

**ЭФФЕКТИВНАЯ
ПОДГОТОВКА
К ЕГЭ**

ЕГЭ

ФИЗИКА

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СПРАВОЧНИК

- Подробный теоретический материал
- Тренировочные задания
- Ответы ко всем заданиям



**ЭФФЕКТИВНАЯ
ПОДГОТОВКА
К ЕГЭ**

ЕГЭ

О. П. БАЛЬВА

ФИЗИКА

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СПРАВОЧНИК



Москва
2019

УДК 373:53
ББК 22.3я721
Б21

Бальва, Ольга Павловна.
Б21 ЕГЭ. Физика : универсальный справочник / О.П. Бальва. —
Москва : Эксмо, 2019. — 304 с. — (ЕГЭ. Универсальный справочник).
ISBN 978-5-04-104162-5

Справочник предназначен для подготовки учащихся к ЕГЭ по физике.
Пособие содержит подробный теоретический материал по всем темам, проверяемым экзаменом. После каждого раздела даются примеры заданий ЕГЭ и тренировочный тест. Ко всем заданиям приводятся ответы.
Издание будет полезно учителям физики, так как даёт возможность эффективно организовать учебный процесс и подготовку к экзамену.

УДК 373:53
ББК 22.3я721

Содержание

Раздел 1

МЕХАНИКА

1.1. Кинематика	9	1.3. Статика	46
1.1.1. Механическое движение. Относительность механического движения. Система отсчета	9	1.3.1. Момент силы	46
1.1.2. Материальная точка.	10	1.3.2. Равновесие механической системы (абсолютно твердого тела)	47
1.1.3. Скорость материальной точки.	14	1.3.3. Закон Паскаля	48
1.1.4. Ускорение материальной точки.	16	1.3.4. Давление покоящейся жидкости на дно и стенки сосуда (гидростатическое давление) ...	49
1.1.5. Равномерное прямолинейное движение	16	1.3.5. Закон Архимеда	51
1.1.6. Равноускоренное прямолинейное движение	18	1.3.6. Условие плавания тел.	53
1.1.7. Свободное падение. Ускорение свободного падения.	19	• Примеры заданий ЕГЭ по теме 1.3 «Статика»	56
1.1.8. Равномерное движение точки по окружности ...	21	1.4. Законы сохранения в механике	58
1.1.9. Поступательное и вращательное движение твердого тела.	23	1.4.1. Импульс тела	58
• Примеры заданий ЕГЭ по теме 1.1 «Кинематика»	24	1.4.2. Импульс системы тел. Закон изменения импульса.	58
1.2. Динамика	26	1.4.3. Закон сохранения импульса	59
1.2.1. Инерциальные системы отсчета. Первый закон Ньютона. Принцип относительности Галилея.	26	1.4.4. Работа силы	60
1.2.2. Масса тела. Плотность вещества.	29	1.4.5. Мощность силы.	62
1.2.3. Взаимодействие. Сила. Принцип суперпозиции сил	30	1.4.6. Кинетическая энергия. Закон изменения кинетической энергии	62
1.2.4. Второй закон Ньютона	32	1.4.7. Потенциальная энергия.	64
1.2.5. Третий закон Ньютона	34	1.4.8. Закон изменения и сохранения механической энергии.	64
1.2.6. Закон всемирного тяготения	35	• Примеры заданий ЕГЭ по теме 1.4 «Законы сохранения в механике»	70
1.2.7. Движение небесных тел	38	1.5. Механические колебания и волны	72
1.2.8. Сила упругости. Закон Гука	39	1.5.1. Гармонические колебания	73
1.2.9. Сила трения	40	1.5.2. Свободные колебания математического и пружинного маятников	74
1.2.10. Давление	42	1.5.3. Вынужденные колебания. Резонанс	77
• Примеры заданий ЕГЭ по теме 1.2 «Динамика»	44	1.5.4. Упругие волны (механические волны)	79
		1.5.5. Звук (звуковые волны)	85
		• Примеры заданий ЕГЭ по теме 1.5 «Механические колебания и волны»	92

Раздел 2

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

2.1. Молекулярная физика	94
2.1.1. Модели строения газов, жидкостей и твердых тел	96
2.1.2. Тепловое движение атомов и молекул вещества	99
2.1.3. Взаимодействие частиц вещества	99
2.1.4. Броуновское движение. Диффузия	100
2.1.5. Модель идеального газа в МКТ	102
2.1.6. Основное уравнение МКТ (давление газа)	102
2.1.7. Абсолютная температура	103
2.1.8. Температура как мера кинетической энергии ..	105
2.1.9. Уравнение $p = nkT$	105
2.1.10. Уравнение Менделеева — Клапейрона (уравнение состояния идеального газа)	106
2.1.11. Закон Дальтона	107
2.1.12. Изопроцессы в газах	108
2.1.13. Насыщенные и ненасыщенные пары	110
2.1.14. Влажность воздуха	111
2.1.15. Изменение агрегатных состояний вещества: испарение и конденсация, кипение жидкости	112
2.1.16. Изменение агрегатных состояний вещества: плавление и кристаллизация	116
2.1.17. Преобразование энергии в фазовых переходах	118
• Примеры заданий ЕГЭ по теме 2.1 «Молекулярная физика»	120
2.2. Термодинамика	122
2.2.1. Тепловое равновесие и температура	122
2.2.2. Внутренняя энергия	123
2.2.3. Теплообмен	124
2.2.4. Количество теплоты. Удельная теплоемкость вещества	127
2.2.5. Удельная теплота парообразования, плавления, сгорания	128
2.2.6. Работа в термодинамике	130
2.2.7. Первый закон термодинамики	131
2.2.8. Второй закон термодинамики. Необратимость	134

2.2.9. Принцип действия тепловых двигателей	134
2.2.10. Цикл Карно	135
2.2.11. Уравнение теплового баланса	137

• Примеры заданий ЕГЭ по теме 2.2 «Термодинамика»	138
---------------------------------------------------------	-----

Раздел 3

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

3.1. Электрическое поле	140
3.1.1. Электрические заряды. Закон сохранения заряда	140
3.1.2. Закон Кулона	142
3.1.3. Электрическое поле. Действие электрического поля на электрические заряды	143
3.1.4. Напряженность электрического поля	144
3.1.5. Принцип суперпозиции электрических полей	145
3.1.6. Потенциальность электростатического поля	146
3.1.7. Проводники в электрическом поле	148
3.1.8. Диэлектрики в электрическом поле	149
3.1.9. Электрическая емкость конденсатора	150
3.1.10. Параллельное и последовательное соединение конденсаторов	151
3.1.11. Энергия поля конденсатора	151
• Примеры заданий ЕГЭ по теме 3.1 «Электрическое поле»	152
3.2. Законы постоянного тока	154
3.2.1. Сила тока	154
3.2.2. Условия существования электрического тока ..	154
3.2.3. Закон Ома для участка цепи	155
3.2.4. Электрическое сопротивление	156
3.2.5. Электродвижущая сила. Внутреннее сопротивление источника тока	157
3.2.6. Закон Ома для полной электрической цепи ..	158
3.2.7. Параллельное и последовательное соединение проводников	159
3.2.8. Работа электрического тока. Закон Джоуля — Ленца	160

3.2.9. Мощность электрического тока.	161	3.6. Оптика	210
3.2.10. Свободные носители электрического заряда в металлах, жидкостях и газах. Полупроводники	162	3.6.1. Прямолинейное распространение света в однородной среде	210
• Примеры заданий ЕГЭ по теме 3.2 «Законы постоянного тока»	168	3.6.2. Закон отражения света	213
3.3. Магнитное поле	170	3.6.3. Построение изображений в плоском зеркале ..	215
3.3.1. Магнитное поле. Взаимодействие магнитов ...	170	3.6.4. Закон преломления света	216
3.3.2. Опыты Эрстеда и Ампера. Индукция магнитного поля	172	3.6.5. Полное внутреннее отражение	218
3.3.3. Сила Ампера	177	3.6.6. Линзы. Фокусное расстояние и оптическая сила линзы	219
3.3.4. Сила Лоренца	177	3.6.7. Построение изображений в линзах	221
• Примеры заданий ЕГЭ по теме 3.3 «Магнитное поле»	180	3.6.8. Формула тонкой линзы	222
3.4. Электромагнитная индукция.	182	3.6.9. Фотоаппарат как оптический прибор. Глаз как оптическая система	223
3.4.1. Магнитный поток	182	3.6.10. Интерференция света	224
3.4.2. Явление электромагнитной индукции.	182	3.6.11. Дифракция света.	226
3.4.3. Закон электромагнитной индукции Фарадея.	183	3.6.12. Дисперсия света	229
3.4.4. ЭДС индукции в движущихся проводниках ...	185	• Примеры заданий ЕГЭ по теме 3.6 «Оптика»	230
3.4.5. Правило Ленца	185	Раздел 4	
3.4.6. Самоиндукция. Индуктивность	186	ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	
3.4.7. Энергия магнитного поля	187	4.1. Постулаты СТО и его следствия	232
• Примеры заданий ЕГЭ по теме 3.4 «Электромагнитная индукция»	188	4.2. Энергия и импульс свободной частицы	233
3.5. Электромагнитные колебания и волны.	190	4.3. Основные уравнения релятивистской механики. Связь массы и энергии	235
3.5.1. Свободные электромагнитные колебания в колебательном контуре	190	• Примеры заданий ЕГЭ по темам 4.1-4.3 «Основы специальной теории относительности» ...	236
3.5.2. Закон сохранения энергии в колебательном контуре	204	Раздел 5	
3.5.3. Вынужденные электромагнитные колебания. Резонанс	192	КВАНТОВАЯ ФИЗИКА	
3.5.4. Переменный ток	193	5.1. Корпускулярно-волновой дуализм	238
3.5.5. Электромагнитное поле. Электромагнитные волны	200	5.1.1. Гипотеза Планка о квантах	238
3.5.6. Шкала электромагнитных волн.	202	5.1.2. Фотоны. Энергия и импульс фотона	238
• Примеры заданий ЕГЭ по теме 3.5 «Электромагнитные колебания и волны»	208	5.1.3. Фотоэффект	239
		5.1.4. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.	240
		5.1.5. Корпускулярно-волновой дуализм. Волны де Бройля.	240
		• Примеры заданий ЕГЭ по теме 5.1 «Корпускулярно-волновой дуализм»	242

5.2. Физика атома	244	5.3.4. Радиоактивность.	257
5.2.1. Планетарная модель атома	244	5.3.5. Закон радиоактивного распада. Период	
5.2.2. Постулаты Бора	245	полураспада.	258
5.2.3. Оптические спектры	246	5.3.6. Ядерные реакции. Деление и синтез ядер	260
5.2.4. Лазер	249		
• Примеры заданий ЕГЭ по теме 5.2		• Примеры заданий ЕГЭ по теме 5.3	
«Физика атома»	252	«Физика атомного ядра»	266
5.3. Физика атомного ядра	254	Справочный материал	268
5.3.1. Состав ядра. Нуклонная модель		Ответы к примерам заданий ЕГЭ	275
Гейзенберга — Иваненко.	254	Тренировочные тестовые задания	279
5.3.2. Энергия связи нуклонов в ядре.		Вариант 1	280
Ядерные силы	255	Вариант 2	290
5.3.3. Дефект массы.	256	Ответы к тренировочным тестам	299

ФИЗИКА

Теоретический курс с примерами заданий ЕГЭ



Механика



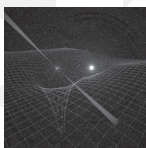
Молекулярная физика.
Термодинамика



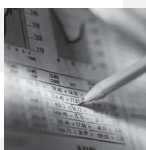
Электродинамика



Основы специальной
теории относительности

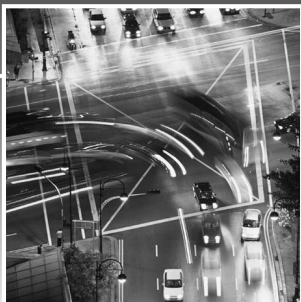


Квантовая физика



Справочный материал





Раздел 1

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).

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 также 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. Механическое движение. Относительность механического движения. Система отсчета

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.

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.

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,

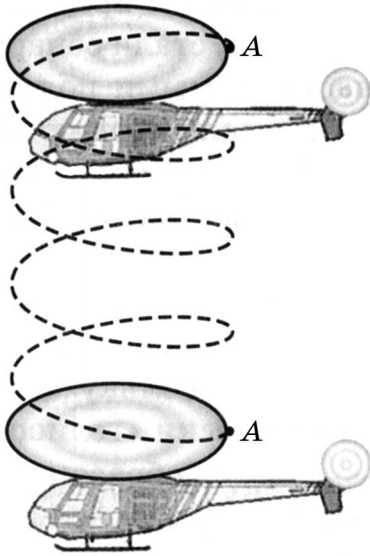


Рис. 1.1

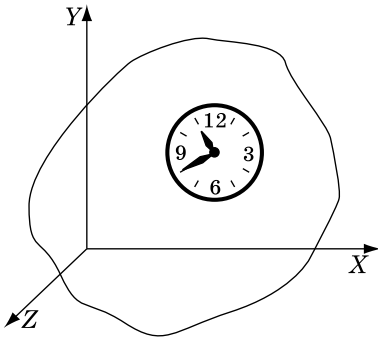


Рис. 1.2

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. 1.1. 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.

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. 1.2).

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.

1.1.2. 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, проходимые 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.

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. 1.3).

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

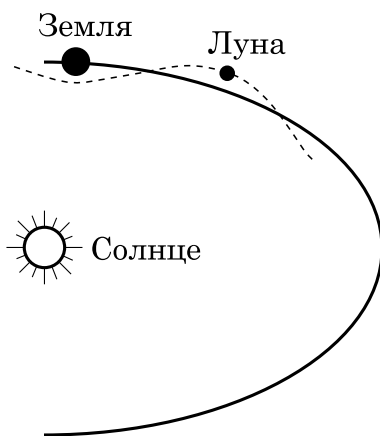


Рис. 1.3

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. 1.4). Для этого из точки A необходимо опустить перпендикуляры на плоскости YZ (координата x), XZ (координата y), XY (координата z)

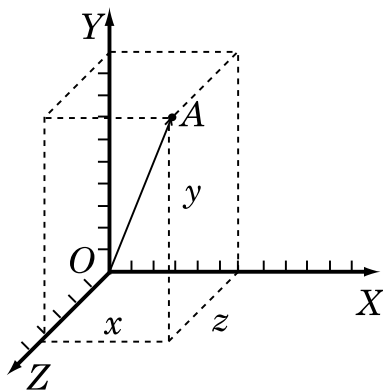


Рис. 1.4

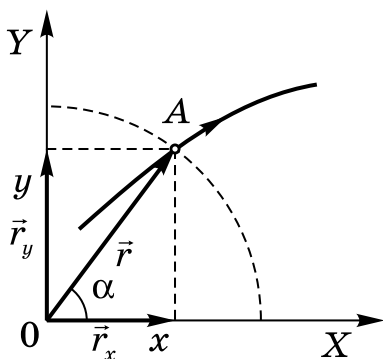


Рис. 1.5

соответственно. Записывается это так: $A(x, y, z)$. Для конкретного случая, изображенного на рис. 1.4 ($x=6, y=10, z=4,5$), 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. 1.5).

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. 1.5). 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. 1.5) 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 .

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. 1.5):

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

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:

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

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*.

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 $\Delta t = t_2 - t_1$:

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

Сложение перемещений (например, на двух соседних участках траектории) $\Delta \vec{r}_1$ и $\Delta \vec{r}_2$ осуществляется по правилу сложения векторов:

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

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. 1.6).

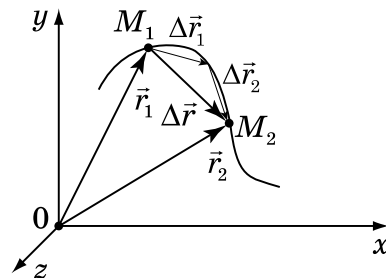


Рис. 1.6

1.1.3. Скорость материальной точки

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 (т. е. производной $\Delta\vec{r}$ по t):

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \vec{r}'_t. \quad (1.3)$$

Составляющие вектора скорости по осям X , Y , Z определяются аналогично:

$$\vec{v}_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = x'; \quad v_y = y'; \quad v_z = z'. \quad (1.4)$$



Рис. 1.7

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. 1.7).

