотоп нептуния ${}^{239}_{93}\text{Np}$ испытывает β -распад. При этом образуется

- 1) альфа-частица
- 2) изотоп плутония ${}^{239}_{94}\text{Pu}$
- 3) нейтрон
- 4) позитрон

1 2 3 4 A23

A24 1 2 3 4

A24. Для определения КПД наклонной плоскости использовано оборудование, изображенное на рисунке. Ученик с помощью динамометра поднимает брусок с двумя грузами равномерно вдоль наклонной плоскости. Данные эксперимента ученик занес в таблицу. Чему равен КПД наклонной плоскости? Ответ выразите в процентах.

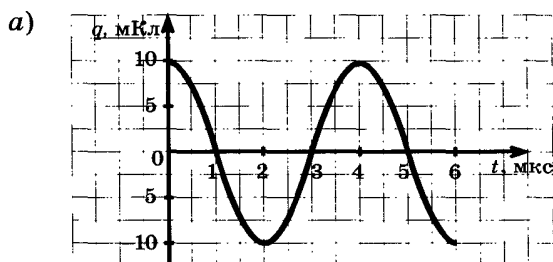


Показание динамометра при подъеме груза, Н	1,5
Длина наклонной плоскости, м	1,0
Вес бруска с двумя грузами, Н	2,2
Высота наклонной плоскости, м	0,15

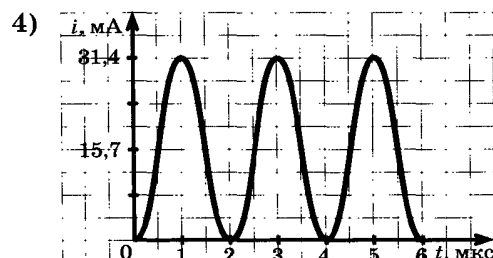
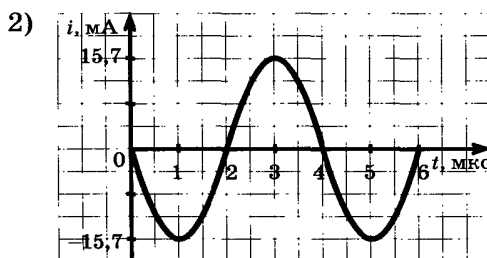
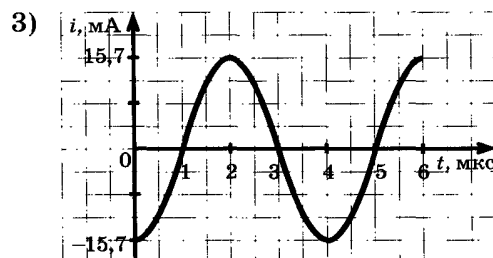
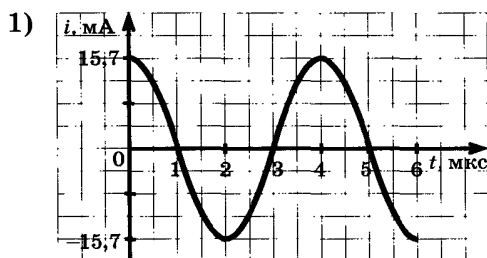
- 1) 9,8% 2) 22% 3) 45% 4) 100%

A25 1 2 3 4

A25. На рисунке *a* приведен график зависимости изменения заряда конденсатора в колебательном контуре от времени. На каком из графиков — 1, 2, 3 или 4 (рис. *б*) — изменение силы тока показано правильно? Колебательный контур считать идеальным.



б)



Часть 2

В заданиях В1 и В2 требуется указать последовательность цифр, соответствующих правильному ответу. Эту последовательность следует записать сначала в текст экзаменационной работы, а затем перенести в бланк ответов № 1 без пробелов и других символов. (Цифры в ответе могут повторяться.)

- В1.** Установите соответствие между определением физической величины и названием величины, к которому оно относится.

К каждому элементу левого столбца подберите соответствующий элемент из правого и внесите в строку ответов выбранные цифры под соответствующими буквами.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- А) Предельная частота, при которой возможен фотоэффект
Б) Энергия, которая необходима для полного расщепления ядра на отдельные нуклоны

ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА

- 1) частота видимой части спектра атома водорода
2) красная граница фотоэффекта
3) энергия фотона
4) энергия связи

Ответ:

А	Б

Получившуюся последовательность цифр перенесите в бланк ответов (без пробелов и каких-либо символов).

- В2.** В сосуде находится два моля идеального газа. Что произойдет с давлением газа на стенки сосуда, температурой и объемом газа при его изохорном охлаждении?

Установите соответствие между физическими величинами и их изменением: к каждому элементу первого столбца подберите соответствующий элемент из второго и внесите в строку ответов выбранные цифры под соответствующими буквами.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- А) Давление газа
Б) Температура газа
В) Объем газа

ИЗМЕНЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- 1) не изменится
2) уменьшится
3) увеличится

А	Б	В

Получившуюся последовательность цифр перенесите в бланк ответов (без пробелов и каких-либо символов).

В1

В2

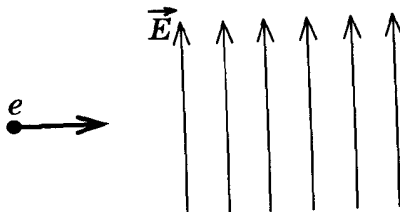
Ответом к заданиям В3–В5 будет некоторое число. Это число надо записать в бланк ответов № 1 справа от номера задания, начиная с первой клеточки. Каждый символ (цифру, запятую, знак «минус» и т.д.) пишете в отдельной клеточке строго по образцу из верхней части бланка. Единицы физических величин писать не нужно.

В3

- В3. Брусок массой 100 г скользит без трения по наклонному желобу, а затем движется по «мертвой петле» радиусом R . Высота, с которой отпускают брусок, равна $4R$. Какую силу давления производит брусок на желоб в верхней точке петли?

В4

- В4. Электрон влетает в область пространства с однородным электрическим полем напряженностью $E = 6 \cdot 10^4$ В/м перпендикулярно линиям напряженности. Определите модуль индукции магнитного поля, которое надо создать в этой области пространства для того, чтобы электрон пролетел ее, не отклоняясь от первоначального направления. Кинетическая энергия электрона $E_k = 1,6 \cdot 10^{-16}$ Дж. Силой тяжести пренебречь. Ответ умножьте на 10^5 и округлите до десятых.



В5

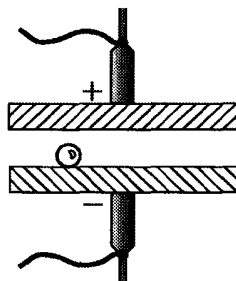
- В5. На поверхность стеклянной пластинки с показателем преломления n_1 нанесена тонкая пленка толщиной $d = 200$ нм с показателем преломления $n_2 < n_1$. На пленку по нормали падает свет с длиной волны $\lambda = 600$ нм. При каком минимальном значении показателя преломления пленки она будет максимально отражающей?

Часть 3

Задания С1–С6 представляют собой задачи, полное решение которых необходимо записать в бланке ответов № 2. Рекомендуется провести предварительное решение на черновике. При оформлении решения в бланке ответов № 2 запишите сначала номер задания (С1 и т.д.), а затем решение соответствующей задачи.

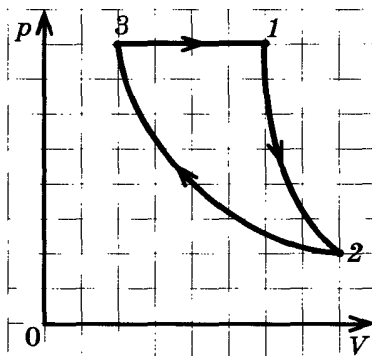
В задаче С1 следует записать развернутый ответ, поясняющий физические процессы, описанные в задаче, и ход ваших рассуждений.

- C1. Между двумя близко расположенными металлическими пластинами, укрепленными на изолирующих подставках, положили легкий металлический шарик. Затем пластины подсоединили к клеммам высоковольтного выпрямителя и подали на них заряды разных знаков (см. рисунок). Шарик приходит в движение. Опишите и объясните движение шарика.



Полное правильное решение каждой из задач C2–C6 должно включать законы и формулы, применение которых необходимо и достаточно для решения задачи, а также математические преобразования и, при необходимости, рисунок, поясняющий решение. Если требуется, то следует рассчитать числовое значение искомой величины, если нет — оставить решение в буквенном виде.

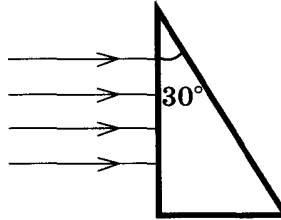
- C2. Тележка массой $0,8$ кг движется по инерции со скоростью $2,5$ м/с. На тележку с высоты 50 см падает кусок пластины массой $0,2$ кг и прилипает к ней. Какая энергия перешла во внутреннюю энергию при этом ударе?
- C3. Гелий в количестве 1 моль совершает работу A в замкнутом процессе, состоящем из адиабаты $1-2$, изотермы $2-3$, изобары $3-1$ (см. рисунок). Определите работу, совершаемую в изотермическом процессе, если разность максимальной и минимальной температур в цикле равна ΔT .



- C4. Пучок протонов влетает в область однородного магнитного поля с индукцией $B = 0,1$ Тл перпендикулярно направлению поля. В этом поле протоны движутся по дуге окружности радиусом $r = 0,2$ м

и попадают на заземленную мишень. Рассчитайте мощность, выделившуюся в мишени во время попадания протонов. Сила тока в пучке $I = 0,1$ мА. Удельный заряд протона $q/m = 10^8$ Кл/кг.

- С5.** На прямоугольную призму, находящуюся в воздухе, падает параллельный пучок света по нормали к передней грани. Диаметр светового пучка до призмы 3 см. На экране, поставленном за призмой перпендикулярно пучку, образуется пятно. Считать пятно кругом, диаметром 2,5 см. Чему равен показатель преломления материала призмы?



- С6.** Кусочек металлической фольги массой 1 мг освещается лазерным импульсом мощностью $P = 15$ Вт и длительностью $\tau = 0,05$ с. Свет падает перпендикулярно плоскости фольги и полностью отражается от нее. Какую скорость приобретает фольга под действием света? Ответ выразите в миллиметрах в секунду (мм/с).

Бланк ответов №1



Заполнять головкой или капиллярной ручкой ЧЕРНЫМИ чернилами ЗАГЛАВНЫМИ ПЕЧАТНЫМИ БУКВАМИ по следующим образцам:

А Б В Г Д Е Е Ж З И Й К Л М Н О П Р С Т У Ф Х Ц Ч Ш Щ Ъ Ы Ъ Э Ю Я 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
А В С D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z , - A A A O O E E E E E I I U O U B

Регион

Код предмета

Название предмета

Письменная часть экзамена - информационный фонд
Спецификация экзаменационных заданий
и бланков ответов участника
Подпись участника ЕГЭ строго внутри окошка.

Резерв 5

ВНИМАНИЕ! Все бланки и листы с контрольными измерительными материалами рассматриваются в комплекте.

Номера заданий типа А с выбором ответа из предложенных вариантов

Образец правильного ответа ☒ Запрещены исправления ошибок ответов. Будьте аккуратны. Случайный штрих внутри квадрата может быть воспринят как метка.