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 :

$$\vec{v}_{\text{ср}} = \frac{\Delta s}{\Delta t}. \quad (1.5)$$

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:

$$\vec{v}_{\text{ср}} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}. \quad (1.6)$$

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. 1.8), 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.

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:

$$\vec{v}_2 = \vec{v}_1 + \vec{v}, \quad (1.7)$$

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:

$$\Delta\vec{r}_2 = \Delta\vec{r}_1 + \Delta\vec{r}. \quad (1.8)$$

Поделив обе части уравнения (1.8) 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 (1.7). В проекциях вектора скорости на оси координат уравнение (1.7) имеет вид:

$$\begin{aligned} v_{2x} &= v_{1x} + v_x, \\ v_{2y} &= v_{1y} + v_y. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Проекции скоростей складываются алгебраически.

Относительная скорость

Из закона сложения скоростей следует, что 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:

$$\vec{v}_{12} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2. \quad (1.10)$$

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

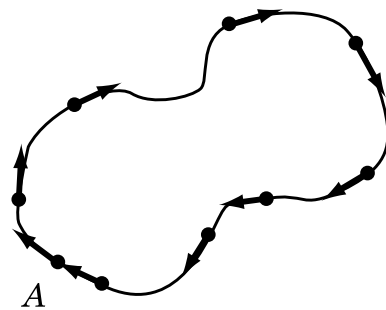


Рис. 1.8

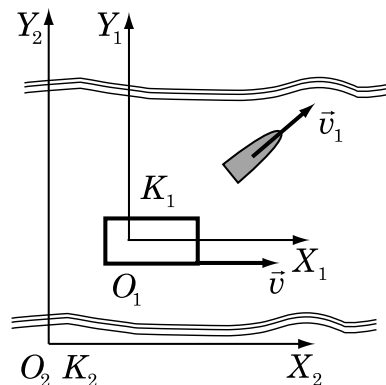


Рис. 1.9

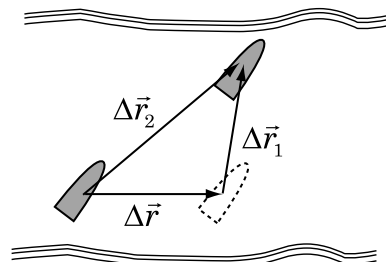


Рис. 1.10

1.1.4. Ускорение материальной точки

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, при стремлении Δt к нулю, (т. е. производной \vec{v} по t):

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{v}'_t. \quad (1.11)$$

Составляющие \vec{a} (a_x, a_y, a_z) равны соответственно:

$$a_x = v'_x; \quad a_y = v'_y; \quad a_z = v'_z. \quad (1.12)$$

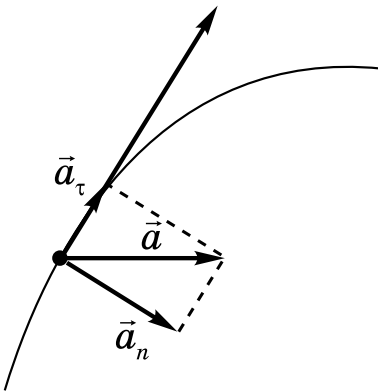


Рис. 1.11

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 к траектории (рис. 1.11).

В соответствии с этим проекцию ускорения a_τ 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:

$$a_\tau = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}. \quad (1.13)$$

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

$$a_n = \frac{v^2}{R}, \quad (1.14)$$

где R — радиус кривизны траектории в соответствующей ее точке. Вывод этой формулы приведен в 1.1.8.

Модуль ускорения определяется по формуле:

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}. \quad (1.15)$$

При прямолинейном движении полное ускорение a равно тангенциальному $a = a_\tau$, 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».

1.1.5. Равномерное прямолинейное 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:

$$s = s_0 + vt, \quad (1.16)$$

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 — 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:

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}. \quad (1.17)$$

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:

$$v = \frac{s}{t}. \quad (1.18)$$

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:

$$x = x_0 + v_x t. \quad (1.19)$$

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

$$x = v_x t. \quad (1.20)$$

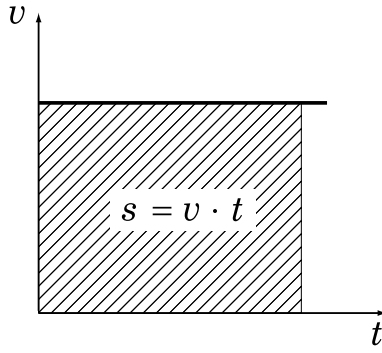


Рис. 1.12

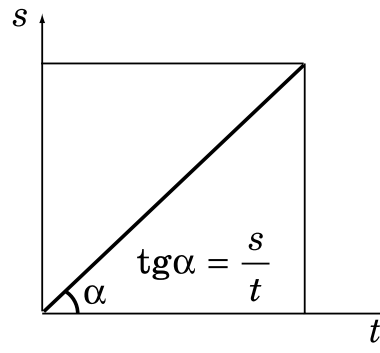


Рис. 1.13

График зависимости скорости от времени — прямая, параллельная оси абсцисс, а пройденный путь — это площадь под этой прямой (рис. 1.12). 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. 1.13).

1.1.6. Равноускоренное прямолинейное движение

Равноускоренным называется движение с постоянным ускорением ($\vec{a} = \text{const}$) при $\vec{a} \uparrow \uparrow \vec{v}$. Когда вектор ускорения направлен против вектора скорости $\vec{a} \uparrow \downarrow \vec{v}$, движение называется равнозамедленным.

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

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}. \quad (1.21)$$

При прямолинейном движении векторы \vec{v} и \vec{v}_0 , а следовательно, и вектор \vec{a} направлены вдоль одной прямой, которая является траекторией движения. Вдоль этой же прямой удобно направить координатную ось X .

Тогда из последнего уравнения следует:

$$a_x = \frac{\Delta v_x}{t} = \frac{v_x - v_{0x}}{t}, \quad (1.22)$$

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

$$a_x = \frac{v_x}{t}. \quad (1.23)$$

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

$$a_x = -\frac{v_{0x}}{t}. \quad (1.24)$$

Из формулы (1.22) находим выражение для скорости при $v_{0x} \neq 0$

$$v_x = v_{0x} + a_x t. \quad (1.25)$$

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.

Путь, пройденный точкой за некоторое время t (в данном случае совпадающий с перемещением $\Delta \vec{x}$ за то же время), легко определяется из рис. 1.14. Он равен площади трапеции, образованной графиком $v(t)$, осями координат и прямой, восстановленной из заданной точки t параллельно оси ординат. Аналитически эта площадь определяется, как известно, интегрированием функции $v(t)$:

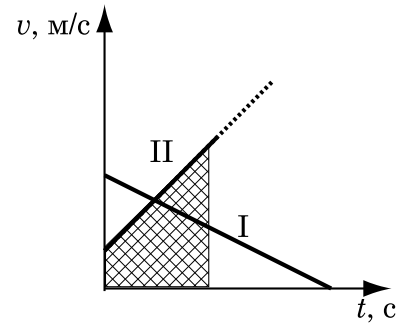


Рис. 1.14

$$\Delta x(t) = x(t) - x_0 = \int_0^t v(t) dt = \int_0^t (v_0 + at) dt = \left(v_0 t + \frac{at^2}{2} \right) \Big|_0^t = v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (1.26)$$

Отсюда получаем закон прямолинейного равноускоренного движения:

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (1.27)$$

Из этого уравнения при известных начальных условиях: координате тела в момент начала движения x_0 , начальной скорости v_{0x} , а также ускорению a_x можно определить координату тела x в любой момент времени t . В векторной форме:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a} t^2}{2}. \quad (1.28)$$

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

Решая систему уравнений (1.26) и (1.27) для двух точек траектории, соответствующих моментам времени t_1 и t_2 , получим выражение, связывающее скорости тела в этих точках и ускорение с перемещением на участке $1 \rightarrow 2$:

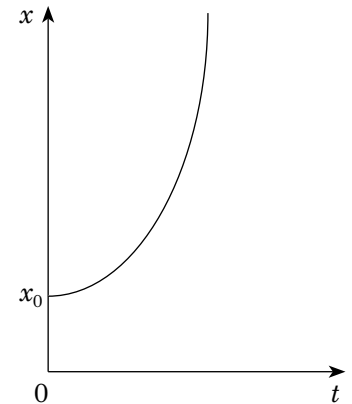


Рис. 1.15

$$v_2^2 - v_1^2 = 2a(x_2 - x_1). \quad (1.29)$$

Эта формула часто бывает полезной при решении различных практических задач.

1.1.7. Свободное падение. Ускорение свободного падения

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)

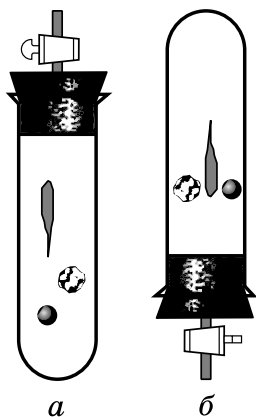


Рис. 1.16

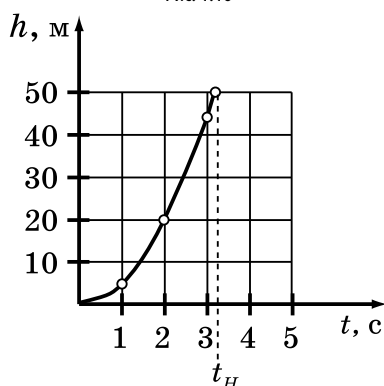


Рис. 1.17

соотношением:

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. 1.16, а). Если теперь из пробирки откачать воздух и перевернуть ее вверх дном, можно увидеть, что все три предмета достигнут дна одновременно (рис. 1.16, 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 (1.27) 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. 1.17):

$$h = \frac{gt^2}{2}. \quad (1.30)$$

График зависимости высоты от времени является параболой. Из формулы (1.29) следует, что скорость связана с высотой

$$v = \sqrt{2gh}. \quad (1.31)$$

Формулы (1.30) и (1.31) справедливы для любого прямолинейного движения с постоянным ускорением и нулевой начальной скоростью, а не только для свободного падения.

Движение тела, брошенного 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. 1.18).

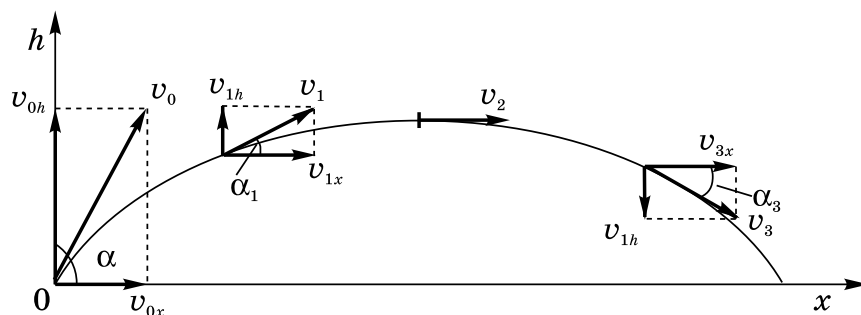


Рис. 1.18

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

$$\begin{aligned} v_x &= v_0 \cos \alpha, \\ v_h &= v_0 \sin \alpha. \end{aligned} \quad (1.32)$$

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 $a = g$: $v_x(t) = v_0 \cos \alpha$, $v_h(t) = v_0 \sin \alpha - gt$.

Изменение координат тела согласно уравнению (1.27) имеет вид:

$$x = v_0 \cos \alpha t, \quad (1.33)$$

$$h = v_0 \sin \alpha t - \frac{gt^2}{2}. \quad (1.34)$$

Для случая, когда точка бросания не совпадает с началом координат ($x_0 \approx 0$, $h_0 \approx 0$), получим:

$$x = x_0 + v_0 \cos \alpha \cdot t; \quad (1.35)$$

$$h = hx_0 + v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{gt^2}{2}. \quad (1.36)$$

В уравнении (1.34) учтено, что ускорение силы тяжести направлено вниз (знак « \rightarrow » перед вторым членом). Последняя пара уравнений позволяет найти уравнение траектории движения точки, которое представляет собой зависимость одной координаты от другой. Для этого из уравнений (1.33) и (1.34) исключим время и после простых преобразований получим:

$$h = x \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} \cdot x^2. \quad (1.37)$$

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. 1.18).

1.1.8. 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*.

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,

$$T = \frac{l_{\text{окр}}}{v} = \frac{2\pi r}{v}. \quad (1.38)$$

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

$$\nu = 1/T. \quad (1.39)$$

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

$$\omega = \frac{\varphi}{\Delta t}. \quad (1.40)$$

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

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

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu. \quad (1.41)$$



Рис. 1.19

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. 1.19).

В силу малости угла φ имеем:

$$\Delta v = v\varphi. \quad (1.42)$$

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:

$$\varphi = \frac{v\Delta t}{R}. \quad (1.43)$$

Из (1.42) и (1.43) получим выражение для модуля вектора ускорения (см. (1.14)):

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v^2}{R}.$$

Из формул (1.38), (1.39) и (1.14) следует, что $a = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$ и $a = 4\pi^2 Rv^2$.

1.1.9. Поступательное и вращательное движение твердого тела

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 направления 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.

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. 1.20). Угол поворота φ отсчитывается между двумя лучами, выходящими из одной точки на оси O_1O_2 и перпендикулярными к ней: один из лучей (OX) неподвижен, другой (OA) жестко связан с телом (рис. 1.21).

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.

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:

$$\varphi = \omega t. \quad (1.44)$$

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

$$\varphi = \varphi_0 + \omega t. \quad (1.45)$$

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

$$v = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi Rv; \quad v = \omega R; \quad a = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R. \quad (1.46)$$

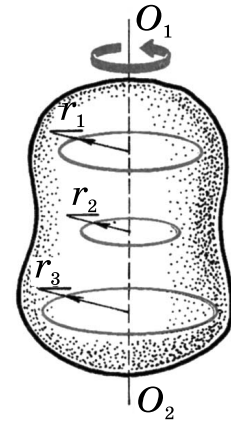


Рис. 1.20

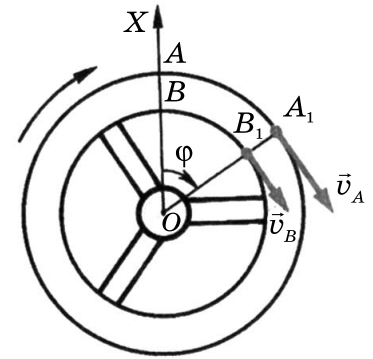
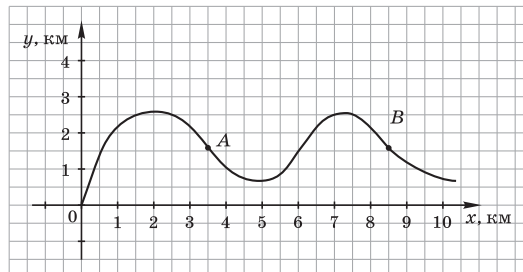


Рис. 1.21

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ 1.1 «КИНЕМАТИКА»

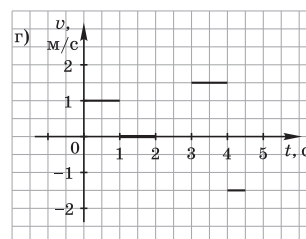
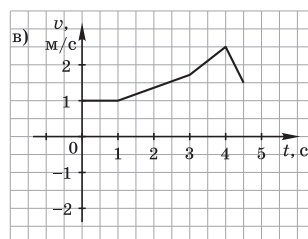
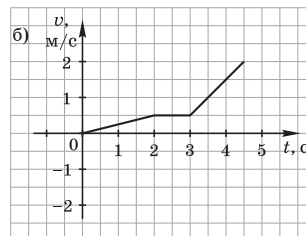
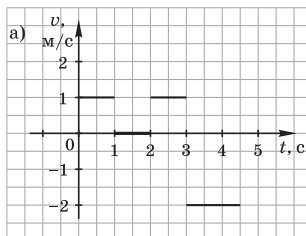
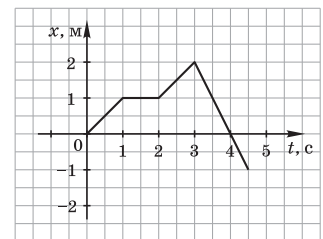
Ответами к заданиям 1–7 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

- 1** На рисунке изображена траектория движения автомобиля. Определите модуль вектора перемещения из точки A в точку B .