Номера заданий типа А	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1
1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	1
2	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	2
3	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	3
4	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	4

Замена ошибочных ответов на задания типа А	А	1	2	3	4	А	1	2	3	4	А	1	2	3	4	Резерв - 6 Резерв - 7
	А	☐	☐	☐	☐	А	☐	☐	☐	☐	А	☐	☐	☐	☐	
	А	☐	☐	☐	☐	А	☐	☐	☐	☐	А	☐	☐	☐	☐	
	А	☐	☐	☐	☐	А	☐	☐	☐	☐	А	☐	☐	☐	☐	

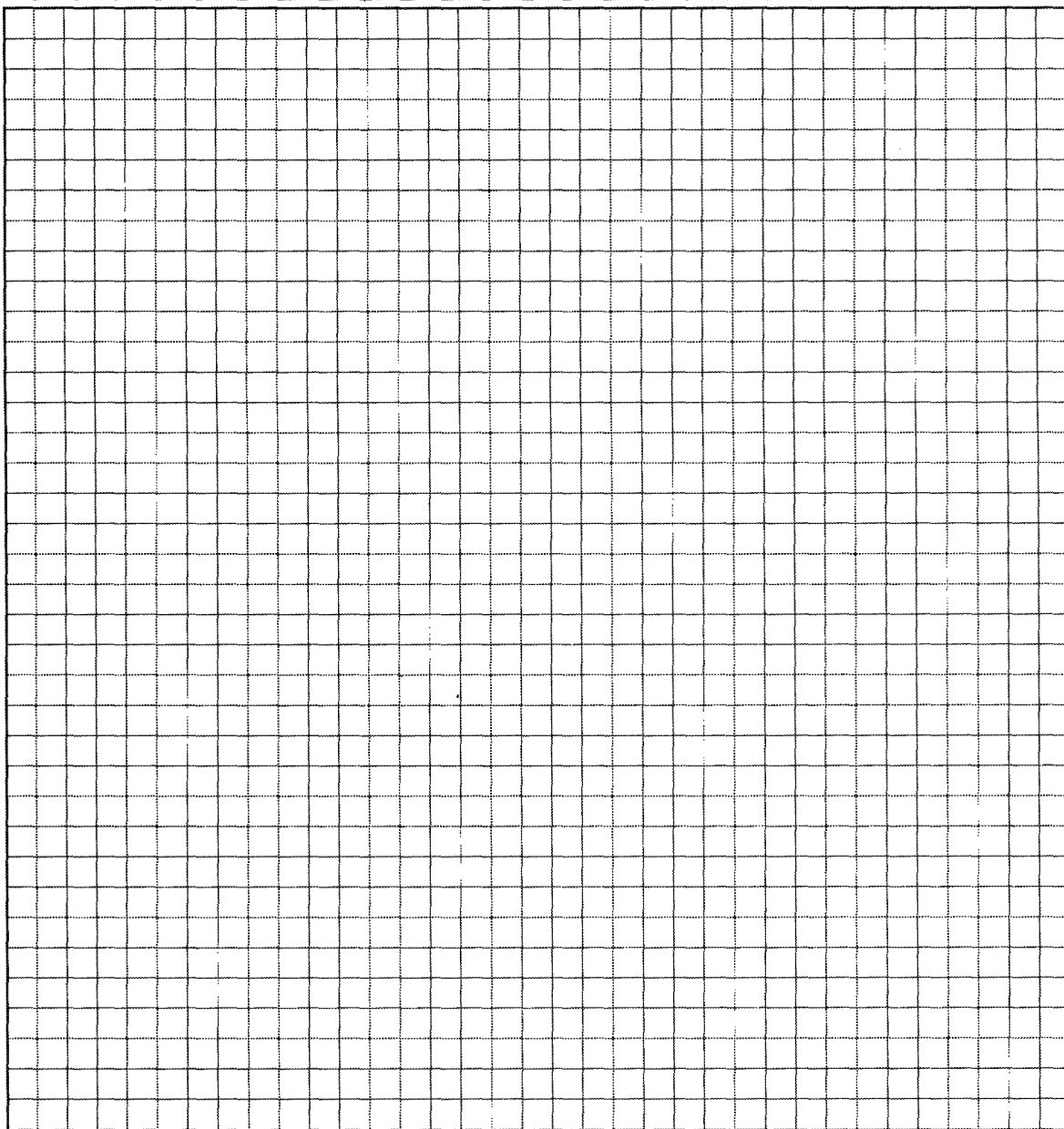
Результаты выполнения заданий типа В с ответом в краткой форме

В1		В11	
В2		В12	
В3		В13	
В4		В14	
В5		В15	
В6		В16	
В7		В17	
В8		В18	
В9		В19	
В10		В20	

Замена ошибочных ответов на задания типа В

В		В	
В		В	
В		В	





ВАРИАНТ 2

Часть 1

При выполнении заданий части 1 в бланке ответов № 1 под номером выполняемого задания (A1–A25) поставьте знак «X» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного ответа.

- A1. В стеклянной трубке находятся птичье перышко, пробка и кусочек свинца. Если с помощью насоса откачать воздух из трубки, а трубку перевернуть, то тела начнут перемещаться вниз. Какое из тел быстрее достигнет дна трубки?

- 1) птичье перышко
- 2) пробка
- 3) кусочек свинца
- 4) все три тела достигнут дна трубки одновременно

1 2 3 4 A1

- A2. Длительное время состояние невесомости наблюдается в космическом корабле или искусственном спутнике Земли. Чему равен вес тела массой m , находящегося на опоре внутри корабля (спутника)?

- 1) $3mg$
- 2) $2mg$
- 3) mg
- 4) 0

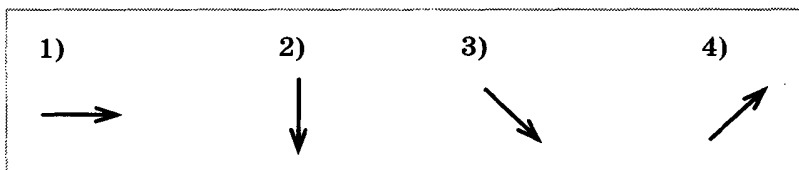
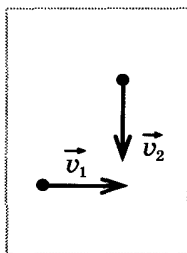
1 2 3 4 A2

- A3. Для силы трения покоя F всегда справедливо соотношение:

- 1) $F \leq \mu N$
- 2) $F > \mu N$
- 3) $F > \mu mg$
- 4) $F \leq \mu mg$

1 2 3 4 A3

- A4. На рисунке показаны направления движений шаров одинаковой массы. Укажите правильное направление импульса шаров после абсолютно неупругого соударения.



1 2 3 4 A4

- A5. Волна частотой 3 Гц распространяется в среде со скоростью 6 м/с. Длина волны равна

- 1) 0,5 м
- 2) 1 м
- 3) 2 м
- 4) 18 м

1 2 3 4 A5

A6 1 2 3 4

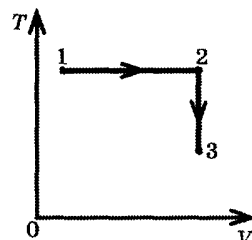
- A6. Во сколько раз сила притяжения Земли к Солнцу больше силы притяжения Меркурия к Солнцу? Масса Меркурия составляет $1/18$ массы Земли, а расположен он в 2,5 раза ближе к Солнцу, чем Земля.
- 1) в 18 раз 2) в 7,5 раз 3) в 2,9 раза 4) в 2,25 раза

A7 1 2 3 4

- A7. На тележку массой m , движущуюся со скоростью v , опускают груз такой же массы. С какой скоростью будет двигаться тележка с грузом? Трением пренебречь.
- 1) $2v$ 2) v 3) $\frac{v}{2}$ 4) 0

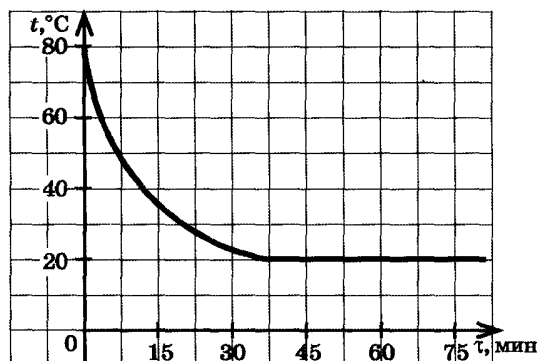
A8 1 2 3 4

- A8. Идеальный газ переходит из состояния 1 в состояние 3 так, как показано на рисунке. Какому состоянию соответствует наибольшее давление? Массу газа считать неизменной.
- 1) только 1 3) только 3
2) только 2 4) и 2, и 3



A9 1 2 3 4

- A9. Кастрюлю с горячей водой вынесли на балкон. На рисунке изображен график изменения температуры воды с течением времени. Какова температура воздуха на балконе?



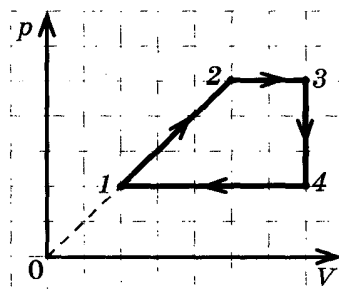
- 1) 80 °C 2) 75 °C 3) 30 °C 4) 20 °C

A10 1 2 3 4

- A10. Средняя скорость движения молекул идеального газа определяется
- 1) только давлением
2) давлением и температурой
3) только температурой
4) температурой и массой

A11 1 2 3 4

- A11. На pV -диаграмме изображено изменение состояния идеального газа. На каком участке цикла работа *не совершается*?



- 1) 1-2 3) 3-4
2) 2-3 4) 4-1

A12. Как изменится плотность идеального газа при изобарном нагревании от 27 до 177 °C?

- 1) Уменьшится в 6,5 раза 3) Увеличится в 1,5 раза
2) Уменьшится в 1,5 раза 4) Не изменится

1 2 3 4 A12

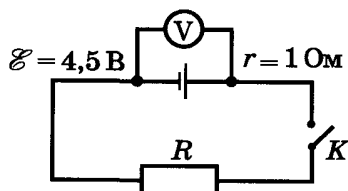
A13. По электрическим свойствам тела делятся на проводники и диэлектрики (изоляторы). Какое из приведенных ниже утверждений справедливо для проводников?

- А. При равновесии зарядов электрическое поле и электрический заряд внутри тела равны нулю.
Б. Заряды проводника создают электрическое поле, напряженность которого направлена противоположно напряженности поля внешних зарядов.

- 1) только А 2) только Б 3) и А, и Б 4) ни А, ни Б

1 2 3 4 A13

A14. Вольтметр с большим внутренним сопротивлением включен в цепь так, как показано на рисунке. Какое напряжение будет показывать вольтметр при разомкнутом ключе?



- 1) 5,5 В 2) 4,5 В 3) 3,5 В 4) 0

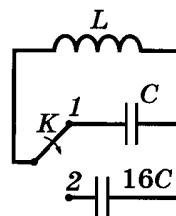
1 2 3 4 A14

A15. Как изменится количество теплоты, выделяющееся в проводнике, если при неизменной силе тока уменьшить его длину в 2 раза, а диаметр увеличить в 2 раза?

- 1) не изменится 3) увеличится в 4 раза
2) уменьшится в 4 раза 4) уменьшится в 8 раз

1 2 3 4 A15

A16. Как изменится частота собственных колебаний в колебательном контуре (см. рисунок), если ключ K перевести из положения 1 в положение 2?



- 1) увеличится в 16 раз
2) уменьшится в 16 раз
3) увеличится в 4 раза
4) уменьшится в 4 раза

1 2 3 4 A16

A17. Дифракционная решетка содержит 200 штрихов на 1 мм. На решетку по нормали падает монохроматический свет с длиной волны 500 нм. Чему равен угол дифракции φ , при котором наблюдается максимум первого порядка?