Ответ: _____ км.

- 2** На рисунке приведен график движения тела $x(t)$. Под ним приведены четыре графика зависимостей скорости от времени $v(t)$. Какой из этих четырех графиков $v(t)$ (левый верхний, правый верхний, левый нижний, правый нижний) соответствует графику движения тела $x(t)$? Ответ запишите словами.

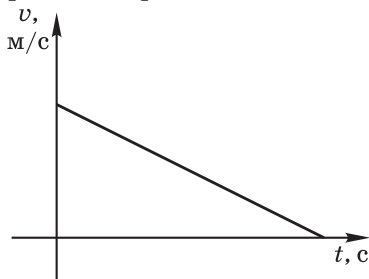


Ответ: _____.

- 3** Тело двигалось из точки A в точку B с переменной скоростью, преодолев первый участок пути в 5 м за время 8 с, второй участок в 3 м — за 10 с, и третий участок длиной 10 м — за 18 с. Определите среднюю путевую скорость движения между точками A и B .

Ответ: _____ м/с.

- 4 Какой из видов движения (**равномерное, равноускоренное, равнозамедленное**) изображен на графике зависимости скорости от времени? Ответ запишите словами.



Ответ: _____.

- 5 Точка совершает равномерное движение вдоль окружности радиуса $R = 5$ м со скоростью 3 м/с. Определите центростремительное ускорение точки.

Ответ: _____ м/с².

- 6 Чему равна угловая скорость минутной стрелки часов?

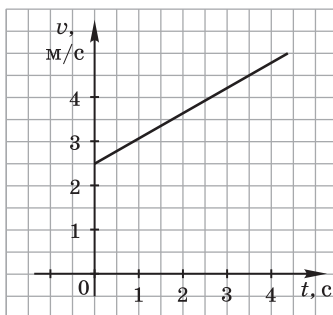
Ответ: _____ рад/с.

- 7 В безветренную погоду капли дождя падают на землю вертикально. Какую кривую описывает след от капель на окне поезда, движущегося с постоянной скоростью для наблюдателя, стоящего на платформе — **прямую линию, гиперболу или параболу**? Ответ запишите словами.

Ответ: _____.

Ответами к заданиям 8, 9 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

- 8 Пользуясь графиком зависимости скорости от времени, определите путь, пройденный телом за первые 3 секунды.



Ответ: _____ м.

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

Ответ: _____ м/с².

1.2. Динамика

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. Инерциальные системы отсчета. Первый закон Ньютона. Принцип относительности Галилея

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 шарик 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

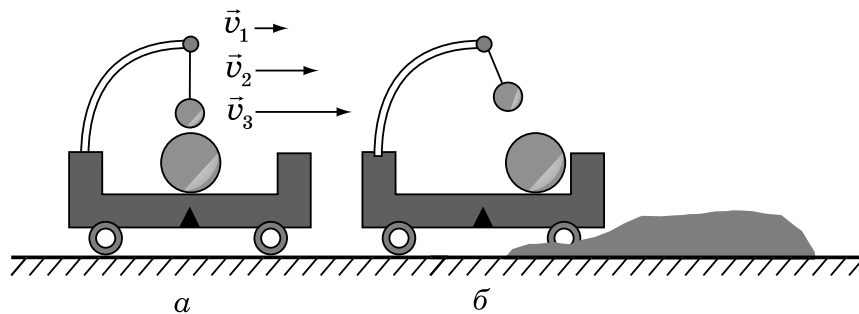


Рис. 1.22

в движение, т. е. изменяют свою скорость относительно тележки, хотя нет никаких сил, которые толкали бы их.

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).

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.

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:

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}t, \quad t = t'. \quad (1.47)$$

Для координаты x , например, это означает:

$$x = x' + v t, \quad t = t', \quad (1.48)$$

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 (1.47), 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. 1.23). 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 : $\vec{OO'} = \Delta\vec{r}_{OO'}$.

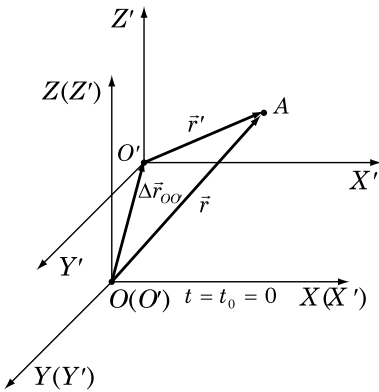


Рис. 1.23

Согласно правилу сложения векторов

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

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

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

что совпадает с (1.47).

Из уравнения (1.47) вытекает закон сложения скоростей:

$$\vec{u} = \vec{u}' + \vec{v}, \quad (1.49)$$

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.

1.2.2. Масса тела. Плотность вещества

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:

$$p = mv, \quad (1.50)$$

$$\Delta p / \Delta t = F, \quad (1.51)$$

$$F = ma. \quad (1.52)$$

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 :

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (1.53)$$

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

Из формул (1.51) и (1.53) 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).

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:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (1.54)$$

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) — $0,59 \text{ кг/м}^3$.

1.2.3. Взаимодействие. Сила. Принцип суперпозиции сил

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: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$) 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.**

По радиусу действия фундаментальные взаимодействия делятся на **далекодействующие** (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.

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}

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».

Сила

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). Прямая, 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:

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

Принцип суперпозиции 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*:

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n. \quad (1.55)$$

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 уравновешивают, 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.

1.2.4. 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:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (1.56)$$

В скалярном виде второй закон можно записать:

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{F_x}{m}, \\ a &= \frac{F}{m}. \end{aligned} \quad (1.57)$$

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.

Из формулы 1.56 следует:

$$\vec{F} = \vec{a}m. \quad (1.58)$$

Формулировка *второго закона механики*, данная самим Ньютоном, такова:

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

В современном виде закон этот записывается следующим образом:

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \vec{F}, \quad (1.59)$$

где $m\vec{v}$ — количество движения тела. Количество движения называют также импульсом тела \vec{p} :

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (1.60)$$

Когда равнодействующая сил, приложенных к телу, постоянна ($\vec{F} = \text{const}$), дифференцирование в (1.59) можно заменить разностью Δ , поскольку изменение скорости (ускорение) постоянно:

$$\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t. \quad (1.61)$$

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.

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

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

1.2.5. 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 A и B , 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 препятствие, 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».

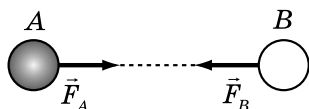


Рис. 1.24

Следует помнить, что силы, о которых говорится в законе Ньютона, никогда не уравновешивают друг друга, поскольку они приложены к разным телам (рис. 1.24). Две равные по модулю и противоположно направленные силы уравновешивают 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.

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. 1.25). 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.

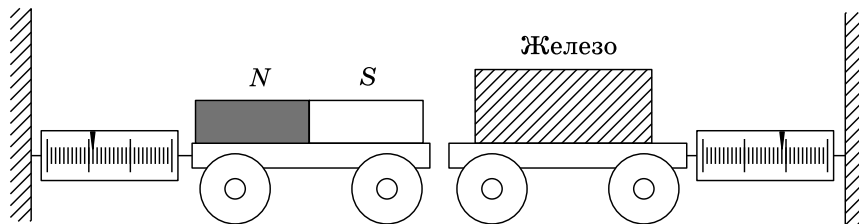


Рис. 1.25

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:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2. \quad (1.62)$$

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

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}. \quad (1.63)$$

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».

1.2.6. 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 (1.53):

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

где G — *гравитационная постоянная*. Значение гравитационной постоянной было определено экспериментально в 1798 г. английским физиком Г. Кавендишем и составляет $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$. *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.

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:

$$F_3 = G \frac{M_3 m}{R_3^2}, \quad (1.64)$$

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 :

$$F_t = mg. \quad (1.65)$$

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

$$g = \frac{GM_3}{R_3^2}. \quad (1.66)$$

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, а значит, и ускорение свободного падения уменьшается при удалении от поверхности Земли. Для тела, находящегося на высоте h над поверхностью Земли выражение для силы тяжести следует писать в виде:

$$F_3 = G \frac{M_3 m}{(R_3 + h)^2}. \quad (1.67)$$

Соответственно, для ускорения свободного падения:

$$g = G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2}. \quad (1.68)$$

Из приведенной формулы следует, что лишь при подъеме на высоту 300 км ускорение свободного падения уменьшается на 1 м/с^2 , т. е. всего на 10 %, а на высотах не только в несколько десятков или сотен метров, но и многих километров сила тяжести может считаться постоянной, не зависящей от положения тела. Именно благодаря этому свободное падение вблизи Земли можно считать *равно-ускоренным движением*.

Вес тела, невесомость, перегрузка

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:

$$P = F_{\text{т}} = mg, \quad (1.69)$$

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):

$$P = N. \quad (1.70)$$

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).

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 $\vec{N} + \vec{F}_{\text{т}} = m\vec{a}$) в проекции на вертикальную ось OZ , направленную вверх, равен:

$$P = N = m(g - a). \quad (1.71)$$

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

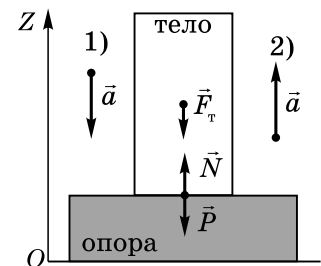


Рис. 1.26

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

$$P = N = m(g + a). \quad (1.72)$$

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

1.2.7. Движение небесных тел

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 $3 \cdot 10^{22}$ 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 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:

$$F_T = mg = GMm/R^2,$$

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

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, определяется выражением (1.14). Поскольку в данном случае a равно g — ускорению свободного падения (т. к. тело движется в поле тяжести Земли), то, подставляя в (1.14) вместо a выражение для g из (1.68), получим:

$$v = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3 + h}}. \quad (1.73)$$

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:

$$v_1 = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3}}. \quad (1.74)$$

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: $v_{II} = \sqrt{2} \cdot v_I = 11,2$ 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.

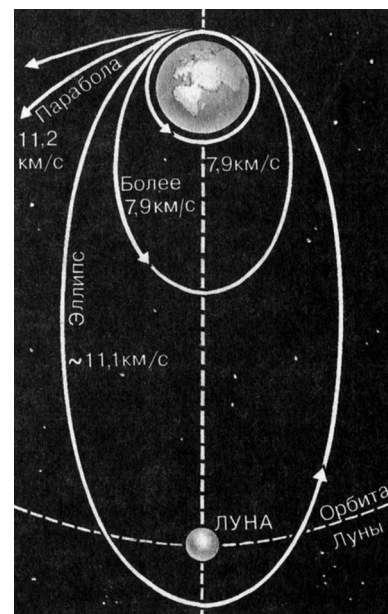


Рис. 1.27

1.2.8. Сила упругости. Закон Гука

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,

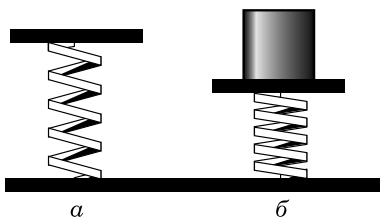


Рис. 1.28

т. е. сила тяжести уравновешена силой, действующей на гирию со стороны сжатой пружины. Это и есть сила упругости.

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.

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:

$$F_{\text{упр}} = -kx, \quad (1.75)$$

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.

1.2.9. 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.

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 :

$$(F_{\text{тр.п}})_{\text{max}} = \mu_{\text{п}} N, \quad (1.76)$$

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:

$$F_{\text{тр}} = \mu N, \quad (1.77)$$

где μ — коэффициент трения скольжения (при небольших скоростях $\mu < \mu_{\text{п}}$), 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:

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

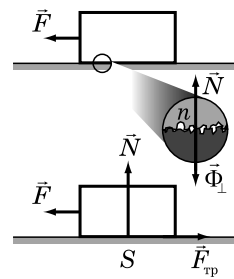


Рис. 1.29

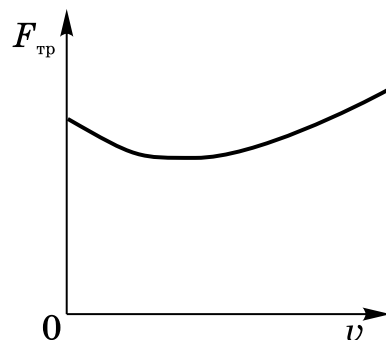


Рис. 1.30

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:*

$$F_{\text{тр. кач}} = \mu_{\text{кач}} N, \quad (1.78)$$

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.

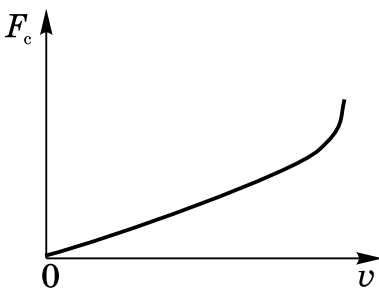


Рис. 1.31

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 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

$$F_c = k_1 v, \quad (1.79)$$

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

При больших скоростях относительного движения сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости:

$$F_c = k_2 v^2, \quad (1.80)$$

где k_2 — коэффициент сопротивления, отличный от k_1 .

1.2.10. Давление

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

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

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

$$p = \frac{F}{S}, \quad (1.81)$$

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

$$p = \frac{mg}{S}, \quad (1.82)$$

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

Наоборот, если давление p и площадь S известны, из формулы (1.81) 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; гири, 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*.

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.

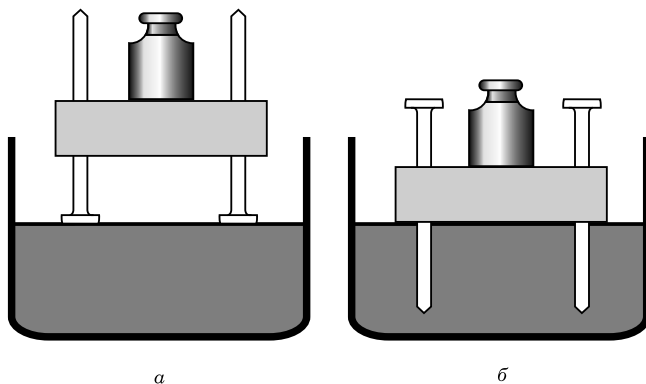


Рис. 1.32

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ 1.2 «ДИНАМИКА»

Ответами к заданиям 1–9 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

- 1** Деревянный брусок лежит неподвижно на наклонной плоскости, не соскальзывая вниз. Какая сила удерживает его от соскальзывания — **сила тяжести, сила трения** или **сила упругости**? Ответ запишите словами.

Ответ: _____ .

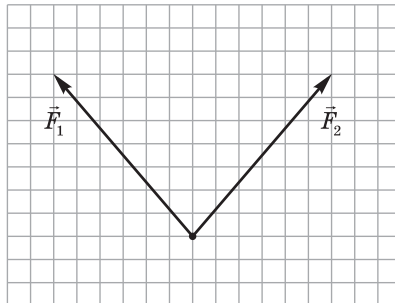
- 2** На тело, покоящееся в инерциальной системе отсчета, кратковременно действовали силой, придав ему некоторую скорость. Как будет меняться скорость тела и пройденный им путь со временем относительно той же системы отсчета, если в дальнейшем на него не будут действовать никакие силы? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

1) увеличится 2) уменьшится 3) не изменится

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Скорость тела	Пройденный путь

- 3** К материальной точке, изображенной на рисунке, приложены две силы. В каком направлении будет двигаться точка под действием этих сил — **вправо, влево, вверх, вниз**? Ответ запишите словом.



Ответ: _____ .

- 4** Тело массой 80 кг лежит на подставке. Определите силу давления (в СИ) тела на подставку.

Ответ: _____ Н.

- 5** Тело, движущееся в поле тяжести Земли, находится в состоянии невесомости. Выберите два верных утверждения, касающиеся ускорения a и веса тела P в этом состоянии.

1) $a < g$ 2) $P = 0$ 3) $a = g$ 4) $P = mg$

Ответ: ☐ ☐

- 6** Пружину растянули на 5 см. Жесткость пружины равна 0,1 Н/м. Определите силу упругости пружины, вызванную этим растяжением.

Ответ: _____ мН.