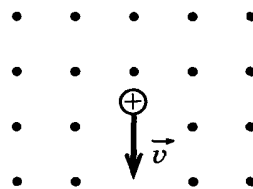
- 1) $\varphi = 30^\circ$ 3) $\varphi = \arcsin 0,1$
2) $\varphi = \arcsin 0,05$ 4) $\varphi = \arcsin 0,25$

1 2 3 4 A17

A18 1 2 3 4

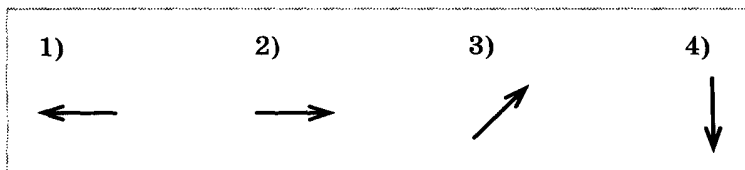
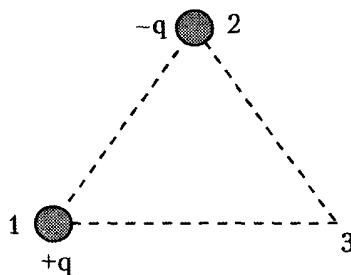
A18. Заряженная частица движется в однородном магнитном поле, линии магнитной индукции которого направлены к наблюдателю см. рисунок). Сила, действующая на заряженную частицу, направлена

- 1) вниз 2) вверх 3) вправо 4) влево



A19 1 2 3 4

A19. Одинаковые по величине, но разные по знаку заряды расположены в двух вершинах равностороннего треугольника. Укажите правильное направление вектора напряженности электрического поля в третьей вершине треугольника.



A20 1 2 3 4

A20. Атом испускает фотон с частотой ν и переходит из возбужденного состояния с энергией E_1 в основное состояние. Энергия основного состояния равна

- 1) $E_1 - h\nu$ 2) $E_1 + h\nu$ 3) $\frac{E_1 - h\nu}{h}$ 4) $(E_1 + h\nu)h$

A21 1 2 3 4

A21. Исследования фотоэффекта А.Г. Столетовым показали, что

- 1) энергия фотона прямо пропорциональна частоте падающего света
2) вещество поглощает свет квантами
3) сила тока прямо пропорциональна частоте падающего света
4) фототок возникает при частотах падающего света, превышающих некоторое значение

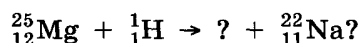
A22 1 2 3 4

A22. Спектр испускания атома водорода свидетельствует о том, что

- 1) энергия атома принимает дискретные значения
2) белый свет — излучение разных частот
3) нагретые газы излучают энергию так же, как и нагретые твердые тела
4) в состав атомов входят фотоны

A23 1 2 3 4

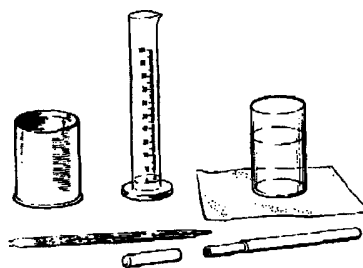
A23. Какая частица испускается в результате реакции:



- 1) электрон 3) альфа-частица
2) протон 4) нейтрон

A24. В результате наблюдения за теплообменом между горячей и холодной водой, налитой в калориметр (см. рисунок), ученик составил таблицу.

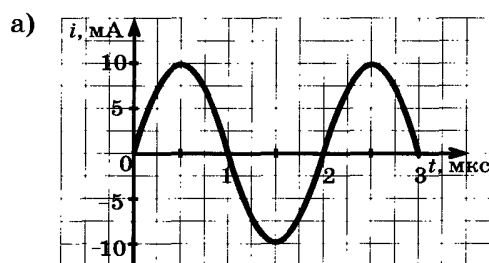
Масса холодной воды, г	100
Масса горячей воды, г	142
Температура холодной воды, °C	25
Температура горячей воды, °C	80
Температура смеси, °C	56



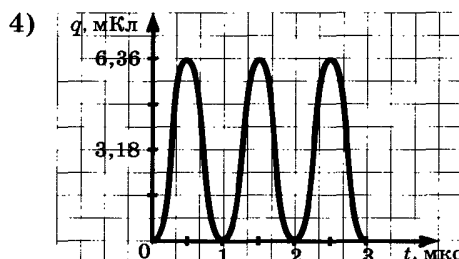
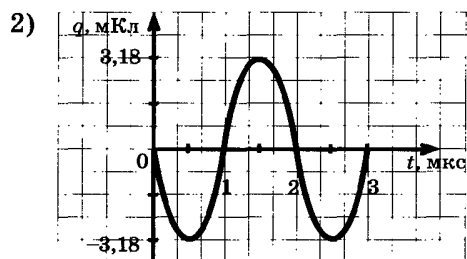
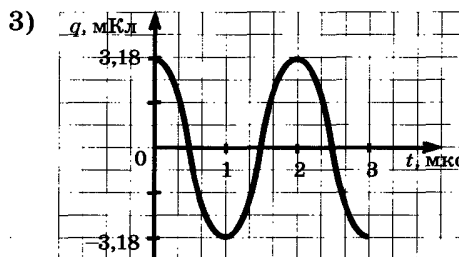
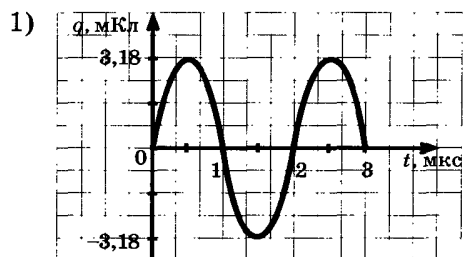
Какое количество теплоты отдала горячая вода? (Теплообменом с окружающей средой пренебречь.)

- 1) 13 020 Дж 3) 13 020 кДж
2) 14 300 Дж 4) 14 300 кДж

A25. На рисунке *a* приведен график зависимости изменения силы тока в катушке колебательного контура от времени. На каком из графиков — 1, 2, 3 или 4 (рис. *б*) — изменение заряда конденсатора показано правильно? Колебательный контур считать идеальным.



б)



Часть 2

В заданиях В1 и В2 требуется указать последовательность цифр, соответствующих правильному ответу. Эту последовательность следует записать сначала в текст экзаменационной работы, а затем перенести в бланк ответов № 1 без пробелов и других символов. (Цифры в ответе могут повторяться.)

В1

В1. Установите соответствие между техническими устройствами и физическими явлениями, лежащими в основе принципа их действия.

К каждому элементу левого столбца подберите соответствующий элемент из правого и внесите в строку ответов выбранные цифры под соответствующими буквами.

ТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

- А) Гидравлический пресс
- Б) Шлюзы
- В) Аэростат (шар-зонд)

ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

- 1) передача давления внутри жидкости
- 2) условие равновесия рычага
- 3) поведение жидкости в сообщающихся сосудах
- 4) действие атмосферного давления
- 5) условие плавания тел
- 6) изменение атмосферного давления с высотой

Ответ:

А	Б	В

Получившуюся последовательность цифр перенесите в бланк ответов (без пробелов и каких-либо символов).

В2

В2. Радиопередатчик работает на частоте 100 кГц. Что произойдет с импульсом, энергией и скоростью фотонов, излучаемых радиопередатчиком, если увеличить частоту излучения?

Установите соответствие между физическими величинами и их изменением: к каждому элементу первого столбца подберите соответствующий элемент из второго и внесите в строку ответов выбранные цифры под соответствующими буквами.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- А) Импульс фотонов
- Б) Энергия фотонов
- В) Скорость фотонов

ИЗМЕНЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ

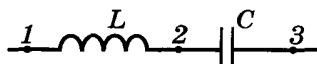
- 1) увеличится
- 2) уменьшится
- 3) не изменится

А	Б	В

Получившуюся последовательность цифр перенесите в бланк ответов (без пробелов и каких-либо символов).

Ответом к заданиям В3–В5 будет некоторое число. Это число надо записать в бланк ответов № 1 справа от номера задания, начиная с первой клеточки. Каждый символ (цифру, запятую, знак «минус» и т.д.) пишете в отдельной клеточке строго по образцу из верхней части бланка. Единицы физических величин писать не нужно.

- В3.** Нитяной маятник отклонили от вертикали на малый угол и отпустили. Через 0,26 с скорость маятника достигла *половины* максимального значения. Чему равна длина маятника? Силами сопротивления движению маятника пренебречь. Ответ округлите до десятых.
- В4.** Тепловая машина, работающая по циклу Карно, совершает за один цикл работу, равную 100 Дж. Температура нагревателя 10 °С, температура холодильника 0 °С. Какое количество теплоты отдает рабочее тело холодильнику за один цикл? Ответ округлите до целых.
- В5.** На участке цепи 1–2–3 протекает переменный ток (см. рис.). Индуктивность катушки $L = 0,25$ Гн, емкость конденсатора $C = 100$ мкФ.



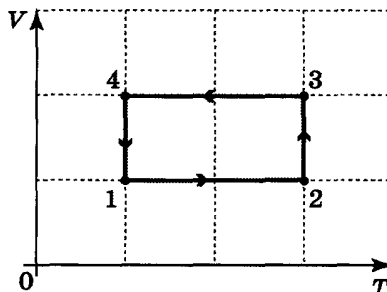
При какой частоте переменного тока сопротивление этого участка равно нулю? Активным сопротивлением катушки и подводящих проводов пренебречь. Ответ округлите до целых.

Часть 3

Задания С1–С6 представляют собой задачи, полное решение которых необходимо записать в бланке ответов № 2. Рекомендуется провести предварительное решение на черновике. При оформлении решения в бланке ответов № 2 запишите сначала номер задания (С1 и т.д.), а затем решение соответствующей задачи.

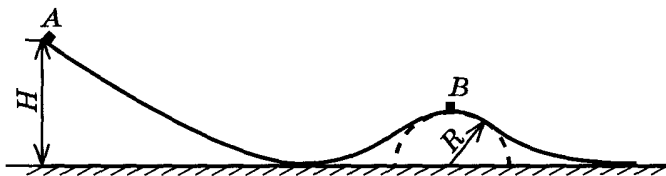
В задаче С1 следует записать развернутый ответ, поясняющий физические процессы, описанные в задаче, и ход ваших рассуждений.

- С1.** На рисунке изображен цикл тепловой машины, у которой рабочим телом является идеальный одноатомный газ. На каком из участков цикла — 1–2, 2–3, 3–4 или 4–1 — совершается наибольшая работа? Ответ обоснуйте.



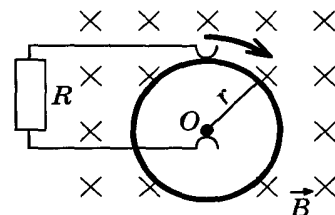
Полное правильное решение каждой из задач С2–С6 должно включать законы и формулы, применение которых необходимо и достаточно для решения задачи, а также математические преобразования и, при необходимости, рисунок, поясняющий решение. Если требуется, то следует рассчитать числовое значение искомой величины, если нет — оставить решение в буквенном виде.

- С2.** Тело массой $m = 2$ кг соскальзывает с горки высотой $H = 4,5$ м по наклонной поверхности, плавно переходящей в цилиндрическую поверхность радиусом $R = 2$ м. С какой силой тело давит на цилиндрическую поверхность в верхней точке B , если работа силы трения при движении тела до этой точки равна 40 Дж?

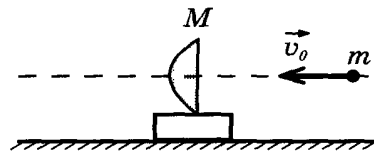


- С3.** В вертикальном цилиндре под поршнем массой 20 кг и площадью поперечного сечения 100 см^2 находится аргон объемом 5 л. Чему равна внутренняя энергия газа? Атмосферное давление считать нормальным.

- С4.** В однородном магнитном поле индукцией $\vec{B}$ вращается массивный медный диск радиусом r . Магнитное поле перпендикулярно плоскости диска, вращающегося с частотой ν . С помощью скользящих контактов резистор R подключен к оси O и ободу диска. Какое количество теплоты выделится в резисторе за время, в течение которого диск совершит N оборотов вокруг оси?



- С5.** Шарик массой $m = 20$ г движется со скоростью $v_0 = 5$ м/с вдоль оптической оси собирающей линзы, установленной на гладкой горизонтальной поверхности. Масса линзы вместе с подставкой $M = 0,2$ кг. Фокусное расстояние линзы $F = 10$ см. После абсолютно упругого удара шарик отскакивает от линзы. Рассчитайте время, в течение которого изображение шарика будет мнимым. Силой тяжести, действующей на шарик, пренебречь.



- С6.** При облучении металлической пластинки фотоэффект возникает только в том случае, если импульс падающих на нее фотонов превышает $9 \cdot 10^{-28} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. С какой максимальной скоростью будут покидать пластинку электроны, если облучать ее светом, частота которого вдвое больше?



А Б В Г Д Е Ё Ж З И Й К Л М Н О П Р С Т У Ф Х Ц Ч Ш Ъ Ы Ь Э Ю Я 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
А В С D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z , - A A A O O E E E E I I U U U U

Abstract

ВНИМАНИЕ! Все бланки и листы с контрольными измерительными материалами рассматриваются в комплекте.

Образец написания метки  ЗАПРЕДЕНА въвеждане в областта отговорности

Будьте аккуратны. Случайный штрих внутри квадрата может быть воспринят как метка.

[illegible]

Замена ошибочных ответов на задания типа А	A		1	2	3	4	A		1	2	3	4	A		1	2	3	4	Результат - 6 Результат - 7
	A						A						A						
	A						A						A						
	A						A						A						

Результаты выполнения заданий типа В с ответом в краткой форме

[illegible]

Замена ошибочных ответов на задания типа В

B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	46
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----



Бланк ответов №2



Район	Код предмета	Название предмета

Дополнительный
Бланк заявки №2

Dist No. 1

A diagram showing a horizontal beam supported by five vertical columns. The beam is represented by a thick horizontal line with a textured pattern. The columns are also thick vertical lines with a textured pattern, positioned at regular intervals along the length of the beam.

Перечислите изложенный вопрос, предмет, вид предмета, название предмета из БЛАНКА РЕГИСТРАЦИИ. Определите вид предмета типа С, предмет аккуратно и разборчиво, соблюдая разметку страницы. Не забудьте указать номер задания, на которое Вы отвечаете, номером С01.

ВНИМАНИЕ! Все бланки и листы с контрольными измерительными материалами рассматриваются в комплексе.

ВАРИАНТ 3

Часть 1

При выполнении заданий части 1 в бланке ответов № 1 под номером выполняемого задания (А1–А25) поставьте знак «X» в клеточку, номер которой соответствует номеру выбранного ответа.

- А1.** С помощью неподвижного блока поднимают груз массой 150 кг на высоту 13 м. При этом совершается работа, равная 20,7 кДж. Чему равен КПД этого простого механизма? Трением пренебречь. КПД выразите в процентах.

1) 0,1% 2) 9,4% 3) 94% 4) 100%

1 2 3 4 **A1**

- А2.** На тело одновременно действуют две силы одинаковой величины, угол между которыми составляет 90° . Модуль равнодействующей этих сил равен

1) $\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot F$ 2) $\sqrt{2} \cdot F$ 3) $2\sqrt{2} \cdot F$ 4) $\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot F$

1 2 3 4 **A2**

- А3.** Два маленьких шарика массой m каждый находятся на расстоянии R друг от друга и притягиваются с силой F . Чему равна сила гравитационного притяжения двух других шариков, если масса одного $2m$, масса другого $m/2$, а расстояние между их центрами $2R$?

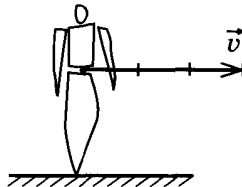
1) $\frac{F}{2}$ 2) $\frac{F}{4}$ 3) $2F$ 4) $4F$

1 2 3 4 **A3**

- А4.** Пешеход массой 50 кг движется по горизонтальному участку дороги (см. рисунок). Чему равен импульс пешехода и какую сторону он направлен?

1 2 3 4 **A4**

Масштаб: 1 деление = 0,3 м/с



1) 0,018 кг · м/с, вправо 3) 56 кг · м/с, влево
2) 45 кг · м/с, вправо 4) 150 кг · м/с, вправо

- А5.** Звук в воде распространяется со скоростью 1450 м/с. Чему равна длина волны звука, вызываемого источником колебаний частотой 200 Гц?

1) 290 км 2) 200 м 3) 38 м 4) 7,25 м

1 2 3 4 **A5**

A6 1 2 3 4

- A6. Исследуя зависимость удлинения пружины от силы упругости, учащиеся записали результаты измерений в таблицу. Чему равен коэффициент упругости (жесткость) пружины?

Δl , см	0	$1 \pm 0,05$	$2 \pm 0,05$	$3 \pm 0,05$	$4 \pm 0,05$
$F_{\text{упр}}$, Н	0	$0,25 \pm 0,05$	$0,50 \pm 0,05$	$0,75 \pm 0,05$	$1,00 \pm 0,05$

- 1) 0,25 Н/м 2) 2,5 Н/м 3) 25 Н/м 4) 40 Н/м

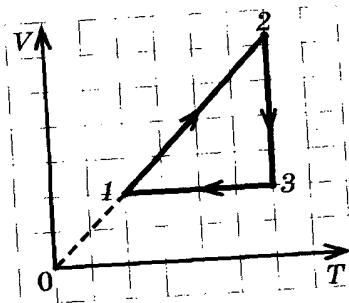
A7 1 2 3 4

- A7. Два шарика массами $m_1 = m$ и $m_2 = 2m$, имеющие импульсы $p_1 = p$ и $p_2 = 0,5p$, движутся во взаимно перпендикулярных направлениях. В результате соударения шарики обмениваются импульсами. Потеря кинетической энергии в результате соударения составила

- 1) $\frac{p^2}{8m}$ 2) $\frac{3p^2}{8m}$ 3) $\frac{3p^2}{16m}$ 4) $\frac{5p^2}{16m}$

A8 1 2 3 4

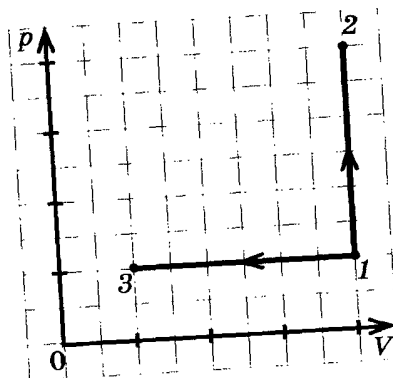
- A8. На VT -диаграмме изображен циклический процесс изменения состояния идеального газа. На каком участке внутренняя энергия газа увеличивается?



- 1) 1-2 3) 3-1
2) 2-3 4) 2-3 и 3-1

A9 1 2 3 4

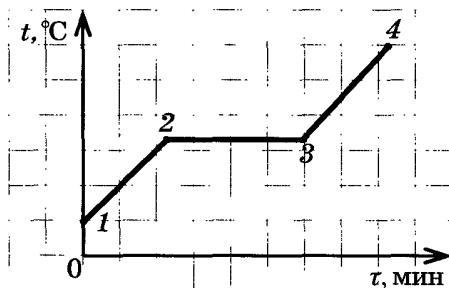
- A9. Используя рисунок, определите, какому состоянию соответствует наибольшая температура?



- 1) только 1 3) только 3
2) только 2 4) 1 и 3

A10. На рисунке изображен график зависимости температуры тела от времени. На каком из участков происходит изменение агрегатного состояния вещества? При этом тело получает теплоту или отдает?

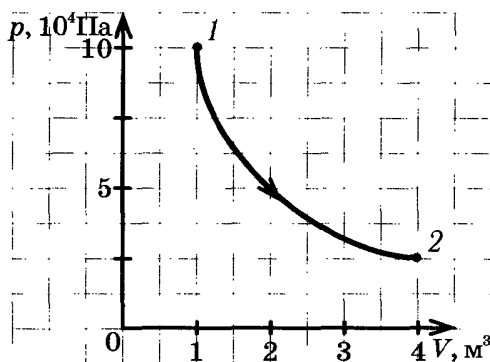
1 2 3 4 **A10**



- 1) на участке 1–2 отдает
- 2) на участке 2–3 отдает
- 3) на участке 3–4 получает
- 4) на участке 2–3 получает

A11. На рисунке показан процесс изменения состояния идеального газа. Для перевода газа из состояния 1 в состояние 2 газу сообщили 6 кДж теплоты. Работа, совершенная газом, равна

1 2 3 4 **A11**



- 1) 0
- 2) 6 кДж
- 3) –6 кДж
- 4) $\approx 187,5$ кДж

A12. Тепловая машина, работающая по циклу Карно, имеет КПД 40%. Средняя мощность передачи теплоты холодильнику составляет 800 Вт, продолжительность цикла 20 с. Какое количество теплоты получает рабочее тело от нагревателя за цикл?

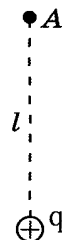
1 2 3 4 **A12**

- 1) 25 мДж
- 2) 2,5 Дж
- 3) 400 Дж
- 4) 26,7 кДж

A13. Положительный заряд $q = 4 \cdot 10^{-8}$ Кл создает электрическое поле (см. рисунок). Напряженность поля в точке А, удаленной на расстояние $l = 8$ см, равна

1 2 3 4 **A13**

- 1) 4,5 мВ/м
- 2) 5,6 В/м
- 3) 45 В/м
- 4) 56 кВ/м



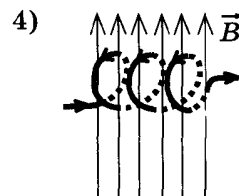
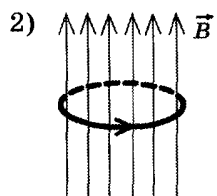
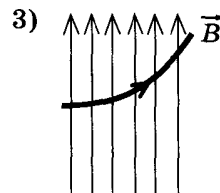
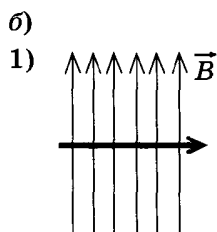
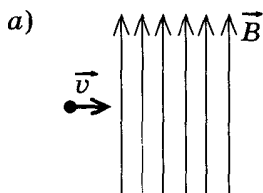
A14 1 2 3 4

A14. Какими заряженными частицами создается электрический ток в растворах и расплавах электролитов?

- 1) электронами и отрицательными ионами
- 2) только свободными электронами
- 3) положительными и отрицательными ионами
- 4) электронами, положительными и отрицательными ионами

A15 1 2 3 4

A15. Протон влетает в однородное магнитное поле со скоростью v (см. рисунок). Укажите правильную траекторию движения протона.



A16 1 2 3 4

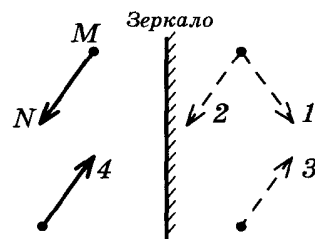
A16. В идеальном колебательном контуре емкость конденсатора уменьшили в 5 раз. Что нужно сделать, чтобы период колебаний остался прежним?

- 1) увеличить индуктивность катушки в 5 раз
- 2) уменьшить индуктивность катушки в 5 раз
- 3) увеличить амплитуду колебаний
- 4) уменьшить частоту колебаний

A17 1 2 3 4

A17. На рисунке показаны предмет (стрелка) MN и плоское зеркало. Какое из изображений предмета — 1, 2, 3 или 4 — является правильным?