7

Сила давления F_1 , приложенная к площади S_1 , оказывает на нее давление P_1 . Сила давления F_2 , приложенная к площади S_2 , оказывает на нее давление P_2 . Чему равно отношение S_1/S_2 , если $F_1/F_2 = 4$, а $P_2/P_1 = 8$?

Ответ: _____ .

8

Установите соответствие между названием закона, принципа и его математическим выражением. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ЗАКОН, ПРИНЦИП

ЕГО МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ / ФОРМУЛА

А) закон всемирного тяготения

Б) принцип относительности Галилея

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

$$2) p = mv$$

$$3) F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

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

Ответ:

А	Б

9

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

Ответ: _____ .

Ответами к заданиям 10–12 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

10

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

Ответ: _____ м/с².

11

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

Ответ: _____ км.

12

Тело выпустили из рук на высоте 10 м от Земли. Какова скорость тела в момент соприкосновения с Землей? (Сопротивлением воздуха можно пренебречь.)

Ответ: _____ м/с.

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:

$$M = Fl, \quad (1.83)$$

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 к 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.

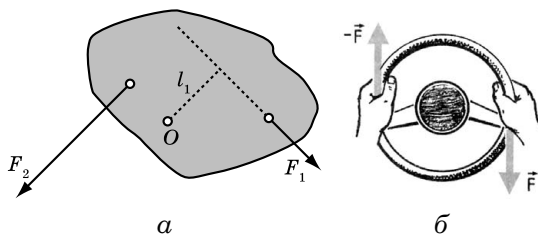


Рис.1.33

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:

$$M_1 = -M_2 \text{ или } F_1 l_1 = -F_2 l_2. \quad (1.84)$$

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:

$$M = Fl_1 + Fl_2 = F(l_1 + l_2) = Fl. \quad (1.85)$$

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:

$$\overline{F}_i + \overline{F}'_i = 0, \quad (1.86)$$

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

Уравнение (1.86) означает, что для равновесия тела необходимо и достаточно, чтобы геометрическая сумма всех сил, действующих на любой элемент этого тела, была равна нулю.

Из (1.86) легко получить первое условие равновесия тела (системы тел). Для этого достаточно просуммировать уравнение (1.86) по всем элементам тела:

$$\sum \overline{F}_i + \sum \overline{F}'_i = 0. \quad (1.87)$$

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,

$$\sum \overline{F}_i = 0. \quad (1.88)$$

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:

$$\sum \overline{F}_i = 0; \quad \sum M_k = 0. \quad (1.89)$$

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 сделать 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 прикладываемой 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.

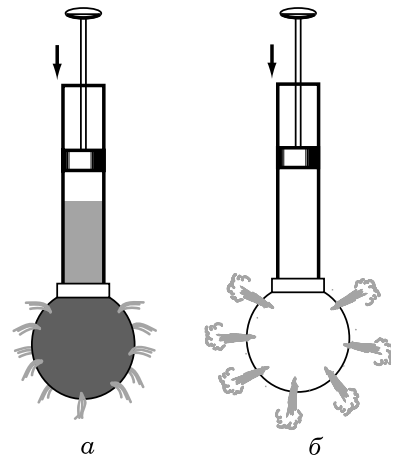


Рис. 1.34

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 :

$$F = pS; \quad (1.90)$$

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

$$F = mg. \quad (1.91)$$

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

$$m = \rho V, \quad (1.92)$$

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

$$V = Sh. \quad (1.93)$$

Подставляя в формулу (1.91) значение массы из (1.92) и объема из (1.93), получим:

$$F = \rho Vg = \rho Shg. \quad (1.94)$$

Приравнявая выражения (1.90) и (1.94) для силы давления, получим:

$$pS = \rho Shg.$$

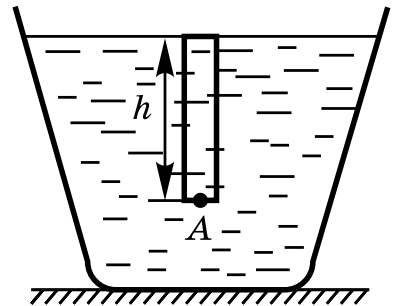


Рис. 1.35

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

$$p = \rho hg. \quad (1.95)$$

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.

С учетом атмосферного давления p_0 , формула для давления покоящейся в ИСО жидкости на глубине h запишется следующим образом:

$$p = p_0 + \rho gh. \quad (1.96)$$

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).

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

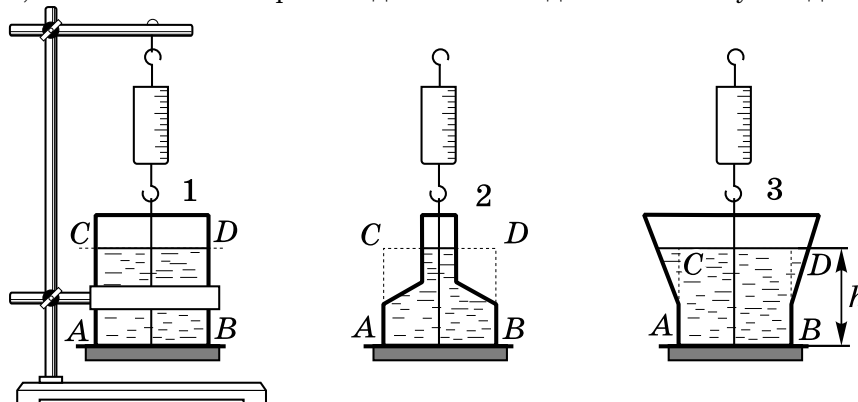


Рис. 1.36

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).

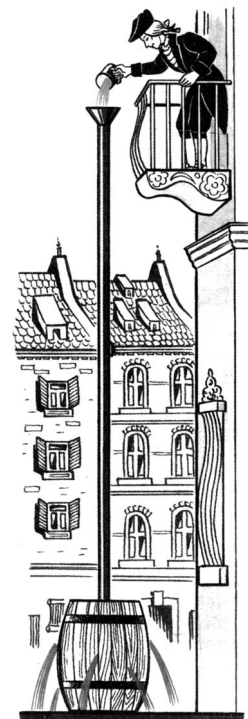


Рис. 1.37

1.3.5. Закон Архимеда

Закон Архимеда — закон статики 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 .

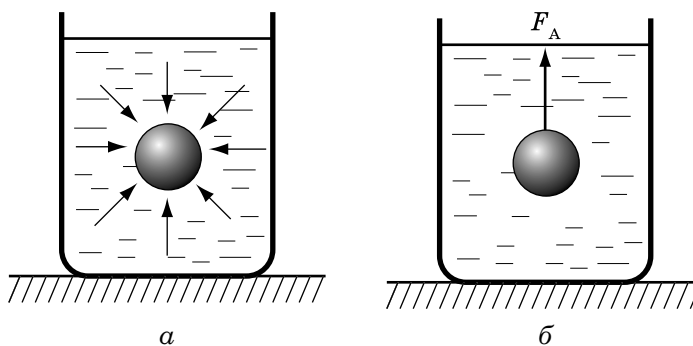


Рис.1.38

Архимедова (выталкивающая) сила действует на тело не только в воде, но и в любой другой жидкости, т. е. 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

$$F_A = P_0 - P_{\text{жидк}}. \quad (1.97)$$

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 (выталкивающей) силой.

Другими словами, учитывая формулу (1.97), можно сказать:

Выталкивающая 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):

$$F_A = m_{\text{ж}}g. \quad (1.98)$$

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 (1.98) можно записать в виде:

$$F_A = \rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}} g, \quad (1.99)$$

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).

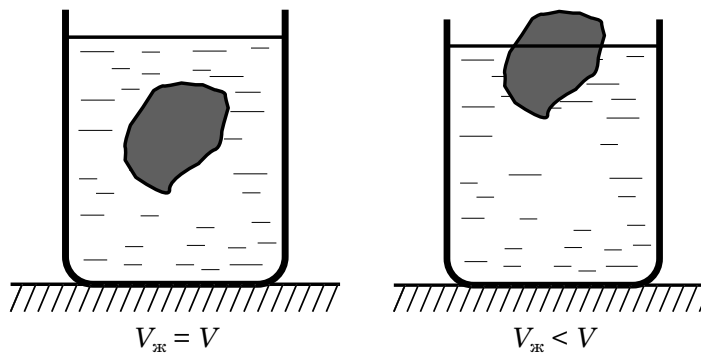


Рис.1.39

Формула (1.98) 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.

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_T , 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 ($F_A < F_T$), то тело опустится на дно, т. е. утонет (рис. 1.40, а);
- 2) если архимедова сила больше силы тяжести ($F_A > F_T$), то тело всплывет (рис. 1.40, б);
- 3) если архимедова сила равна силе тяжести ($F_A = F_T$), то тело останется в покое.

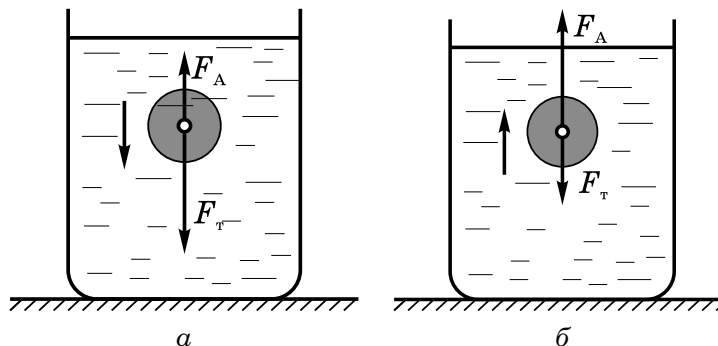


Рис.1.40

Последнее условие является условием равновесия тела в жидкости:

$$F_A = F_T. \quad (1.100)$$

Равенство (1.100) 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

$$F_A = \rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}} g, \quad (1.101)$$

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 :

$$F_T = mg = \rho V g, \quad (1.102)$$

где m — масса тела. Подставим выражения (1.101) и (1.102) в равенство (1.100):

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

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

$$\rho V = \rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}}. \quad (1.103)$$

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.

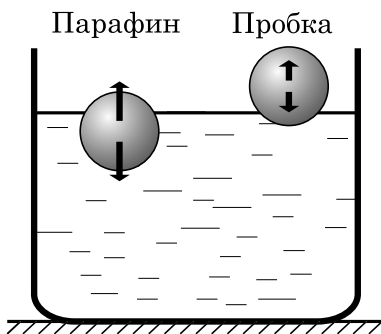


Рис. 1.41

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:

$$F_A = \rho_{\text{возд}} Vg, \quad (1.104)$$

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, нужно знать его подъемную силу. Подъемная сила воздушного шара равна разности между архимедовой силой и действующей на шар силой тяжести:

$$F = F_A - F_T. \quad (1.105)$$

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).

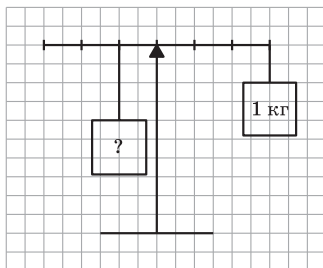
Гораздо проще осуществить подъем и спуск шара, наполненного горячим воздухом. Для этого под отверстием, находящимся в нижней части шара, располагают горелку. Она позволяет регулировать температуру воздуха, а значит, и его плотность и подъемную силу.

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»

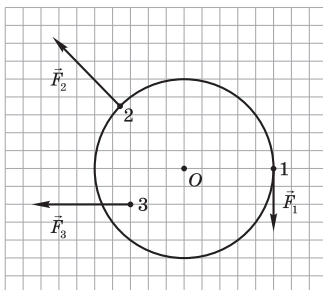
Ответами к заданиям 1–7 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

- 1** Какова масса груза, который уравновесит рычаг, изображенный на рисунке?



Ответ: _____ кг.

- 2** К разным точкам диска, изображенного на рисунке, способного свободно вращаться вокруг неподвижной оси, приложены силы, величина и направление которых изображены стрелками. Как поведет себя диск под действием этих сил: будет вращаться **по часовой стрелке**, **против часовой стрелки**, **останется неподвижным**? Ответ запишите словами.

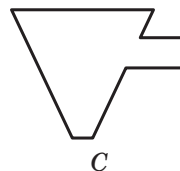


Ответ: _____ .

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

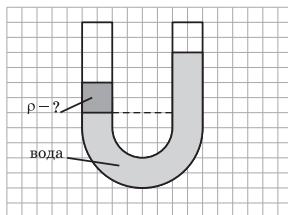
Ответ: _____ Н.

- 4** На рисунке изображены три сосуда разной формы, но одинаковой высоты. Как различается давление жидкости на дно сосудов: **равно**, **различно**? Ответ запишите словом.



Ответ: _____ .

- 5 Определите плотность неизвестной жидкости в сообщающихся сосудах, изображенных на рисунке.



Ответ: _____ г/см³.

- 6 Тело плавает в жидкости. Выберите два правильных утверждения, касающихся этой ситуации.

- 1) Масса тела m больше массы вытесненной им жидкости $m_{\text{ж}}$.
- 2) Плотность тела $\rho_{\text{т}}$ больше плотности жидкости $\rho_{\text{ж}}$ / $\rho_{\text{т}} > \rho_{\text{ж}}$.
- 3) $\rho_{\text{т}} \leq \rho_{\text{ж}}$.
- 4) Сила Архимеда $F_{\text{А}} < mg$.
- 5) Между объемом тела V , объемом вытесненной телом жидкости $V_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{т}}$ и $\rho_{\text{ж}}$ справедливо соотношение: $\rho_{\text{т}} V = \rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}}$.

Ответ: ☐ ☐

- 7 Как меняется атмосферное давление с увеличением высоты местности: **повышается, понижается, не меняется?** Ответ запишите словом.

Ответ: _____ .

Ответами к заданиям 8–12 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

- 8 Рассчитайте величину гидростатического давления в атм. на дне озера Байкал на глубине ~ 1600 м, считая воду чистой.

Ответ: _____ атм.

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

Ответ: _____ Н.

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

Ответ: _____ Н.

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

Ответ: _____ Н.

- 12 Подъемная сила аэростата $F_{\text{А}} = 1000$ Н, объем шара $V = 100$ м³. Вес самой оболочки 50 Н. Какова плотность газа, наполняющего воздушный шар?

Ответ: _____ кг/м³.

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 (\vec{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 (1.60):

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

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.

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 (1.58), получим:

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

Раскрыв скобки и воспользовавшись выражением (1.60) 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 (1.61):

$$\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t.$$

Как было показано в разделе «Динамика», выражение (1.61) представляет собой математическую запись второго закона Ньютона.

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

Выражение (1.61) 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.

1.4.2. Импульс системы тел. Закон изменения импульса

Импульсом (количеством движения) механической системы называется вектор, равный сумме импульсов всех материальных точек этой системы:

$$\vec{p}_{\text{сист.}} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots \quad (1.106)$$

Законы изменения и сохранения импульса являются 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 (1.61). Сложив левые и правые части этих уравнений, получим:

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

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

$$\Delta\vec{p}_1 + \Delta\vec{p}_2 = (\vec{F}_1 + \vec{F}_2)\Delta t. \quad (1.107)$$

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 (1.107) можно записать:

$$\Delta\vec{p}_{\text{сист.}} = \vec{F}\Delta t, \quad (1.108)$$

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**. В этом суть закона изменения импульса механической системы.

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

1.4.3. Закон сохранения импульса

Из уравнения (1.108) вытекает закон сохранения импульса. Если на систему не действуют никакие внешние силы, то правая часть уравнения (1.108) обращается в ноль, что означает неизменность суммарного импульса системы:

$$\vec{p}_{\text{сист.}} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = \text{const.} \quad (1.109)$$

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

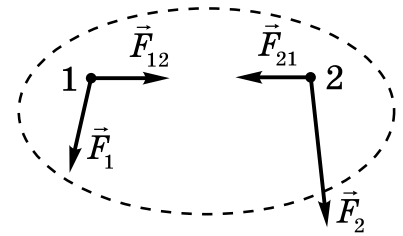


Рис. 1.42

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 $m_{газ} \cdot v_{газ}$ выброшенных газов:

$$m_p v_p = m_{газ} \cdot v_{газ}.$$

Отсюда следует, что скорость ракеты

$$v_p = (m_{газ} / m_p) \cdot v_{газ}. \quad (1.110)$$

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 (1.110) 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:

$$A = F |\Delta \vec{r}| \cos \alpha, \quad (1.111)$$

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.