- 1) 1
- 2) 2
- 3) 3
- 4) 4

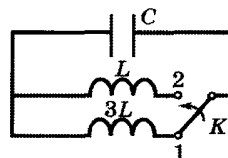


A18. Два резистора сопротивлениями $R_1 = 2 \text{ Ом}$ и $R_2 = 4 \text{ Ом}$ включены параллельно в цепь постоянного тока. Сравните работы электрического тока $\frac{A_2}{A_1}$ на этих резисторах за одинаковое время протекания тока.

- 1) $\frac{1}{4}$ 2) $\frac{1}{2}$ 3) $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 4) 2

A19. Как изменится частота собственных электромагнитных колебаний в контуре (см. рисунок), если ключ К перевести из положения 1 в положение 2?

- 1) уменьшится в 3 раза
2) увеличится в 3 раз
3) уменьшится в $\sqrt{3}$ раз
4) увеличится в $\sqrt{3}$ раз



A20. Какие из приведенных утверждений соответствуют смыслу постулатов Бора?

- А. В атоме электроны движутся по круговым орбитам и излучают при этом электромагнитные волны.
Б. Атом может находиться только в одном из стационарных состояний, в котором атом не излучает энергию.
В. При переходе из одного стационарного состояния в другое атом поглощает или излучает квант электромагнитного излучения.
- 1) только А 3) только В
2) только Б 4) Б и В

A21. При переходе электрона в атоме водорода с одной орбиты на другую, более близкую к ядру, излучаются фотоны с энергией $3,03 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. Чему равна частота излучения атома?

- 1) $4,57 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ 3) $3,03 \cdot 10^{19} \text{ Гц}$
2) $4,57 \cdot 10^{-14} \text{ Гц}$ 4) 50 Гц

A22. Колебательный контур состоит из конденсатора и катушки индуктивности. Амплитуда колебаний силы тока в катушке индуктивности $I_0 = 3 \text{ мА}$, амплитуда напряжения на конденсаторе $U_0 = 2 \text{ В}$. В момент времени t сила тока в катушке $I = 1 \text{ мА}$. Какое напряжение на конденсаторе в этот момент? Потерями энергии на нагревание проводников пренебречь.

- 1) 6 В 2) 5,6 В 3) 2 В 4) 0,95 В

A23. Имеется 8 кг радиоактивного вещества с периодом полураспада 27 лет. Чему равна масса нераспавшегося вещества после 135 лет радиоактивного распада?

- 1) 0,25 кг 2) 4 кг 3) 8 кг 4) 25 кг

1 2 3 4 A18

1 2 3 4 A19

1 2 3 4 A20

1 2 3 4 A21

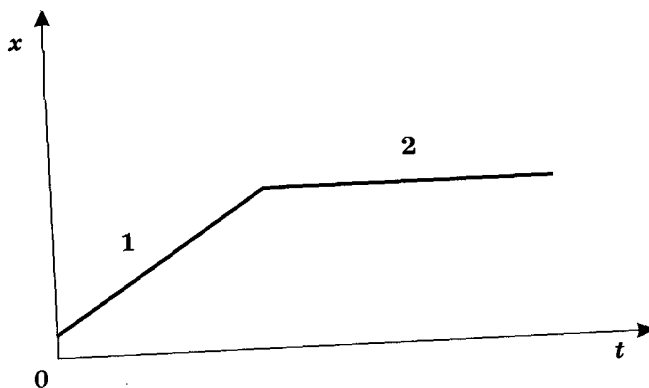
1 2 3 4 A22

1 2 3 4 A23

A24

1 2 3 4

- A24. Легкоподвижная тележка катится по гладкому горизонтальному полу. На рисунке изображен график зависимости координаты тележки от времени движения в инерциальной системе отсчета. Сопротивлением воздуха и трением о поверхность можно пренебречь. На основании графика можно утверждать, что

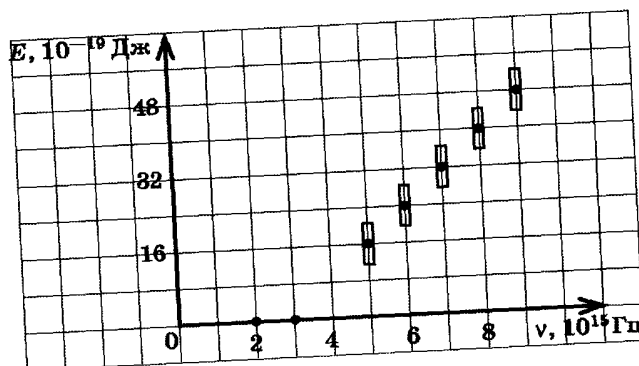


- 1) на участке 1 тележка движется равномерно, а на участке 2 — равноускоренно
- 2) на участке 1 тележка движется равномерно, а на участке 2 — покоится
- 3) на участке 1 тележка движется равноускоренно, а на участке 2 — равномерно
- 4) на участке 1 тележка движется равноускоренно, а на участке 2 — покоится

A25

1 2 3 4

- A25. При изучении явления фотоэффекта исследовалась зависимость энергии E вылетающих из освещенной пластины фотоэлектронов от частоты ν падающего света. Погрешности измерения частоты света и энергии фотоэлектронов составляли соответственно $5 \cdot 10^{13}$ Гц и $4 \cdot 10^{-19}$ Дж. Результаты измерений с учетом их погрешности представлены на рисунке. Постоянная Планка, согласно этим измерениям, приблизительно равна



- 1) $2 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
- 2) $5,0 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
- 3) $6,9 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
- 4) $9 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

Часть 2

В заданиях В1 и В2 требуется указать последовательность цифр, соответствующих правильному ответу. Эту последовательность следует записать сначала в текст экзаменационной работы, а затем перенести в бланк ответов № 1 без пробелов и других символов. (Цифры в ответе могут повторяться.)

- В1.** Установите соответствие между измерительными приборами и физическими явлениями (процессами), лежащими в основе принципа их действия.

 В1

К каждому элементу левого столбца подберите соответствующий элемент из правого и внесите в строку ответов выбранные цифры под соответствующими буквами.

ПРИБОРЫ

- А) Термометр спиртовой
- Б) Амперметр аналоговый
- В) Динамометр пружинный

ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ (ПРОЦЕССЫ)

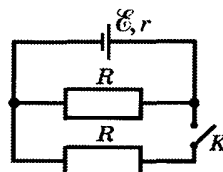
- 1) передача давления внутри жидкости
- 2) тепловое расширение жидкости
- 3) электромагнитная индукция
- 4) действие магнитного поля на проводник с током
- 5) условие равновесия тела
- 6) упругая деформация растяжения (сжатия, изгиба)

О т в е т:

А	Б	В

Получившуюся последовательность цифр перенесите в бланк ответов (без пробелов и каких-либо символов).

- В2.** К источнику постоянного тока с ЭДС и внутренним сопротивлением r подключен резистор сопротивлением R (см. рисунок). Как изменится внешнее сопротивление цепи, сила тока в цепи, ЭДС источника тока при замыкании ключа?


 В2

Установите соответствие между физическими величинами и их изменением: к каждому элементу первого столбца подберите соответствующий элемент из второго и внесите в строку ответов выбранные цифры под соответствующими буквами.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- А) Внешнее сопротивление цепи
Б) Сила тока в цепи
В) ЭДС источника тока

ИЗМЕНЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- 1) увеличится
2) уменьшится
3) не изменится

А	Б	В

Получившуюся последовательность цифр перенесите в бланк ответов (без пробелов и каких-либо символов).

Ответом к заданиям В3–В5 будет некоторое число. Это число надо записать в бланк ответов № 1 справа от номера задания, начиная с первой клеточки. Каждый символ (цифру, запятую, знак «минус» и т.д.) пишите в отдельной клеточке строго по образцу из верхней части бланка. Единицы физических величин писать не нужно.

В3

- В3.** Смещение груза, подвешенного на пружине, изменяется со временем по закону: $x = 8 \cos\left(10t + \frac{\pi}{4}\right)$, см. Максимальная кинетическая энергия груза равна 0,8 Дж. Чему равна жесткость пружины?

В4

- В4.** Два баллона соединены тонкой трубкой и заполнены одинаковым газом. Вместимость первого баллона равна 10 л, второго — 25 л. Во втором баллоне поддерживается температура, в 1,5 раза превышающая температуру первого. Какая часть всего газа содержится во втором баллоне?

В5

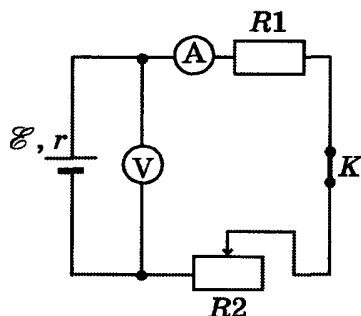
- В5.** Угол падения светового пучка на границу раздела двух сред равен 30° . Чему равен угол преломления светового пучка, если скорость света в первой среде равна $2,5 \cdot 10^8$ м/с? Показатель преломления второй среды равен 1,4. Ответ округлите до целых.

Часть 3

Задания С1–С6 представляют собой задачи, полное решение которых необходимо записать в бланке ответов № 2. Рекомендуется провести предварительное решение на черновике. При оформлении решения в бланке ответов № 2 запишите сначала номер задания (С1 и т.д.), а затем решение соответствующей задачи.

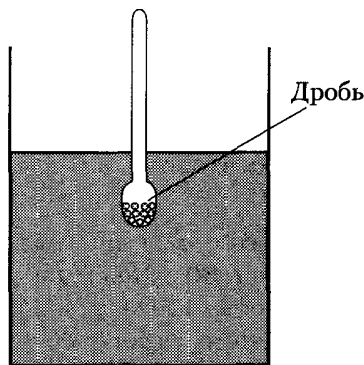
В задаче С1 следует записать развернутый ответ, поясняющий физические процессы, описанные в задаче, и ход ваших рассуждений.

- C1. На рисунке изображена схема электрической цепи. Как будут изменяться показания приборов при перемещении ползунка реостата вправо? Амперметр и вольтметр считать идеальными, сопротивлением подводящих проводников пренебречь.



Полное правильное решение каждой из задач C2–C6 должно включать законы и формулы, применение которых необходимо и достаточно для решения задачи, а также математические преобразования и, при необходимости, рисунок, поясняющий решение. Если требуется, то следует рассчитать числовое значение искомой величины, если нет — оставить решение в буквенном виде.

- C2. Ареометр массой m представляет собой стеклянный сосуд, заполненный дробью, и цилиндрическую трубку с площадью поперечного сечения S (см. рисунок). Он помещен в жидкость плотностью ρ . Ареометр погружают в жидкость несколько глубже, чем это нужно для его равновесия, и затем отпускают. Он начинает совершать колебания в вертикальной плоскости. Считая колебания гармоническими, определите период свободных колебаний ареометра.



- C3. Идеальный газ в количестве 1 моль находится в вертикальном цилиндре под легко скользящим поршнем. Площадь поперечного сечения поршня равна 100 см^2 . При нагревании газа на 58°C поршень поднимается на 40 см. Чему равна масса поршня? Атмосферное давление считать нормальным.
- C4. Из двух одинаковых кусков проволоки изготовлены два контура: первый — в виде квадрата, второй — в виде равностороннего треугольника. Оба контура помещены в однородное магнитное поле. Плоскости контуров перпендикулярны линиям магнитной индукции поля. Когда магнитное поле стало изменяться, в квадратном контуре появился постоянный ток 0,4 А. Какой величины ток возникает во втором контуре?