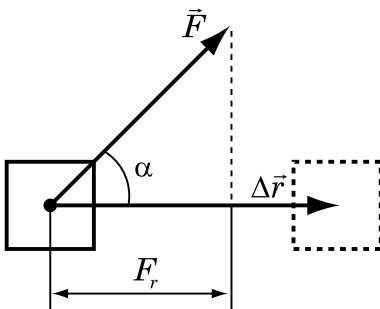


Рис. 1.43

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.

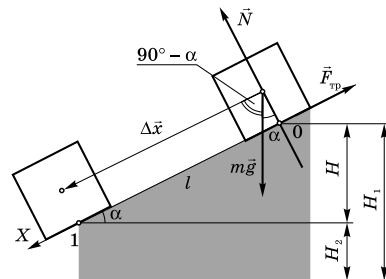


Рис. 1.44

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 :

$$\Delta x = \frac{H}{\sin \alpha}. \quad (1.112)$$

Учитывая, что сила тяжести $F_t = mg$ составляет угол $(90^\circ - \alpha)$ с направлением перемещения, используя формулу (1.112), получим выражение для работы силы тяжести A_g :

$$A_g = mg \cdot \cos(90^\circ - \alpha) \cdot \frac{H}{\sin \alpha} = mgH. \quad (1.113)$$

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).**

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

$$A_{\text{тр}} = \mu mg H \operatorname{ctg} \alpha. \quad (1.114)$$

Работа силы упругости

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:

$$F_{\text{упр.ср}} = \frac{kx_0 + kx}{2} = \frac{k}{2}(x_0 + x). \quad (1.115)$$

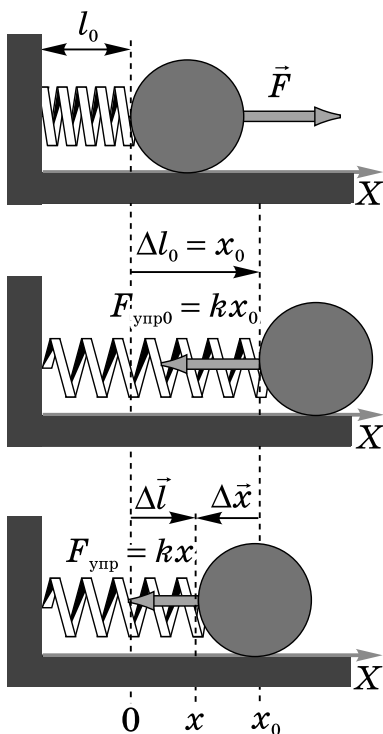


Рис. 1.45

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

$$A_{\text{упр}} = \frac{k}{2}(x_0 + x)(x_0 - x) = \frac{kx_0^2}{2} - \frac{kx^2}{2}. \quad (1.116)$$

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. Мощность силы

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:

$$N = \frac{A}{\Delta t}, \quad (1.117)$$

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

Подставив в формулу (1.117) вместо работы A ее выражение $A = F|\Delta\vec{r}|\cos\alpha$, получим:

$$N = \frac{F|\Delta\vec{r}|\cos\alpha}{\Delta t} = Fv\cos\alpha. \quad (1.118)$$

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.

1.4.6. Кинетическая энергия. Закон изменения кинетической 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.

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

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

$$A = \vec{F} \cdot \Delta x, \quad (1.119)$$

где $\Delta x = \Delta r$.

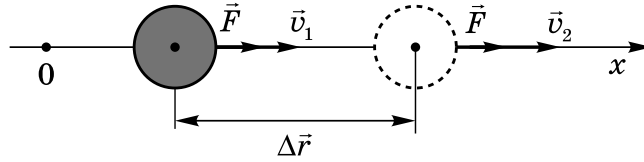


Рис. 1.46

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

$$\Delta x = v_1 t + \frac{at^2}{2}, \quad (1.120)$$

где v_1 — начальная скорость.

Подставив в уравнение (1.119) выражение для Δx из (1.120) и воспользовавшись вторым законом Ньютона $F = ma$, получим:

$$A = ma \left(v_1 t + \frac{at^2}{2} \right) = \frac{mat}{2} (2v_1 + at). \quad (1.121)$$

Выразив ускорение через начальную v_1 и конечную v_2 скорости $a = \frac{v_2 - v_1}{t}$ и подставив в (1.121), 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*:

$$E_K = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}. \quad (1.122)$$

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

Из (1.122) следует, что работа силы по перемещению тела из одного положения в другое равна изменению кинетической энергии:

$$A = E_{K_2} - E_{K_1} = \Delta E_K. \quad (1.123)$$

Равенство (1.123) 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.

1.4.7. 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:

$$E_p = mgh. \quad (1.124)$$

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

$$E_p = \frac{1}{2}k\Delta l^2. \quad (1.125)$$

Работа консервативных сил (тяжести и упругости) с учетом (1.124) и (1.125) выражается следующим образом:

$$A = E_{p_1} - E_{p_2} = -(E_{p_2} - E_{p_1}) = -\Delta E_p. \quad (1.126)$$

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 (1.126) 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. (1.126)), 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.

1.4.8. Закон изменения и сохранения механической энергии

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

$$E = E_k + E_p. \quad (1.127)$$

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*:

$$(E_K + E_p) - (E_{K_1} + E_{p_1}) = A_{np}. \quad (1.128)$$

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):

$$E_K + E_p = E_{K_1} + E_{p_1}. \quad (1.129)$$

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.

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

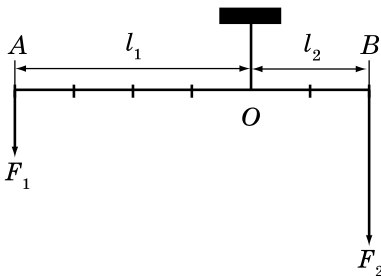


Рис. 1.47

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:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{l_1}{l_2}. \quad (1.130)$$

Из формулы (1.130), 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.

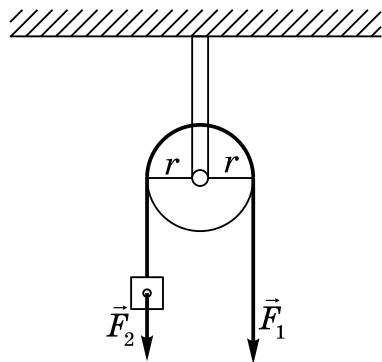


Рис. 1.48

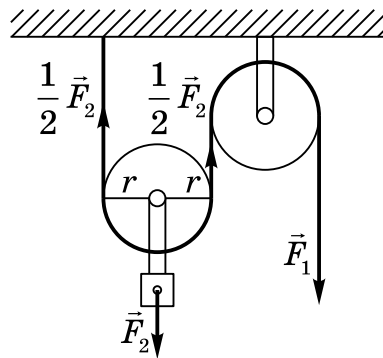


Рис. 1.49

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:

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

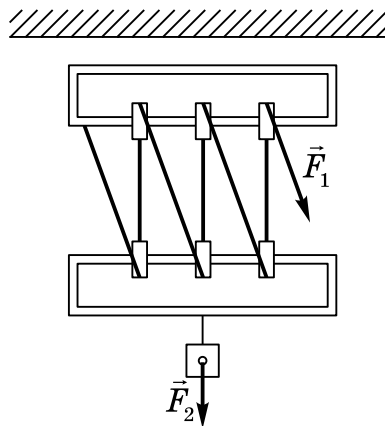


Рис. 1.50

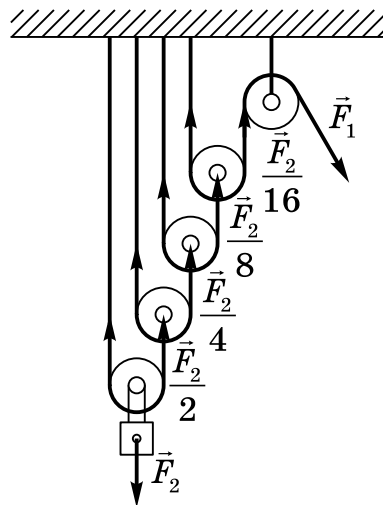


Рис. 1.51

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 .

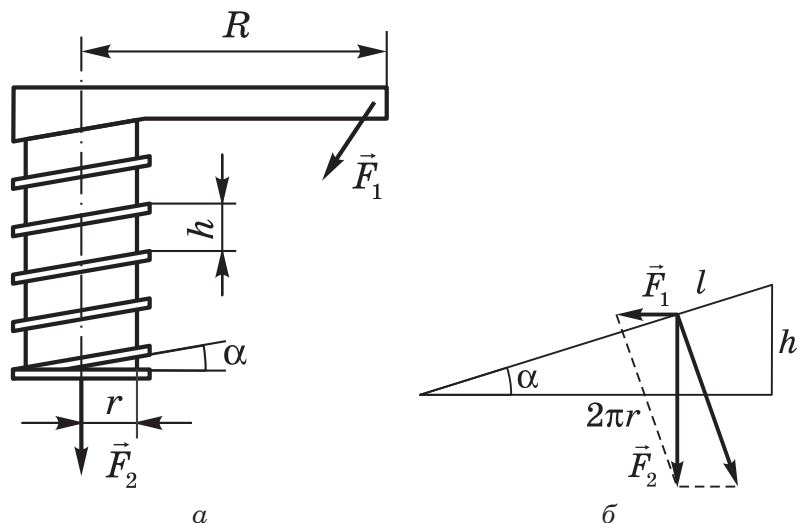


Рис. 1.52

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 $< 100\%$).

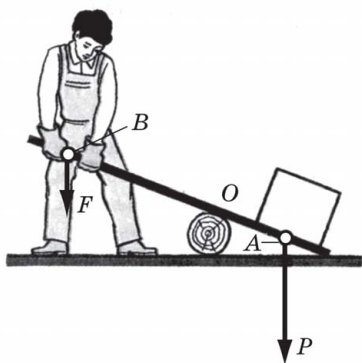


Рис. 1.53

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: $F_1 s_1 \approx F_2 s_2$.

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.

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 с массами 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

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2; \quad (1.131)$$

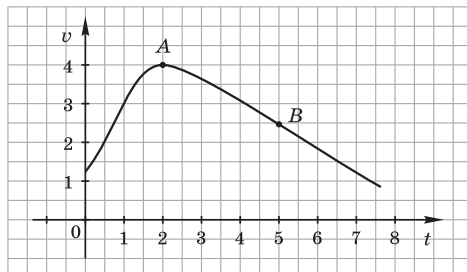
$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 (v'_1)^2}{2} + \frac{m_2 (v'_2)^2}{2}, \quad (1.132)$$

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»

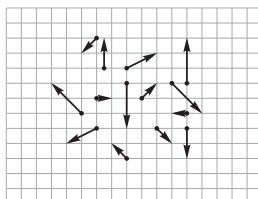
Ответами к заданиям 1–11 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

- 1 По графику зависимости скорости тела от времени, изображенному на рисунке, определите отношение количеств движения тела в точках A и B .



Ответ: _____ .

- 2 На рисунке стрелками изображены величина и направление импульсов частиц, составляющих изолированную систему. Определите суммарный импульс системы.



Ответ: _____ Н·с.

- 3 Теннисный мячик отскакивает от стены. Количество движения мячика до соударения со стенкой составляло 10 Н·с. Чему равно количество движения, которое мячик передает стенке в момент удара?

Ответ: _____ Н.

- 4 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?

Ответ: _____ м/с.

- 5 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 пренебречь): в первом случае, во втором случае, одинакова? Ответ запишите словами.

Ответ: _____ .

- 6 Тело массой 5 кг подняли на высоту 10 м. Чему равна совершенная работа?

Ответ: _____ Дж.

7

В результате удара хоккеиста клюшкой по шайбе ее скорость удвоилась. Как изменились кинетическая энергия и количество движения шайбы? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличилась в два раза 3) не изменилась
2) уменьшилась в 4 раза 4) увеличилась в 4 раза

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Кинетическая энергия	Количество движений шайбы

8

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.

Ответ: _____ м/с.

9

Тело приводят в движение кратковременным ($t = 0,2$ с) толчком с силой 10 Н. Какое количество движения приобрело тело?

Ответ: _____ Н·с.

10

Тело массой 70 кг переместили по горизонтальной плоскости на расстояние 5 км. Какова работа сил трения, если коэффициент трения скольжения равен 0,1?

Ответ: _____ кДж.

11

К телу приложена некоторая сила $\vec{F} \neq 0$, однако работа этой силы равна нулю. Исходя из определения понятия работы, выберите два соотношения между перемещением $\Delta \vec{r}$ и силой \vec{F} , каждое из которых правильно объясняет эту ситуацию.

- 1) $\Delta \vec{r} \parallel \vec{F}$ 2) $\Delta \vec{r} \updownarrow \vec{F}$ 3) $\Delta \vec{r} \perp \vec{F}$ 4) $\Delta \vec{r} = 0$

Ответ: ☐ ☐

Запишите полное решение задачи.

12

Два шарика массой 50 г и 100 г двигались навстречу друг другу по одной прямой со скоростями 0,5 м/с и 1 м/с соответственно. Определите скорости шаров после упругого удара.

Ответ: _____ .

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.

Одним из видов колебаний, особо выделяемых в физике, являются *механические колебания*.

Рассмотрим колебательное движение на примере двух маятников — нитяного и пружинного.

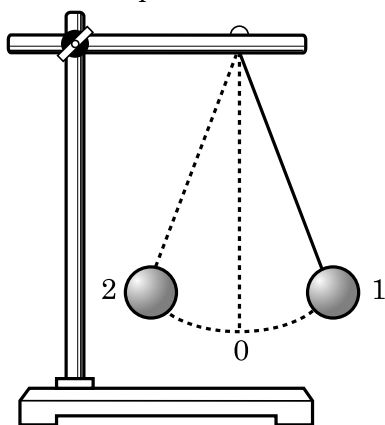


Рис. 1.54

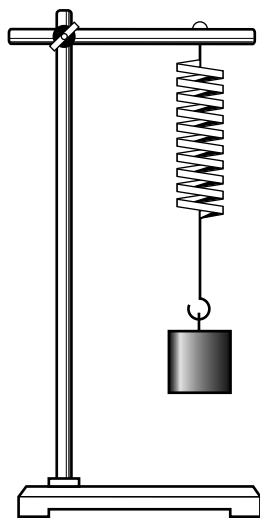


Рис. 1.55

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* .

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).

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 — секун-

дах, 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*.

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:

$$T = 1/\nu, \nu = 1/T. \quad (1.133)$$

В теории колебаний пользуются также понятием *циклической*, или *круговой частоты* ω . Она связана с обычной частотой ν и периодом колебаний T соотношениями:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu. \quad (1.134)$$

Циклическая частота это число колебаний, совершаемых за 2π секунд.

1.5.1. Гармонические колебания

Гармонические колебания — это колебания, при которых физическая величина меняется во времени по синусоидальному закону:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.135)$$

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).

Преобразования 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 растет, а вместе с ней растет 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:

$$W = W_p + W_k = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv_x^2}{2} = \frac{kx_m^2}{2} = \frac{mv_m^2}{2}, \quad (1.136)$$

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.

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* (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.

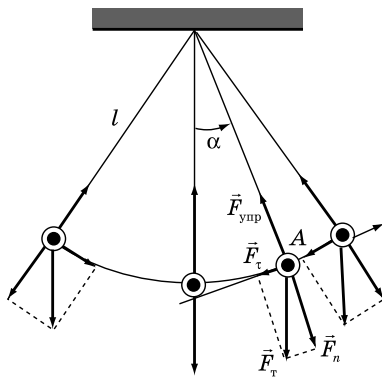


Рис. 1.56

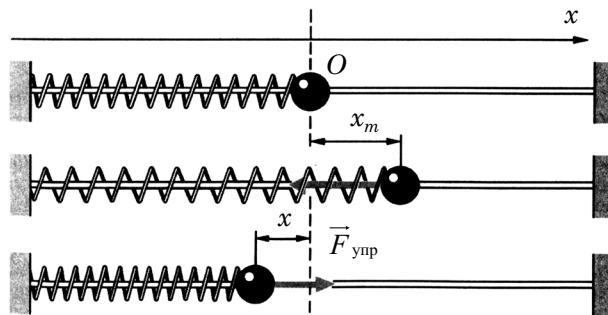


Рис. 1.57

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:

$$x'' = -\frac{k}{m}x. \quad (1.137)$$

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 $F_t = mg$ на нормальную F_n (направленную вдоль нити) и тангенциальную F_τ (касательную к траектории движения шарика — окружности) составляющие. Нормальная составляющая силы тяжести F_n и сила упругости нити $F_{упр}$ в сумме сообщают маятнику центростремительное ускорение, не влияющее на величину скорости, а лишь меняющее ее направление, а тангенциальная составляющая F_τ 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 $ma_\tau = F_\tau$ и учитывая, что $F_\tau = -mg \sin \alpha$, получим:

$$a_\tau = -g \sin \alpha.$$

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 $a_\tau = s''$, окончательно получим:

$$s'' = -\frac{g}{l}s. \quad (1.138)$$

Вид уравнения (1.138) аналогичен уравнению (1.137). 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 (1.137) и (1.138) является функция вида:

$$x = x_m \cos \omega_0 t \text{ (или } x = x_m \sin \omega_0 t \text{)}. \quad (1.139)$$

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).