- С5.** На поверхности водоема плавает фанерный круг радиусом $r = 1$ м. Над центром фанерного круга на некоторой высоте h расположен точечный источник света. Высоту расположения источника света можно менять. Чему равен наибольший радиус теневого круга на плоском дне водоема, глубина которого $H = 5,3$ м? Показатель преломления воды $n = \frac{4}{3}$.
- С6.** В сосуде находится разреженный атомарный водород. Энергия атома в основном состоянии (в низшем энергетическом состоянии) равна $E_1 = -13,6$ эВ. Атом водорода в основном состоянии поглощает фотон и ионизируется. Электрон, вылетевший из атома в результате ионизации, движется вдали от ядра со скоростью $v = 1000$ км/с. Чему равна длина волны излучения, соответствующего поглощенному фотону? Энергией теплового движения атомов водорода пренебречь.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	5
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

Blank answers №2

[illegible]Дополнительный
бланк отчета №2

Part No. 1

1998

Перечислите все члены вашей группы, «код предмета», «название предмета» из БЛАНКА РЕГИСТРАЦИИ. Отметьте на задании типа С, какие из них являются рабочими, обложив разметку страниц. Не забудьте указать номер задания, из которого Вы отметили, например С1. Укажите адресное поле, которое не нужно.

ВНИМАНИЕ! Все бланки и листы с контрольными измерительными материалами рассматриваются в комплексе.

ВАРИАНТ 4*

Часть 1

При выполнении заданий части 1 в бланке ответов № 1 под номером выполняемого вами задания (A1–A25) поставьте знак «х» в клеточке, номер которой соответствует номеру выбранного вами ответа.

- A1. На рисунке приведен график зависимости проекции скорости тела от времени.

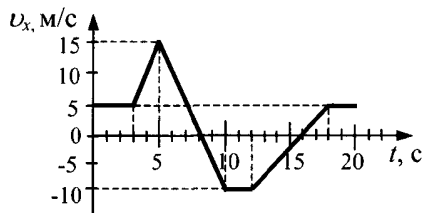
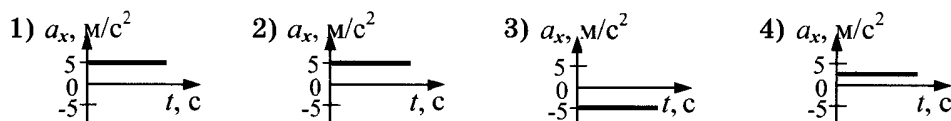


График зависимости проекции ускорения тела a_x от времени в интервале времени от 12 до 16 с совпадает с графиком:



- A2. Полосовой магнит массой m поднесли к массивной стальной плите массой M . Сравните силу действия магнита на плиту F_1 с силой действия плиты на магнит F_2 .

- 1) $F_1 = F_2$; 2) $F_1 > F_2$;
3) $F_1 < F_2$; 4) $\frac{F_1}{F_2} = \frac{m}{M}$.

- A3. При движении по горизонтальной поверхности на тело массой 40 кг действует сила трения скольжения 10 Н. Какой станет сила трения скольжения после уменьшения массы тела в 5 раз, если коэффициент трения не изменится?

- 1) 1 Н; 2) 2 Н;
3) 4 Н; 4) 8 Н.

- A4. Легковой автомобиль и грузовик движутся со скоростями $v_1 = 108 \text{ км/ч}$ и $v_2 = 54 \text{ км/ч}$. Масса легкового автомобиля $m = 1000 \text{ кг}$. Какова масса грузовика, если отношение импульса грузовика к импульсу легкового автомобиля равно 1,5?

- 1) 3000 кг; 2) 4500 кг;
3) 1500 кг; 4) 1000 кг.

* Вариант 4 является демонстрационным вариантом КИМ ЕГЭ 2009 г.
(www.fipi.ru)

1 2 3 4 A1

1 2 3 4 A2

1 2 3 4 A3

1 2 3 4 A4

A5 1 2 3 4

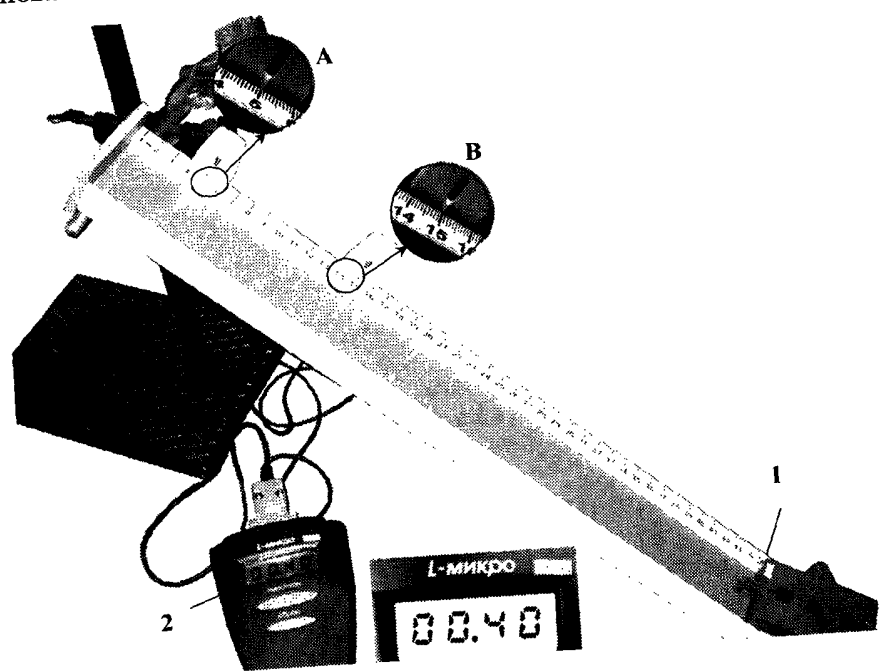
A6 1 2 3 4

- A5. Санки массой m тянут в гору с постоянной скоростью. Когда санки выйдут на высоту h от первоначального положения, их полная механическая энергия:
- 1) не изменится;
 - 2) увеличится на mgh ;
 - 3) будет неизвестна, так как не задан наклон горки;
 - 4) будет неизвестна, так как не задан коэффициент трения.

- A6. Принято считать, что женский голос сопрано занимает частотный интервал от $\nu_1 = 250$ Гц до $\nu_2 = 1000$ Гц. Отношение граничных длин звуковых волн $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ этого интервала равно:

- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) $\frac{1}{4}$;
- 4) 4.

- A7. На фотографии показана установка для исследования равноускоренного скольжения каретки (1) массой 0,1 кг по наклонной плоскости, установленной под углом 30° к горизонту.



В момент начала движения верхний датчик (А) включает секундомер (2), а при прохождении каретки мимо нижнего датчика (В) секундомер выключается. Числа на линейке обозначают длину в сантиметрах. Какое выражение описывает зависимость скорости каретки от времени? (Все величины указаны в единицах СИ.)

- 1) $u = 1,25t$;
- 2) $u = 0,5t$;
- 3) $u = 2,5t$;
- 4) $u = 1,9t$.

A8. При понижении абсолютной температуры одноатомного идеального газа в 1,5 раза средняя кинетическая энергия теплового движения его молекул:

- 1) увеличится в 1,5 раза;
- 2) уменьшится в 1,5 раза;
- 3) уменьшится в 2,25 раза;
- 4) не изменится.

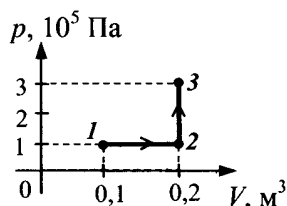
A9. Горячая жидкость медленно охлаждалась в стакане. В таблице приведены результаты измерений ее температуры с течением времени.

Время, мин	0	2	4	6	8	10	12	14
Температура, °C	95	88	81	80	80	80	77	72

В стакане через 7 мин после начала измерений находилось вещество:

- 1) только в жидком состоянии;
- 2) только в твердом состоянии;
- 3) и в жидком, и в твердом состояниях;
- 4) и в жидком, и в газообразном состояниях.

A10. Какую работу совершает газ при переходе из состояния 1 в состояние 3 (см. рисунок)?

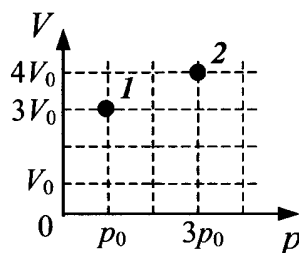


- 1) 10 кДж;
- 2) 20 кДж;
- 3) 30 кДж;
- 4) 40 кДж.

A11. В тепловой машине температура нагревателя 600 К, температура холодильника на 200 К меньше, чем у нагревателя. Максимально возможный КПД машины равен:

- 1) $\frac{3}{4}$;
- 2) $\frac{2}{3}$;
- 3) $\frac{1}{2}$;
- 4) $\frac{1}{3}$.

A12. В сосуде находится постоянное количество идеального газа. Как изменится температура газа, если он перейдет из состояния 1 в состояние 2 (см. рисунок)?



- 1) $T_2 = 4T_1$;
- 2) $T_2 = \frac{1}{4}T_1$;
- 3) $T_2 = \frac{4}{3}T_1$;
- 4) $T_2 = \frac{3}{4}T_1$.

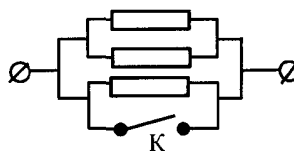
A13 1 2 3 4

A13. Расстояние между двумя точечными электрическими зарядами уменьшили в 3 раза, а один из зарядов увеличили в 3 раза. Силы взаимодействия между ними:

- 1) не изменились;
- 2) уменьшились в 3 раза;
- 3) увеличились в 3 раза;
- 4) увеличились в 27 раз.

A14 1 2 3 4

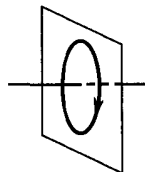
A14. Каким будет сопротивление участка цепи (см. рисунок), если ключ К замкнуть? (Каждый из резисторов имеет сопротивление R .)



- 1) R ;
- 2) $2R$;
- 3) $3R$;
- 4) 0.

A15 1 2 3 4

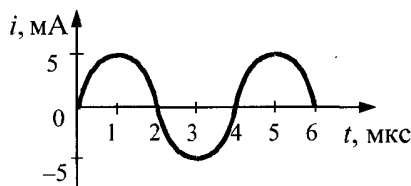
A15. На рисунке изображен проволочный виток, по которому течет электрический ток в направлении, указанном стрелкой. Виток расположен в вертикальной плоскости. В центре витка вектор индукции магнитного поля тока направлен:



- 1) вертикально вверх $\uparrow$;
- 2) вертикально вниз $\downarrow$;
- 3) горизонтально вправо $\rightarrow$;
- 4) горизонтально влево $\leftarrow$.

A16 1 2 3 4

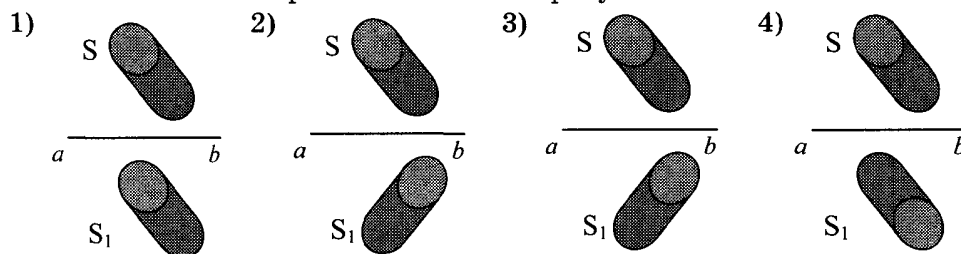
A16. На рисунке приведен график гармонических колебаний тока в колебательном контуре. Если катушку в этом контуре заменить на другую катушку, индуктивность которой в 4 раза меньше, то период колебаний станет равен;



- 1) 1 мкс;
- 2) 2 мкс;
- 3) 4 мкс;
- 4) 8 мкс.

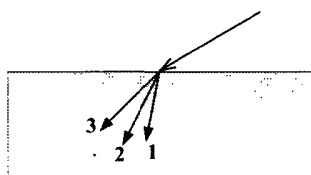
A17. Источник света S отражается в плоском зеркале ab . Изображение S_1 этого источника в зеркале показано на рисунке:

1 2 3 4 A17



A18. В некотором спектральном диапазоне угол преломления лучей на границе воздух-стекло падает с увеличением частоты излучения. Ход лучей для трех основных цветов при падении белого света из воздуха на границу раздела показан на рисунке. Цифрам соответствуют цвета:

1 2 3 4 A18



- | | |
|-----------------|---------------|
| 1) 1 — красный; | 2) 1 — синий; |
| 2 — зеленый; | 2 — красный; |
| 3 — синий; | 3 — зеленый; |
| 3) 1 — красный; | 4) 1 — синий; |
| 2 — синий; | 2 — зеленый; |
| 3 — зеленый; | 3 — красный. |

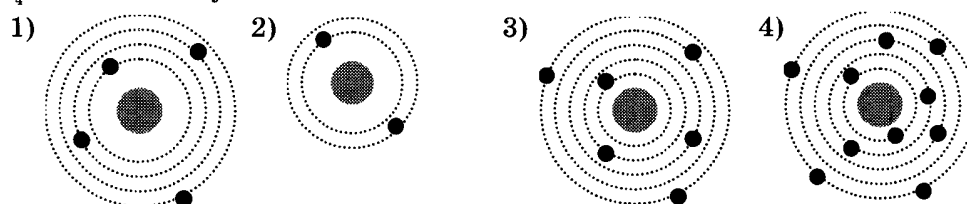
A19. На входе в электрическую цепь квартиры стоит предохранитель, размыкающий цепь при силе тока 10 А. Подаваемое в цепь напряжение равно 110 В. Какое максимальное число электрических чайников, мощность каждого из которых равна 400 Вт, можно одновременно включить в квартире?

1 2 3 4 A19

- 1) 2,7;
2) 2;
3) 3;
4) 2,8.

A20. На рисунке изображены схемы четырех атомов, соответствующие модели атома Резерфорда. Черными точками обозначены электроны. Атому ${}^6_4\text{Be}$ соответствует схема:

1 2 3 4 A20



1 2 3 4

- A21. Период полураспада ядер атомов радия $^{226}_{88}\text{Ra}$ составляет 1620 лет. Это означает, что в образце, содержащем большое число атомов радия,
- 1) за 1620 лет атомный номер каждого атома радия уменьшится вдвое;
 - 2) одно ядро радия распадается каждые 1620 лет;
 - 3) половина изначально имевшихся ядер радия распадается за 1620 лет;
 - 4) все изначально имевшиеся ядра радия распадутся через 3240 лет.

1 2 3 4

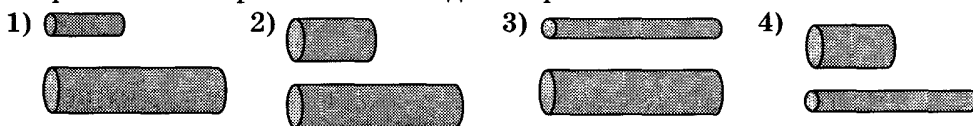
- A22. Радиоактивный свинец $^{212}_{82}\text{Pb}$, испытав один α -распад и два β -распада, превратился в изотоп:
- 1) висмута $^{212}_{83}\text{Bi}$;
 - 2) полония $^{212}_{84}\text{Po}$;
 - 3) свинца $^{208}_{82}\text{Pb}$;
 - 4) таллия $^{208}_{81}\text{Tl}$.

1 2 3 4

- A23. Фотоэффект наблюдают, освещая поверхность металла светом фиксированной частоты. При этом задерживающая разность потенциалов равна U . После изменения частоты света задерживающая разность потенциалов увеличилась на $\Delta U = 1,2$ В. На сколько изменилась частота падающего света?
- 1) $1,8 \cdot 10^{14}$ Гц;
 - 2) $2,9 \cdot 10^{14}$ Гц;
 - 3) $6,1 \cdot 10^{14}$ Гц;
 - 4) $1,9 \cdot 10^{15}$ Гц.

1 2 3 4

- A24. Проводники изготовлены из одного и того же материала. Какую пару проводников нужно выбрать, чтобы на опыте обнаружить зависимость сопротивления проволоки от ее диаметра?



1 2 3 4

- A25. Исследовалась зависимость напряжения на обкладках воздушного конденсатора от заряда этого конденсатора. Результаты измерений представлены в таблице.

q , мкКл	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
U , кВ	0	0,5	1,5	3,0	3,5	3,5

Погрешности измерений величин q и U равнялись соответственно 0,05 мкКл и 0,25 кВ. Емкость конденсатора примерно равна:

- 1) 250 пФ;
- 2) 10 нФ;
- 3) 100 пФ;
- 4) 750 мкФ.

Часть 2

В заданиях В1–В2 требуется указать последовательность цифр, соответствующих правильному ответу. Эту последовательность следует записать сначала в текст экзаменационной работы, а затем перенести в бланк ответов № 1 без пробелов и других символов. (Цифры в ответе могут повторяться.)

- В1.** Груз массой m , подвешенный на пружине, совершает гармонические колебания с периодом T и амплитудой x_0 . Что произойдет с максимальной потенциальной энергией пружины, периодом и частотой колебаний, если при неизменной амплитуде уменьшить массу груза?

В1

К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

ИЗ ИЗМЕНЕНИЯ

- | | |
|--|------------------|
| А) период колебаний; | 1) увеличится; |
| Б) частота колебаний; | 2) уменьшится; |
| В) максимальная потенциальная энергия пружины. | 3) не изменится. |

А	Б	В

Получившуюся последовательность цифр перенесите в бланк ответов (без пробелов и каких-либо символов).

- В2.** Используя первый закон термодинамики, установите соответствие между описанными в первом столбце особенностями изопроцесса в идеальном газе и его названием.

В2

ОСОБЕННОСТИ ИЗОПРОЦЕССА

НАЗВАНИЕ

- | | |
|--|--------------------|
| А) Все переданное газу количество теплоты идет на совершение работы, а внутренняя энергия газа остается неизменной. | 1) изотермический; |
| | 2) изобарный; |
| | 3) изохорный; |
| Б) Изменение внутренней энергии газа происходит только за счет совершения работы, так как теплообмен с окружающими телами отсутствует. | 4) адиабатный. |

А	Б

Получившуюся последовательность цифр перенесите в бланк ответов (без пробелов и каких-либо символов).

Ответом к каждому заданию В3–В5 будет некоторое число. Это число надо записать в бланк ответов № 1 справа от номера задания, начиная с первой клеточки. Каждый символ (цифру, запятую, знак минус) пишите в отдельной клеточке в соответствии с приведенными в бланке образцами. Единицы физических величин писать не нужно.

В3

В4

В5

В3. Летящий снаряд разрывается на два осколка. По отношению к направлению движения снаряда первый осколок летит под углом 90° со скоростью 50 м/с , а второй — под углом 30° со скоростью 100 м/с . Найдите отношение массы первого осколка к массе второго осколка.

В4. В теплоизолированный сосуд с большим количеством льда при температуре $t_1 = 0^\circ\text{C}$ заливают $m = 1 \text{ кг}$ воды с температурой $t_2 = 44^\circ\text{C}$. Какая масса льда Δm расплавится при установлении теплового равновесия в сосуде? Ответ выразите в граммах.

В5. Предмет высотой 6 см расположен на главной оптической оси тонкой собирающей линзы на расстоянии 30 см от ее оптического центра. Оптическая сила линзы 5 дптр . Найдите высоту изображения предмета. Ответ выразите в сантиметрах (см).

Не забудьте перенести все ответы в бланк ответов № 1.

Часть 3

Задания С1–С6 представляют собой задачи, полное решение которых необходимо записать в бланке ответов № 2. Рекомендуется провести предварительное решение на черновике. При оформлении решения в бланке ответов № 2 запишите сначала номер задания (С1 и т. д.), а затем решение соответствующей задачи.

В задаче С1 следует записать развернутый ответ, поясняющий физические процессы, описанные в задаче, и ход ваших рассуждений.

С1. Человек в очках вошел с улицы в теплую комнату и обнаружил, что его очки запотели. Какой должна быть температура на улице, чтобы наблюдалось это явление? В комнате температура воздуха 22°C , а относительная влажность воздуха 50% . Поясните, как вы получили ответ.

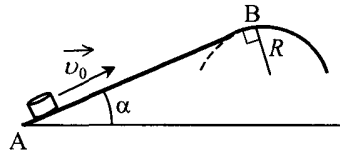
(При ответе на этот вопрос воспользуйтесь таблицей для давления насыщенных паров воды.)

Давление насыщенных паров воды при различных температурах

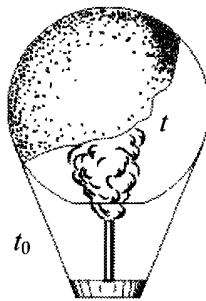
$t, ^\circ\text{C}$	8	9	10	11	12	13	14	15
$p, \text{кПа}$	1,07	1,15	1,23	1,31	1,40	1,50	1,60	1,70
$t, ^\circ\text{C}$	16	17	18	19	20	21	22	23
$p, \text{кПа}$	1,82	1,94	2,06	2,20	2,34	2,49	2,64	2,81

Полное правильное решение каждой из задач С2–С5 должно включать законы и формулы, применение которых необходимо и достаточно для решения задачи, а также математические преобразования, расчеты с численным ответом и, при необходимости, рисунок, поясняющий решение.

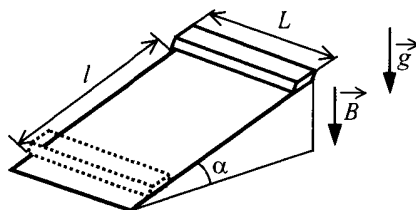
- С2. Небольшая шайба после удара скользит вверх по наклонной плоскости из точки А (см. рисунок). В точке В наклонная плоскость без излома переходит в наружную поверхность горизонтальной трубы радиусом R . Если в точке А скорость шайбы превосходит $v_0 = 4$ м/с, то в точке В шайба отрывается от опоры. Длина наклонной плоскости $AB = L = 1$ м, угол $\alpha = 30^\circ$. Коэффициент трения между наклонной плоскостью и шайбой $\mu = 0,2$. Найдите внешний радиус трубы R .



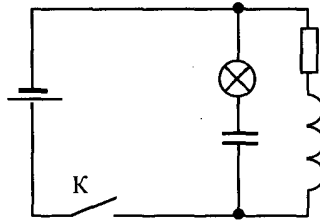
- С3. Воздушный шар, оболочка которого имеет массу $M = 145$ кг и объем $V = 230$ м³, наполняется горячим воздухом при нормальном атмосферном давлении и температуре окружающего воздуха $t_0 = 0^\circ\text{C}$. Какую минимальную температуру t должен иметь воздух внутри оболочки, чтобы шар начал подниматься? Оболочка шара нерастяжима и имеет в нижней части небольшое отверстие.



- С4. Тонкий алюминиевый брусок прямоугольного сечения, имеющий длину $L = 0,5$ м, соскальзывает из состояния покоя по гладкой наклонной плоскости из диэлектрика в вертикальном магнитном поле с индукцией $B = 0,1$ Тл (см. рисунок). Плоскость наклонена к горизонту под углом $\alpha = 30^\circ$. Продольная ось бруска при движении сохраняет горизонтальное направление. Найдите величину ЭДС индукции на концах бруска в момент, когда брусок пройдет по наклонной плоскости расстояние $l = 1,6$ м.