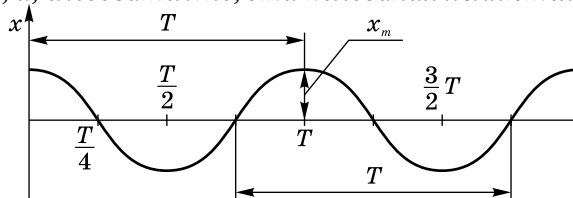


Рис. 1.58

В уравнении (1.139) 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:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (1.140)$$

Собственная частота тем больше, чем больше жесткость пружины или меньше масса груза, что вполне подтверждается опытом.

Для математического маятника выполняются равенства:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}; \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (1.141)$$

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 (1.139), получим выражение для скорости:

$$x' = v = -x_m \cdot \omega_0 \cdot \sin \omega_0 t = v_m \cos \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (1.142)$$

где v_m — амплитуда скорости.

Аналогично выражение для ускорения a получим, дифференцируя (1.142):

$$a = x'' = v' = -x_m \omega_0^2 \cos \omega_0 t = a_m \cdot \cos(\omega_0 t + \pi), \quad (1.143)$$

где a_m — амплитуда ускорения. Таким образом, из полученных уравнений следует, что амплитуда скорости гармонических колебаний пропорциональна частоте, а амплитуда ускорения — квадрату частоты колебания:

$$v_m = \omega_0 x_m; \quad a_m = \omega_0^2 x_m. \quad (1.144)$$

Фаза колебаний

Фаза колебаний — это аргумент периодически изменяющейся функции, описывающей колебательный или волновой процесс.

Для гармонических колебаний

$$X(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (1.145)$$

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 (1.145), 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

$$\varphi - \varphi_0 = \omega t = 2\pi t/T. \quad (1.146)$$

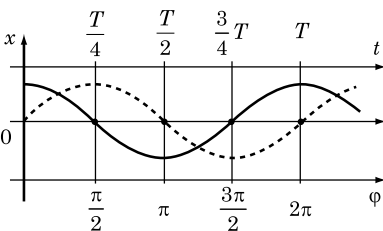


Рис. 1.59

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:

$$x = x_m \cos \omega_0 t. \quad (1.147)$$

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:

$$x = x_m \sin \omega_0 t. \quad (1.148)$$

Как известно, $\cos \varphi = \sin(\varphi + \pi/2)$, поэтому колебания, описываемые уравнениями (1.147) и (1.148), 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 (1.148)) сдвинута относительно сплошной на $\pi/2$.

Сравнивая уравнения свободных колебаний, координаты, скорости и ускорения материальной точки, полученные в предыдущем параграфе (1.140–1.142), находим, что колебания скорости опережают по фазе на $\pi/2$, а колебания ускорения — на π колебания смещения (координаты).

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).

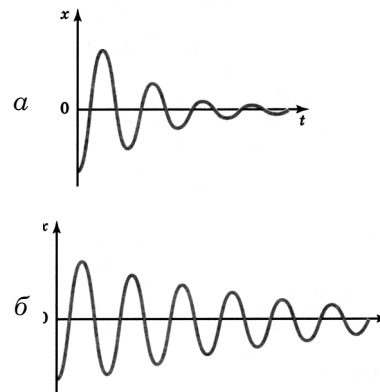


Рис. 1.60

1.5.3. Вынужденные колебания. Резонанс

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 возрастать 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.

Явление резонанса заключается в том, что амплитуда установившихся вынужденных колебаний достигает наибольшего значения, когда частота вынуждающей силы равна собственной частоте колебательной системы.

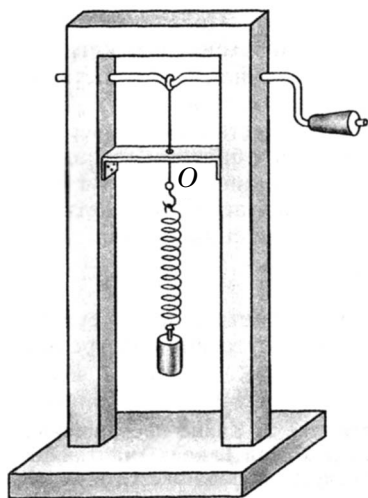


Рис. 1.61

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.

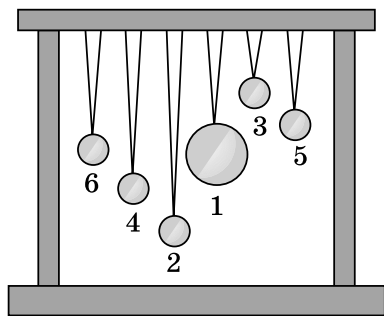


Рис. 1.62

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.

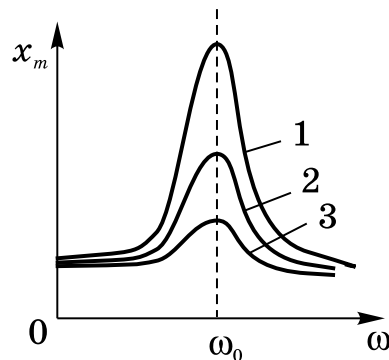


Рис. 1.63

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.

1.5.4. 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.

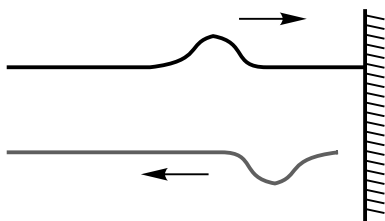


Рис. 1.64

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 челове-

ка, 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.

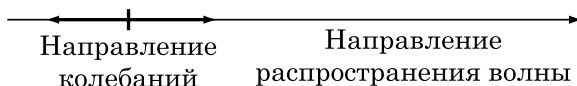


Рис. 1.65

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 сближаются, возникает сила упругости, под действием которой эти витки начинают расходиться. Продолжая

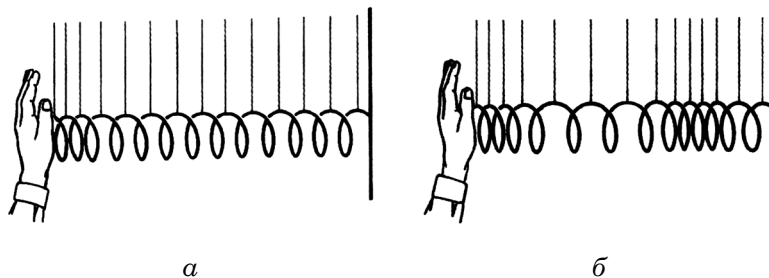


Рис. 1.66

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).

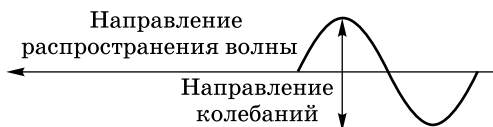


Рис. 1.67

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.

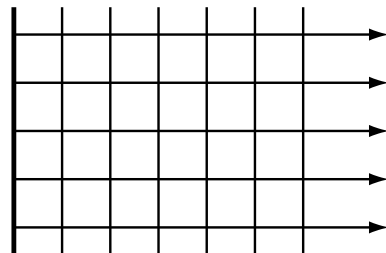


Рис. 1.68

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:

$$s = s_m \sin [\omega(t - x/v) + \varphi_0], \quad (1.149)$$

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.

Сферическая волна

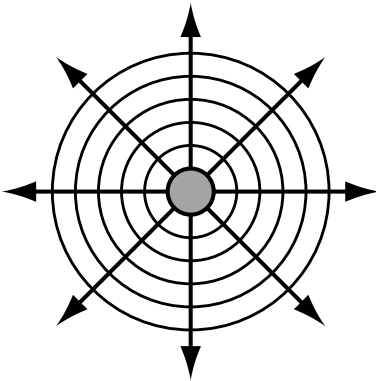


Рис. 1.69

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:

$$s = \frac{a_0}{r} \sin \left[\omega \left(t - \frac{r}{v} \right) + \varphi_0 \right]. \quad (1.150)$$

В отличие от плоской волны, где $s_m = A$ — амплитуда волны постоянная величина, в сферической волне она убывает с расстоянием от центра волны.

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:

$$\lambda = vT, \quad (1.151)$$

где v — скорость волны, T — период колебаний в волне, λ (греческая буква лямбда) — длина волны.

Формула (1.151) 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:

$$\lambda = vT = v \frac{1}{\nu}, \quad (1.152)$$

откуда

$$v = \lambda \nu. \quad (1.153)$$

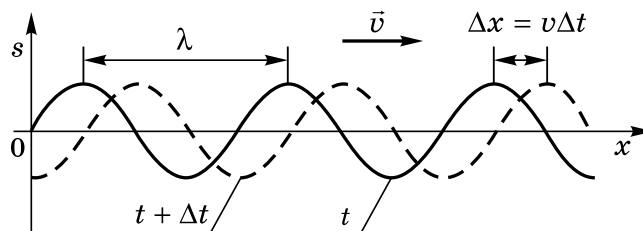


Рис. 1.70

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.

Интерференция и дифракция 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 алгебраическую 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. 1.71), будет:

$$\Delta d = k\lambda, \quad (1.154)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$, а λ — длина волны.

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.

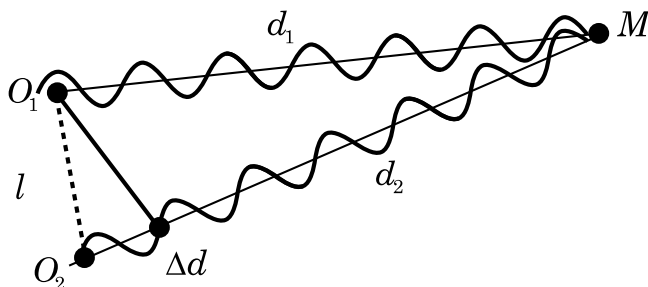


Рис. 1.71

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. 1.72).

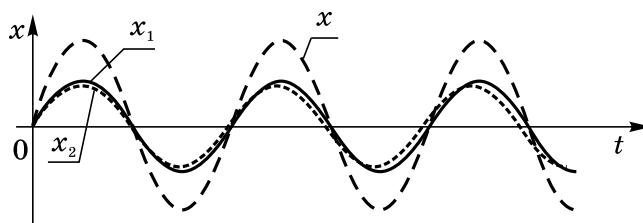


Рис. 1.72

Условием минимума является:

$$\Delta d = (2k + 1)\lambda/2. \quad (1.155)$$

Амплитуда колебаний среды в данной точке минимальна, если разность хода двух волн, возбуждающих колебания в этой точке, равна нечетному числу полуволн 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. 1.73).

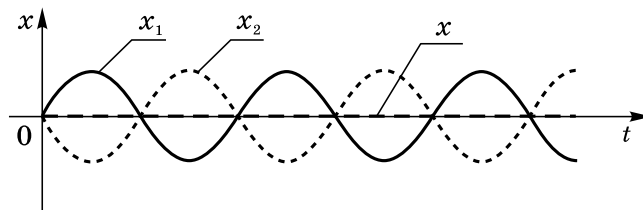


Рис. 1.73

Распределение энергии при интерференции

Вследствие интерференции происходит перераспределение энергии в пространстве. Она концентрируется в максимумах за счет того, что в минимумы не поступает совсем.

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. 1.74). 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. 1.75).

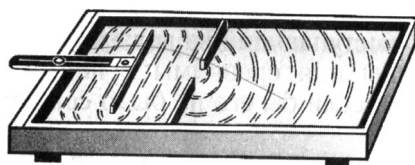


Рис. 1.74

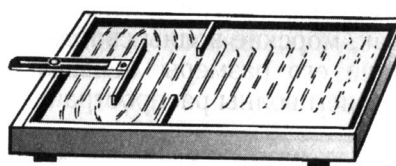


Рис. 1.75

1.5.5. 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. 1.76). Самые высокочастотные упругие волны в диапазоне 10^9 – 10^{13} Гц относятся к гиперзвуку.

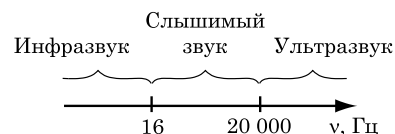


Рис. 1.76

«Услышать» звуковые волны можно, заставив дрожать зажатую в тисках длинную стальную линейку. Однако если над тисками будет выступать большая часть линейки (рис. 1.77, 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.

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.

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

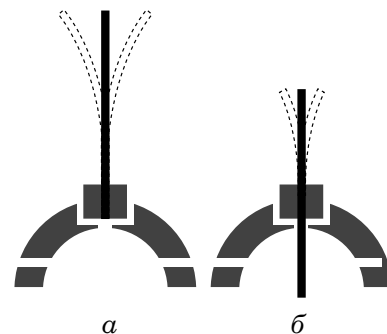


Рис. 1.77

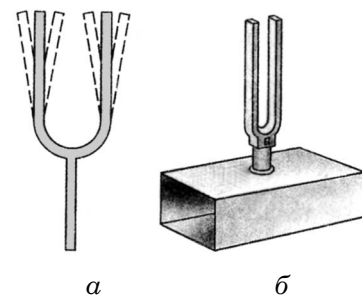


Рис. 1.78

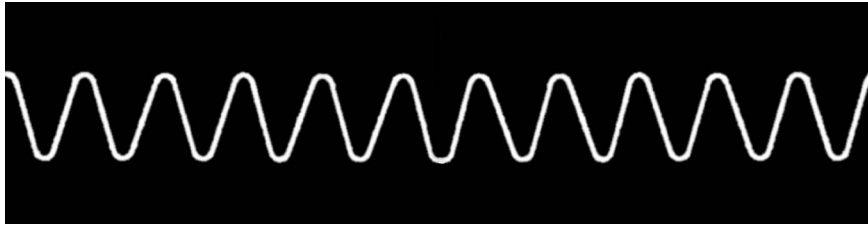


Рис. 1.79

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. 1.79).

Для усиления звука, издаваемого камертоном, его держатель укрепляют на деревянном ящике, открытом с одной стороны (см. рис. 1.78, 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 вынужденные 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.

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. Колладоном 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:

$$v = \lambda \nu, \quad v = \lambda / T.$$

Инфразвук

Звуковые волны с частотой, меньшей 16 Гц, называются инфразвуком.

Инфразвуковые волны человеческое ухо не воспринимает (рис. 1.76). 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.

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 дробинку, 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 выработалась 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 электромеханических 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. Используя 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.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ 1.5 «МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ»

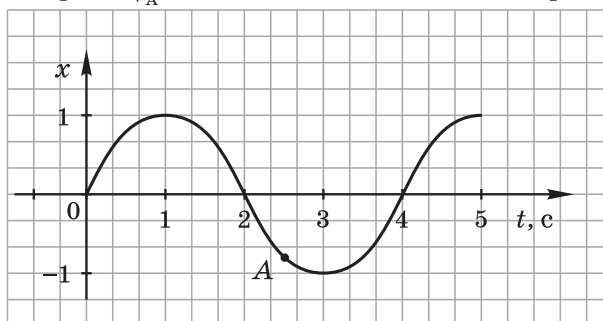
Ответами к заданиям 1–8 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

- 1 Амплитуда, частота и начальная фаза колебаний математического маятника равны 5 м, 10 с^{-1} и 0 соответственно. Выберите два верных утверждения на основании данных, приведенных в условии задачи.

- 1) Уравнение колебания этого маятника имеет вид: $x = 5 \sin 20\pi$.
- 2) Круговая частота колебаний $\omega = 30$.
- 3) Эти колебания — гармонические.
- 4) Эти колебания — не гармонические.
- 5) Уравнение колебания этого маятника имеет вид: $x = 2 \sin 10$.

Ответ:

- 2 Внимательно рассмотрите рисунок и выберите два верных утверждения, следующих из рисунка, о величинах фазы φ_A колебания в точке A и его периода T .



- | | | | |
|-------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1) $\varphi_A = 0,8\pi$ | 3) $\varphi_A = \pi$ | 5) $\varphi_A = 0,8\pi$ | 7) $\varphi_A = 1,25\pi$ |
| 2) $T = 4 \text{ с}$ | 4) $T = 2 \text{ с}$ | 6) $T = 2 \text{ с}$ | |

Ответ:

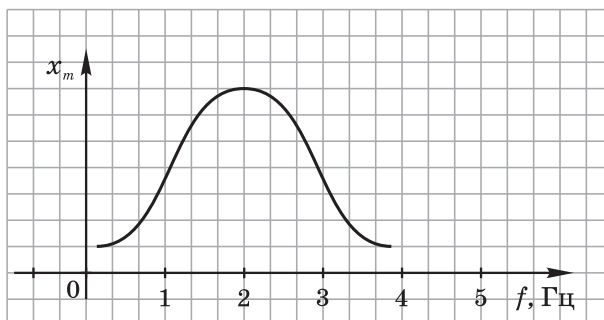
- 3 Длину нити математического маятника увеличили. Как нужно изменить массу груза, чтобы уменьшить частоту колебаний маятника: **увеличить, уменьшить, невозможно выполнить задачу**? Ответ запишите словом (словами).

Ответ: _____.

- 4 Массу груза пружинного маятника увеличили вдвое. Как надо изменить жесткость пружины, чтобы собственная частота его колебаний не изменилась: **уменьшить вдвое, увеличить вдвое, оставить неизменной**? Ответ запишите словами.

Ответ: _____.

- 5 На рисунке представлена резонансная кривая вынужденных колебаний некоторой системы. Какова собственная частота колебаний этой системы?



Ответ: _____ Гц.

- 6 Длина звуковой волны $\lambda = 0,7 \text{ м}$, ее скорость $v = 350 \text{ м/с}$. Определите период звуковых колебаний T .

Ответ: _____ мс.

- 7 Установите соответствие между описанием характеристик и параметров колебательного процесса и их названием. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА

- А) максимальное отклонение колеблющейся величины от положения равновесия
Б) колебания, описываемые функцией синуса или косинуса

НАЗВАНИЕ ПАРАМЕТРА, ПРОЦЕССА

- 1) смещение
2) гармонические колебания
3) амплитуда
4) частота
5) фаза
6) период

Ответ:

А	Б

- 8 В упругой среде распространяются две когерентные волны с $\lambda = 5 \text{ м}$. Разность расстояний от источников этих волн до некоторой точки составляет 1 м . Будет ли в этой точке наблюдаться максимум интерференции этих волн: да, нет? Ответ запишите словом.

Ответ: _____ .

Ответами к заданиям 9–10 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

- 9 Определите смещение точки, совершающей гармонические колебания с частотой 10 Гц , амплитудой 1 см в момент времени $t = 100 \text{ с}$ от начала колебания.

Ответ: _____ см.

- 10 Какова длина звуковой волны, создаваемой человеческим голосом с частотой колебаний 200 Гц в воде?

Ответ: _____ м.



Раздел 2

Молекулярная физика. Термодинамика

2.1. Молекулярная физика

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 — Не 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 ^{12}C :

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

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:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0\text{C}}} \left(M_r = \frac{m_0}{1 \text{ а.е.м.}} \right),$$

где M_r — относительная молекулярная (атомная) масса; m_0 — масса молекулы (атома), выраженная в единицах СИ (кг); $m_{0\text{C}}$ — масса молекулы изотопа углерода ^{12}C , выраженная в тех же единицах, что и m_0 .

$$\frac{1}{12} m_{0\text{C}} = 1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

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: $M_r(\text{H}_2\text{O}) = 2 \cdot 1 + 16 = 18$; $M_r(\text{CO}_2) = 12 + 2 \cdot 16 = 44$.

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 выражение для числа молекул в теле с массой m и молярной массой M .

$$N = N_A \cdot \nu = N_A \cdot \frac{m}{M}.$$

2.1.1. Модели строения газов, жидкостей и твердых тел

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. время 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 (одиночный 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.

2.1.2. Тепловое движение атомов и молекул вещества

В соответствии с молекулярно-кинетической теорией, молекулы и атомы, из которых состоит вещество, совершают безостановочное хаотическое движение.

Хаотическое, или беспорядочное, движение молекул называют *тепловым движением*. При таком движении атомы и молекулы постоянно и беспорядочно меняют скорость и направление своего движения, интенсивность которого зависит от температуры тела.

Если нехаотическое, скажем, механическое движение можно описывать с помощью формул (например, скорость равномерно ускоренной точки можно найти с помощью формулы $v = v_0 + at$), то при хаотическом движении нельзя предугадать величину скорости и направление движения отдельной молекулы в любой момент времени. Поэтому в молекулярной физике и термодинамике оперируют средней скоростью молекул, которая зависит от температуры тела.

Атомы и молекулы, находясь в постоянном движении, обладают определенной кинетической энергией. Эта энергия связана с так называемой *тепловой энергией*, запасенной в теле. Кроме того, атомы и молекулы постоянно взаимодействуют между собой, то есть обладают также и потенциальной энергией, которую называют *энергией межмолекулярного взаимодействия*.

Тепловое движение частиц вещества обуславливает такие явления, как теплопередача, броуновское движение, диффузия, которые послужили обоснованием молекулярно-кинетической теории вещества.

2.1.3. 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.

Так, между ядрами атомов одной молекулы и электронами другой существуют силы притяжения, а между электронами соседних молекул, как и между их ядрами — силы отталкивания. Зависимость сил F_r и потенциальной энергии U межмолекулярного взаимодействия от расстояния r изображена на рис. 2.1. Сила взаимодействия складывается из сил притяжения и сил отталкивания. Силы притяжения в физике принято считать отрицательными, силы отталкивания — положительными.

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.

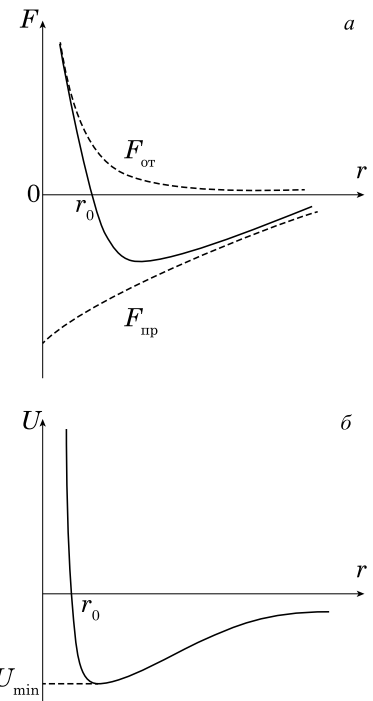


Рис. 2.1

Энергия взаимодействия в этой точке (r_0 на рисунке 2.11) становится минимальной — U_{\min} . На таком расстоянии система (в данном случае молекула) находится в устойчивом состоянии, поскольку обладает наименьшим значением потенциальной энергии, или, как говорят, находится «в потенциальной яме».

Дальнейшее уменьшение расстояния приводит к перекрыванию электронных оболочек, что вызывает быстрое нарастание сил отталкивания.

2.1.4. Броуновское движение. Диффузия

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 (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. 2.2).

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

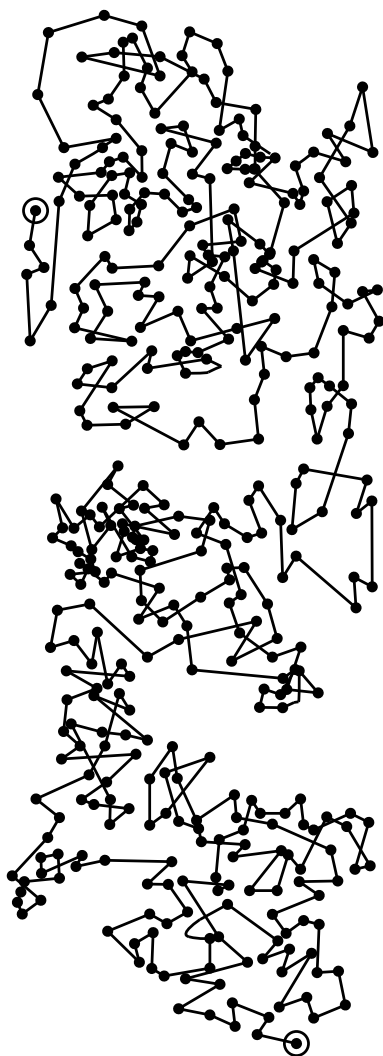


Рис. 2.2

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.

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.

2.1.5. 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. Герапатом. 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 слабовзаимодействующих 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.

2.1.6. 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*.

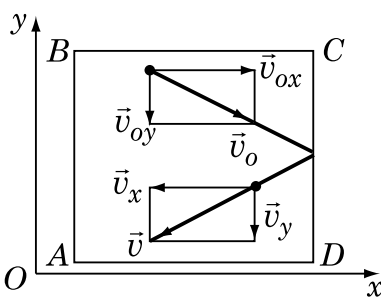


Рис. 2.3

Определим давление газа на стенку площадью S сосуда $ABCD$ (рис. 2.3).

Каждая молекула массой m_0 , отскакивая от стенки после упругого соударения со стенкой, передает ей импульс $2m_0v_x$, где v_x — проекция скорости 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 дви-

жется 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 дей-

ствительности, поскольку речь идет о большом количестве молекул, движущихся с разными скоростями, силу следует усреднить: $\overline{F} = \overline{m_0 n v_x^2 S}$.

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 $\overline{F} = \frac{1}{3}nm_0\overline{v^2}S$.

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

молекул $\overline{E_K} = \frac{m_0\overline{v^2}}{2}$:

$$p = \frac{2}{3}n\overline{E_K}. \quad (2.7)$$

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 большого 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).

2.1.7. Абсолютная температура

Согласно основному уравнению МКТ, давление p прямо пропорционально средней кинетической энергии \overline{E} поступательного движения молекул:

$$p = \frac{2}{3}n\overline{E}, \quad (2.8)$$

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 (измерялось давление).

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*.

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:

$$T(\text{К}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273,15 \text{ К}. \quad (2.12)$$

Абсолютный нуль равен $-273,15^{\circ}\text{C}$. Как правило, при расчетах пользуются округленным значением абсолютного нуля (-273°C).

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:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT. \quad (2.13)$$

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.

2.1.9. Уравнение $p = nkT$

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:

$$p = nkT, \quad (2.14)$$

где k — постоянная Больцмана.

Из формулы (2.14) 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 также быть выражена через абсолютную температуру, если в формуле (2.13) заменить \bar{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*:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}. \quad (2.15)$$

2.1.10. 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:

$$pV = BT, \quad (2.16)$$

где B 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

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (2.17)$$

Уравнение состояния в форме (2.17) называется *уравнением Менделеева — Клапейрона*. Оно объединяет газовые законы Гей-Люссака, Бойля — Мариотта, Авогадро, Шарля.

Уравнение состояния (2.17) может быть получено из зависимости давления от температуры $p = nkT$ (2.14), если в нее подставить концентрацию молекул n из выражения

$$n = \frac{N}{V} = \frac{1}{V} \cdot \frac{m}{M} N_A, \quad (2.18)$$

где N_A — постоянная Авогадро, N — число молекул в теле.

В результате получим:

$$pV = \frac{m}{M} k N_A T, \quad (2.19)$$

где $kN_A = R$ — универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/моль · К; k — постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Заменяя в (2.19) kN_A на R , получаем уравнение состояния в виде (2.17). Отношение уравнений (2.17) или (2.16) при двух наборах параметров p_1, V_1, T_1 и p_2, V_2, T_2 дает:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{const}. \quad (2.20)$$

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 умно-

жить 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 Менделеева — Клапейрона, то выражение для внутренней энергии идеального газа можно представить в виде:

$$U = \frac{3}{2} pV. \quad (2.22)$$

Следует отметить, что, согласно выражению для средней кинетической энергии одного атома $\left(\bar{\epsilon} = \frac{3}{2} kT\right)$ 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 — шесть. 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:

$$U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} RT = \frac{i}{2} pV, \quad (2.23)$$

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).

2.1.11. Закон Дальтона

Закон Дальтона для смеси идеальных газов гласит: *давление смеси газов равно сумме парциальных давлений ее компонент*.

Парциальным давлением какого-либо газа — компонента газовой смеси называется давление, которое оказывал бы этот газ, если бы он один занимал весь объем, занимаемый смесью.

Для доказательства закона Дальтона перепишем уравнение (2.14) в виде:

$$pV = NkT. \quad (2.24)$$

Рассмотрим сосуд объемом V , в котором имеется смесь нереагирующих химически газов, находящихся в состоянии теплового равновесия. Уравнение состояния для такой смеси имеет вид:

$$pV = (N_1 + N_2 + N_3 + \dots)kT, \quad (2.25)$$

где N_1, N_2, N_3, \dots — числа компонент смеси.

Очевидно, что

$$N_1, N_2, N_3 + \dots = N, \quad (2.26)$$

где N — общее число молекул в сосуде.

Давление смеси газа получим, поделив обе части (2.25) на объем V :

$$p = \frac{N_1}{V} kT + \frac{N_2}{V} kT + \frac{N_3}{V} kT + \dots$$

Слагаемые этой суммы представляют собой давления каждой из компонент смеси, занимающей объем V , т. е. являются парциальными давлениями компонент смеси p_1, p_2, p_3, \dots что и утверждает закон Дальтона:

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots \quad (2.27)$$

То, что каждая группа молекул оказывает давление, не зависящее от давления, оказываемого другими группами, обусловлено отсутствием взаимодействия между молекулами. Последнее реально выполняется только для газов при невысоких давлениях, которые приближаются к идеальному газу.

2.1.12. 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.

$$pV = \text{const при } T = \text{const.} \quad (2.28)$$

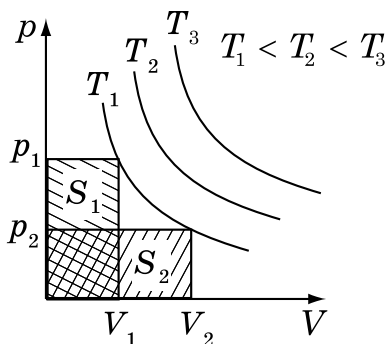


Рис. 2.4

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 °С 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 равносторонние гиперболы (площади $S_1 = S_2$). Чем выше температура, тем выше лежит соответствующая ей изотерма (рис. 2.4).

Закон Шарля

Давление p данной массы газа при постоянном объеме пропорционально температуре.

$$p = \text{const } T \text{ при } V = \text{const.} \quad (2.29)$$

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*:

$$\frac{p}{T} = \text{const при } V = \text{const.} \quad (2.30)$$

Согласно (2.30), давление газа линейно зависит от температуры при постоянном объеме. Эта зависимость изображается прямой, которая называется *изохорой* (рис. 2.5). С ростом объема газа при постоянной температуре давление его, согласно закону Бойля — Мариотта, падает. Поэтому изохора, соответствующая большему объему, лежит ниже изохоры, соответствующей меньшему объему.

В соответствии с (2.30), все изохоры начинаются в точке $T=0$ (давление идеального газа при абсолютном нуле равно нулю).

Изохорный процесс используется в газовых термометрах постоянного объема.

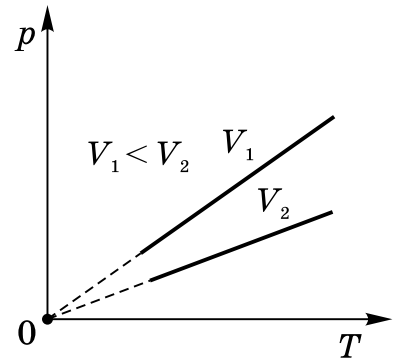


Рис. 2.5

Закон Гей-Люссака

При постоянном давлении p объем V идеального газа меняется линейно с температурой.