- С5. В электрической цепи, показанной на рисунке, ЭДС источника тока равна 12 В, емкость конденсатора 2 мФ, индуктивность катушки 5 мГн, сопротивление лампы 5 Ом и сопротивление резистора 3 Ом. В начальный момент времени ключ К замкнут. Какая энергия выделится в лампе после размыкания ключа? Внутренним сопротивлением источника тока, а также сопротивлением катушки и проводов пренебречь.



- С6. π^0 -мезон массой $2,4 \cdot 10^{-28}$ кг распадается на два γ -кванта. Найдите модуль импульса одного из образовавшихся γ -квантов в системе отсчета, где первичный π^0 -мезон покоится.

А Б В Г Д Е Ё Ж З И Й К Л М Н О П Р С Т У Ф Х Ц Ч Ш Щ Ъ Ы Ь Э Ю Я 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
А В С D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z , - . : ; ' " % & * + = < > ? @ [\] ^ _ { | } ~ ¡ ¢ £ ¤ ¥ ¦ § ¨ © ª « ¬ ® ¯ ° ± ² ³ ´ µ ¶ · ¸ ¹ º » ¼ ½ ¾ ¿

Figure 1

Будьте аккуратны. Случайный штрих внутри квадрата может быть воспринят как метка.

[illegible]

Бланк ответов №2

[illegible]

Дополнительный
бланк отчета №2

Page 1

Росгос-8

YCH 0000 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000

ВНИМАНИЕ! Все бланки и листы с контрольными измерительными материалами рассматриваются в комплексе.

ОТВЕТЫ

ВАРИАНТ 1

Часть 1

Задание	Ответ	Задание	Ответ	Задание	Ответ
A1	3	A10	2	A19	2
A2	2	A11	3	A20	3
A3	2	A12	3	A21	2
A4	3	A13	3	A22	2
A5	4	A14	3	A23	2
A6	2	A15	4	A24	2
A7	4	A16	4	A25	2
A8	2	A17	2		
A9	3	A18	2		

Часть 2

Задание	Ответ
B1	24
B2	221
B3	3
B4	3,2
B5	1,5

Часть 3

Задание	Ответ
C1	Под действием электрического поля пластин изменяется распределение электронов в шарике, произойдет его электризация. Шарик приобретает тот же заряд, что и пластина, на которой он лежит (в данном случае — отрицательный). Отрицательно заряженный шарик будет отталкиваться от нижней пластины и притягиваться к верхней пластине. По условию шарик легкий, поэтому он поднимется к положительно заряженной пластине и, коснувшись ее, поменяет знак заряда на положительный. Затем шарик оттолкнется от верхней пластины и притянется к нижней. Шарик вернется к нижней пластине и вновь поменяет знак своего заряда на отрицательный. Такое движение вверх-вниз будет повторяться.
C2	$Q = \frac{m_1 v_0^2}{2} + m_2 gh - \frac{m_1^2 v_0^2}{2(m_1 + m_2)} = 1,5 \text{ Дж}$
C3	$A_{23} = A - \frac{5}{2} \nu R \Delta T$

Задание	Ответ
C4	$P = \frac{r^2 B^2 I}{2} \cdot \frac{q}{m} = 2 \text{ Вт}$
C5	$n = \frac{\sin 43^\circ}{\sin 30^\circ} \approx 1,4$
C6	$v = \frac{2P\tau}{cm} = 5 \text{ мм/с}$

ВАРИАНТ 2

Часть 1

Задание	Ответ	Задание	Ответ	Задание	Ответ
A1	4	A10	4	A19	3
A2	4	A11	3	A20	1
A3	1	A12	2	A21	4
A4	3	A13	1	A22	1
A5	3	A14	2	A23	3
A6	3	A15	4	A24	2
A7	3	A16	4	A25	3
A8	1	A17	3		
A9	4	A18	4		

Часть 2

Задание	Ответ
B1	135
B2	113
B3	2,5
B4	2732
B5	32

Часть 3

Задание	Ответ
C1	A ₂₃ Примечание: изобразите цикл в диаграмме pV.

Задание	Ответ
C2	$F_{\text{д}} = m \left[g - \frac{2(mgH - mgR - A_{\text{мп}})}{mR} \right] = 10 \text{ Н}$
C3	$U = \frac{3}{2} \left(p + \frac{mg}{S} \right) V = 900 \text{ Дж}$
C4	$Q = \frac{\pi^2 B^2 r^4 N \nu}{R}$
C5	$t = \frac{2F}{v_0} = 0,04 \text{ с}$
C6	$v = \sqrt{\frac{2pc}{m}} \approx 770 \text{ км/с}$

ВАРИАНТ 3

Часть 1

Задание	Ответ	Задание	Ответ	Задание	Ответ
A1	3	A10	4	A19	4
A2	2	A11	2	A20	4
A3	2	A12	4	A21	1
A4	2	A13	4	A22	4
A5	4	A14	3	A23	1
A6	3	A15	2	A24	2
A7	3	A16	1	A25	4
A8	1	A17	1		
A9	2	A18	2		

Часть 2

Задание	Ответ
B1	246
B2	213
B3	250
B4	$\frac{5}{8}$
B5	25

Часть 3

Задание	Ответ
C1	По условию задачи сопротивлением амперметра можно пренебречь, а сопротивление вольтметра бесконечно велико. При перемещении ползунка реостата вправо сопротивление реостата R_2 увеличивается, что ведет к увеличению сопротивления всей цепи. Сила тока в цепи определяется законом Ома для полной цепи: $I = \varepsilon / (R + r) \quad (1),$ где R — сопротивление внешней цепи. $R = R_1 + R_2.$ $I = \varepsilon / (R_1 + R_2 + r).$ Следовательно, сила тока в цепи уменьшается. Преобразуем уравнение (1): $U = \varepsilon - Ir.$ По закону Ома для участка цепи: $I = U/R$ или $IR = U.$ Поэтому $U = \varepsilon - Ir. \quad (2)$ Напряжение, измеряемое вольтметром, растет.
C2	$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{\rho g S}}$
C3	$m = \frac{\nu R \Delta T - Sh p_0}{gh} \approx 20 \text{ кг}$
C4	$I_2 = \frac{4\sqrt{3}}{9} \cdot I_1 \approx 0,3 \text{ А}$
C5	$R_{\max} = r + \frac{H}{\sqrt{n^2 - 1}} = 7 \text{ м}$
C6	$\lambda = \frac{hc}{\frac{mv^2}{2} - E_1} \approx 7,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}$

ВАРИАНТ 4

Часть 1

Задание	Ответ	Задание	Ответ	Задание	Ответ
A1	4	A10	1	A19	2
A2	1	A11	4	A20	1
A3	2	A12	1	A21	3
A4	1	A13	4	A22	3
A5	2	A14	4	A23	2
A6	4	A15	3	A24	3
A7	1	A16	2	A25	3
A8	2	A17	3		
A9	3	A18	4		

Часть 2

Задание	Ответ
B1	213
B2	14
B3	1
B4	560
B5	12

Часть 3

Задание	Ответ
C1	температура на улице не выше 11 °C.
C2	$R = \frac{v_0^2}{g \cos \alpha} - 2L(\mu + \operatorname{tg} \alpha) \approx 0,3 \text{ м.}$
C3	$T_{\min} = T_0 \cdot \frac{p\mu V}{p\mu V - MRT_0} \approx 538 \text{ К} = 265 \text{ °C.}$
C4	$ \varepsilon = BL \cos \alpha \sqrt{2gl \sin \alpha} \approx 0,17 \text{ В.}$
C5	$E_{\text{з}} = \frac{5}{8} E = 0,115 \text{ Дж.}$
C6	$p = \frac{mc}{2} = 3,6 \cdot 10^{20} \text{ кг} \cdot \text{м/с.}$

Учебное издание

Для старшего школьного возраста

ЕГЭ. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СПРАВОЧНИК

Бальва Ольга Павловна
Фадеева Алевтина Алексеевна

ЕГЭ

Физика

Универсальный справочник

Директор редакции *И. Федосова*
Ответственный редактор *А. Жилинская*
Ведущий редактор *Т. Судакова*
Научный редактор *Н. Зорин*
Редактор *О. Каширина*
Художественный редактор *Е. Брынчик*

ООО «Издательство «Эксмо»
127299, Москва, ул. Клары Цеткин, д. 18/5. Тел. 411-68-86, 956-39-21.
Home page: www.eksmo.ru E-mail: info@eksmo.ru

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 оформ-
лении, обращаться по тел. 411-68-59 доб. 2115, 2117, 2118. E-mail: vipzakaz@eksmo.ru**

**Оптовая торговля бумажно-беловыми
и канцелярскими товарами для школы и офиса «Канц-Эксмо»:**
Компания «Канц-Эксмо»: 142702, Московская обл., Ленинский р-н, г. Видное-2,
Белокаменное ш., д. 1, а/я 5. Тел./факс +7 (495) 745-28-87 (многоканальный).
e-mail: kanc@eksmo-sale.ru, сайт: www.kanc-eksmo.ru

Полный ассортимент книг издательства «Эксмо» для оптовых покупателей:
В Санкт-Петербурге: ООО СЗКО, пр-т Обуховской Обороны, д. 84Е. Тел. (812) 365-46-03/04.
В Нижнем Новгороде: ООО ТД «Эксмо НН», ул. Маршала Воронова, д. 3. Тел. (8312) 72-36-70.
В Казани: Филиал ООО «РДЦ-Самара», ул. Фрезерная, д. 5. Тел. (843) 570-40-45/46.
В Ростове-на-Дону: ООО «РДЦ-Ростов», пр. Стачки, 243А. Тел. (863) 220-19-34.
В Самаре: ООО «РДЦ-Самара», пр-т Кирова, д. 75/1, литера «Е». Тел. (846) 269-66-70.
В Екатеринбурге: ООО «РДЦ-Екатеринбург», ул. Прибалтийская, д. 24а. Тел. (343) 378-49-45.
В Киеве: ООО «РДЦ Эксмо-Украина», Московский пр-т, д. 9. Тел./факс (044) 495-79-80/81.
Во Львове: ТП ООО «Эксмо-Запад», ул. Бузкова, д. 2. Тел./факс (032) 245-00-19.
В Симферополе: ООО «Эксмо-Крым», ул. Киевская, д. 153. Тел./факс (0652) 22-90-03, 54-32-99.
В Казахстане: ТОО «РДЦ-Алматы», ул. Домбровского, д. 3а. Тел./факс (727) 251-59-90/91.
rdc-almaty@mail.ru

Полный ассортимент продукции издательства «Эксмо»:
В Москве в сети магазинов «Новый книжный»:
Центральный магазин — Москва, Сухарева пл., 12. Тел. 937-85-81.
Волгоградский пр-т, д. 78, тел. 177-22-11; ул. Братиславская, д. 12. Тел. 346-99-95.
Информация о магазинах «Новый книжный» по тел. 780-58-81.
В Санкт-Петербурге в сети магазинов «Буквоед»:
«Магазин на Невском», д. 13. Тел. (812) 310-22-44.

Подписано в печать 24.09.2009.
Формат 84×108 ¹/₃₂. Печать офсетная. Бумага тип. Усл. печ. л. 36,96.
Тираж 5 000 экз. Заказ 1731

Отпечатано с электронных носителей издательства.
ОАО «Тверской полиграфический комбинат». 170024, г. Тверь, пр-т Ленина, 5.
Телефон: (4822) 44-52-03, 44-50-34, Телефон/факс: (4822) 44-42-15
Home page - www.tverpk.ru Электронная почта (E-mail) - sales@tverpk.ru