То есть

$$V = V_0 (1 + \alpha t), \quad (2.31)$$

где V_0 — начальный объем, t — разность начальной и конечной температур. Коэффициент теплового расширения идеальных газов $\alpha = (1/273,15)\text{K}^{-1}$ 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. Дальтоном в 1801 г.

Закон Гей-Люссака, как и другие газовые законы, является следствием уравнения состояния идеального газа. Это становится очевидным, если в (2.31) заменить t абсолютной температурой $T = t + 273,15$, а коэффициент расширения α — его численным значением $1/273,15$:

$$V = V_0 \frac{T}{273,15} \quad (2.32)$$

или

$$\frac{V}{T} = \text{const при } p = \text{const.} \quad (2.33)$$

Для газа данной массы отношение объема к температуре постоянно, если давление газа не меняется.

Согласно (2.33), объем газа линейно зависит от температуры при постоянном давлении:

$$V = \text{const } T.$$

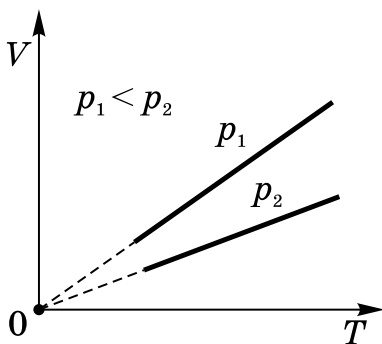


Рис. 2.6

Эта зависимость графически изображается прямой, которая называется *изобарой* (рис. 2.6).

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.

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:

$$p_0 = nkT. \quad (2.34)$$

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 (2.34) для идеального газа (рис. 2.7). С увеличением температуры давление насыщенного пара растет быстрее, чем давление идеального газа (участок кривой AB на рис. 2.7). 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 (2.34), *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).

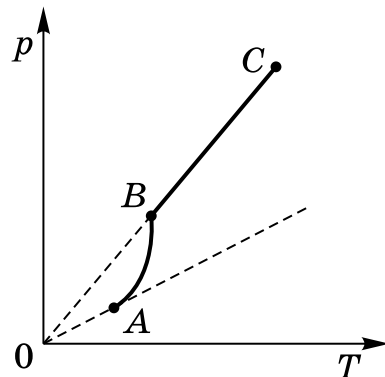


Рис. 2.7

После испарения всей жидкости поведение пара будет соответствовать поведению идеального газа (участок BC кривой на рис. 2.7).

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. 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:

$$\varphi = (\rho/\rho_0) \cdot 100 \%. \quad (2.35)$$

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:

$$\varphi = (p/p_0) \cdot 100 \%. \quad (2.36)$$

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.

Точка росы

Точка росы — это температура, до которой должен охладиться воздух, чтобы находящийся в нем водяной пар достиг состояния насыщения при постоянном давлении и данной влажности воздуха. При достижении точки росы в воздухе или на предметах, с которыми он соприкасается, начинается конденсация водяного пара. Точка росы может быть вычислена по значениям температуры и влажности воздуха или определена непосредственно *конденсационным гигрометром*. При *относительной влажности воздуха* $\varphi = 100 \%$ точка росы совпадает с температурой воздуха. При $\varphi < 100 \%$ точка росы всегда ниже температуры воздуха. Так, при температуре воздуха 15°C и относительной влажности (%) 100, 80, 60, 40 точка росы оказывается равной 15,0; 11,6; 7,3; 1,5 $^\circ\text{C}$.

2.1.15. Изменение агрегатных состояний вещества: испарение и конденсация, кипение жидкости

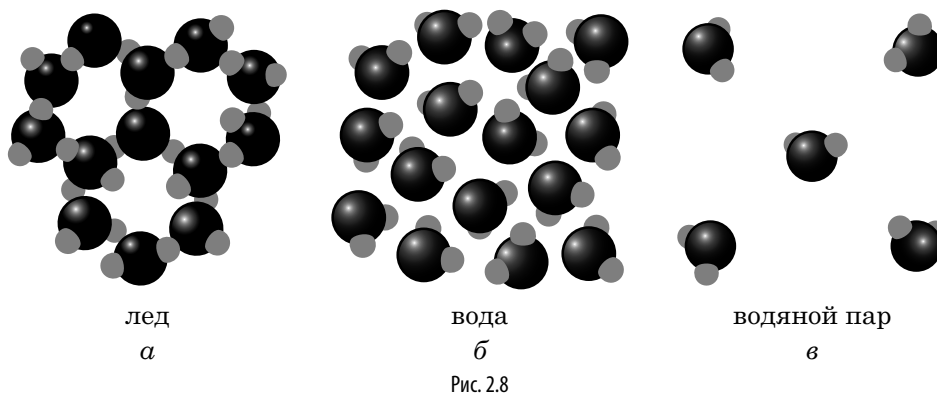
Агрегатные состояния вещества (от лат. *aggrego* — присоединяю) — это состояния одного и того же вещества в различных интервалах (промежутках) температур и давлений.

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. 2.8.



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. 2.9.

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.

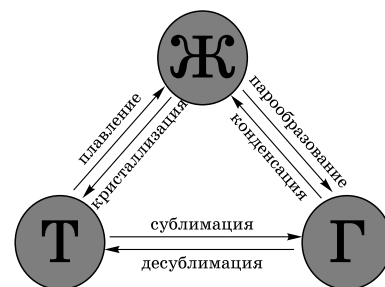


Рис. 2.9

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.

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.

Всем 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 °С. 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 °С 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. к. при меньших температурах давление насыщенного пара становится равным атмосферному. Например, при температуре кипения 100 °С давление насыщенных паров воды равно 101 325 Па (760 мм рт. ст.), а паров ртути — всего лишь 117 Па (0,88 мм рт. ст.). Кипит ртуть при 357 °С при нормальном давлении.

2.1.16. Изменение агрегатных состояний вещества: 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. 2.10 представлен график зависимости температуры кристаллического тела (льда) от времени нагревания (от точки А до точки D) и времени охлаждения (от точки D до точки К). На нем по горизонтальной оси отложено время, а по вертикальной — температура.

Из графика видно, что наблюдение за процессом началось с момента, когда температура льда была –40 °С, или, как принято говорить, температура в начальный момент времени $t_{\text{нач}} = -40\text{ °С}$ (точка А на графике). При дальнейшем нагревании температура льда растет (на графике это участок АВ). Увеличение температуры происходит до 0 °С — температуры плавления льда. При 0 °С лед начинает

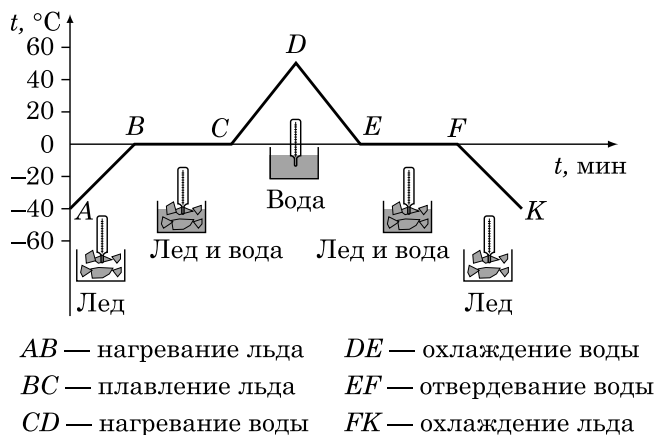


Рис. 2.10

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.

2.1.17. Преобразование энергии в фазовых переходах.

Рассмотренные в предыдущих параграфах изменения агрегатных состояний вещества относятся к фазовым превращениям. По определению Д. У. Гиббса (основателя термодинамики), *фазой* называется любое вещество, которое может быть удалено из системы соприкасающихся веществ чисто механическим способом. Здесь под системой веществ понимают вещество одного химического состава, части которого отличаются физическими свойствами (например, плотностью).

Так, смесь воды и льда — это две фазы одного и того же вещества с химической формулой H_2O . Аналогично любое твердое тело в процессе плавления распадается на две фазы — твердую и жидкую. Туман (капли жидкости в смеси с воздухом) является двухфазной системой. Вода, лед и водяной пар над ними — пример трехфазной системы. А вот раствор одного вещества в другом представляет собой одну фазу, поскольку составные части такого раствора не могут быть отделены друг от друга механическим способом. Таким образом, вещество в разных агрегатных состояниях представляет собой разные фазы вещества. Часто так и говорят: такое-то вещество в твердой фазе, в жидкой фазе. Однако различными фазами вещества не обязательно являются его агрегатные состояния. Иногда это могут быть различные структуры одного и того же кристаллического соединения, например графит и алмаз.

Переход вещества из одного фазового состояния в другое называется фазовым переходом (или фазовым превращением). Таким образом, испарение и конденсация, кипение, возгонка и сублимация, плавление и кристаллизация, рассмотренные выше, — все это примеры фазовых переходов.

Если фазовый переход проходит при определенной температуре (температуре фазового перехода) и сопровождается выделением или поглощением тепла, он называется фазовым переходом первого рода. Процессы превращения вещества из твердого в жидкое состояние и обратно (плавление и затвердевание), как и из жидкого в газообразное и обратно (кипение и конденсация) относятся к фазовому переходу первого рода.

Температурой фазового перехода здесь являются температура плавления и температура кипения. При этом происходит скачкообразное изменение плотности вещества.

Что происходит с внутренней энергией в процессе фазового перехода первого рода? Напомним, что внутреннюю энергию тела составляют кинетическая энергия всех его молекул и потенциальная энергия их взаимодействия (см. рис. 2.1). Минимальное значение потенциальной энергии взаимодействия частиц, U_{\min} на рис. 2.1, б представляет собой энергию связи молекул вещества. Эту энергию необходимо передать системе для того, чтобы связь эту разорвать, или, как говорят, преодолеть потенциальную яму. Относительным вкладом этих двух составляющих внутренней энергии тела и определяется фазовое состояние и фазовые превращения вещества. Когда $E_k \ll |U_{\min}|$, частицы находятся в связанном состоянии. Для разных фаз характерны следующие соотношения между ними: $E_k \ll |U_{\min}|$ — твердое тело; $E_k \sim |U_{\min}|$ — жидкость; $E_k \gg |U_{\min}|$ — газ.

Как уже было показано, в процессе плавления (см. рис. 2.10, участок BC) *кинетическая энергия движения молекул не меняется*, так как температура системы неизменна, а подводимое тепло идет

на разрушение кристаллической решетки твердого тела, т. е. на увеличение потенциальной энергии молекул и разрыва связей между ними, что приводит к превращению твердого тела в жидкость. В жидкостях средняя кинетическая энергия молекул меньше абсолютного значения средней потенциальной энергии (и внутренняя энергия в целом отрицательна, хотя ее абсолютное значение незначительно отличается от нуля).

При затвердевании (участок EF на рис. 2.10), кинетическая энергия жидкости в результате контакта с окружающей средой (теплообмен) уменьшается до величины, при которой расстояния между молекулами становятся достаточными для образования устойчивых связей (образования кристаллических зародышей). Потенциальная энергия молекул в узлах образующейся кристаллической решетки уменьшается, а избыток кинетической энергии выделяется в виде тепла при неизменной температуре (участок EF на рис. 2.10). Внутренняя энергия вещества в твердой фазе определяется главным образом взаимодействием молекул и зависит от их расположения: $E_k \ll |U_{\min}|$.

Аналогично, при кипении, подводимое тепло идет на увеличение потенциальной энергии молекул жидкости, т.е. на совершение работы по удалению молекул на расстояния при которых силы притяжения не в состоянии удерживать молекулы вблизи своих соседей и жидкость переходит в газ.

Таким образом, при фазовых переходах первого рода происходят скачкообразные изменения величины и состава внутренней энергии вещества:

- внутренняя энергия вещества в твердой фазе для температуры, при которой могут существовать одновременно и другие фазы, имеет наименьшее значение, а в газообразной фазе — наибольшее;
- в то же время в твердой фазе средняя потенциальная энергия взаимодействия (по абсолютной величине) во много раз больше средней кинетической энергии, в жидкости они сравнимы по величине, но средняя потенциальная энергия (по абсолютной величине) по-прежнему остается больше средней кинетической энергии молекул, а в газе абсолютное значение средней потенциальной энергии взаимодействия молекул во много раз меньше средней кинетической энергии молекул.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ 2.1 «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА»

Ответами к заданиям 1–9 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

- 1** Под количеством вещества понимают: **массу вещества, количество частиц его составляющих (молекул, атомов), количество молей, количество всех атомов**. Ответ запишите словами.

Ответ: _____ .

- 2** 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? К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в **таблицу** выбранные цифры под соответствующими буквами.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

ЗНАЧЕНИЕ

- А) отношение масс изделий свинец/олово
Б) отношение объемов изделий свинец/
олово

- 1) 1,5
2) 1,1
3) 3
4) 1,7
5) 1,9

Ответ:

А	Б

- 3** В сосуд с чистой водой осторожно налили каплю черной туши. Через некоторое время содержимое сосуда приобрело равномерный серый цвет. Это произошло благодаря: **притяжению частиц туши к Земле, диффузии, перемещению более теплых слоев жидкости вверх**. Ответ запишите словом (словами).

Ответ: _____ .

- 4** Как изменится давление газа, если концентрация его молекул увеличится в 3 раза, а средняя скорость — уменьшится в 3 раза: **увеличится, уменьшится, не изменится**? Ответ запишите словом (словами).

Ответ: _____ .

- 5** Чему равна температура по шкале Кельвина, если по шкале Цельсия она равна 300 °С? Ответ округлите до целых.

Ответ: _____ К.

- 6** Какова средняя кинетическая энергия молекул идеального газа при 300 °С?

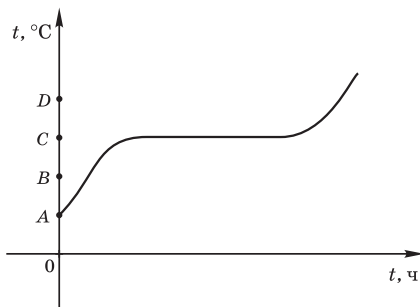
Ответ: _____ Дж.

- 7** Как изменится: **увеличится, уменьшится, не изменится** температура идеального газа заданной массы, если его объем уменьшить вдвое, а давление увеличить вдвое? Ответ запишите словом (словами).

Ответ: _____ .

8

На рисунке изображена зависимость температуры от времени некоторого вещества, в начальный момент времени находящегося в твердом состоянии. Количество подводимого тепла в единицу времени постоянно. Выберите два верных утверждения, основанных на анализе зависимости, показанной на рисунке.



- 1) В интервале температур AB вещество находится в жидком состоянии.
- 2) При температуре D вещество находится в газообразном состоянии.
- 3) Представленный на рисунке график описывает процесс плавления — фазовый переход первого рода.
- 4) Точка C соответствует температуре плавления.
- 5) Представленный на рисунке график описывает фазовый переход второго рода.

Ответ:

--	--

9

Установите соответствие между некоторыми свойствами вещества и его агрегатным состоянием. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в **таблицу** выбранные цифры под соответствующими буквами.

СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

АГРЕГАТНОЕ СОСТОЯНИЕ

- | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>А) расстояние между молекулами намного больше размеров самих молекул</p> <p>Б) вещество принимает форму сосуда, в который его помещают</p> | <p>1) жидкость</p> <p>2) газ</p> <p>3) твердое тело</p> <p>4) плазма</p> <p>5) аморфное тело</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|

Ответ:

А	Б

Ответами к заданиям 10–12 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

10

Вычислите среднеквадратичную скорость движения молекул неона при температуре 150 К.

Ответ: _____ м/с.

11

В сосуде содержится 10^{25} молекул воды. Какова масса воды?

Ответ: _____ кг.

12

Определите давление двух молей идеального газа, занимающего объем 2 л при температуре 10 К.

Ответ: _____ кПа.

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, в которое приходит термодинамическая система при неизменных внешних условиях. В равновесном состоянии в системе отсутствуют потоки энергии, импульса, массы и т. д.;
- *параметры состояния (термодинамические параметры)* — это физические величины, характеризующие равновесное состояние термодинамической системы. К ним относятся в первую очередь температура, объем и давление. В равновесном состоянии параметры состояния не зависят от времени;
- 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. Тепловое равновесие и температура

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 ($^{\circ}\text{C}$).

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.

2.2.2. 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.

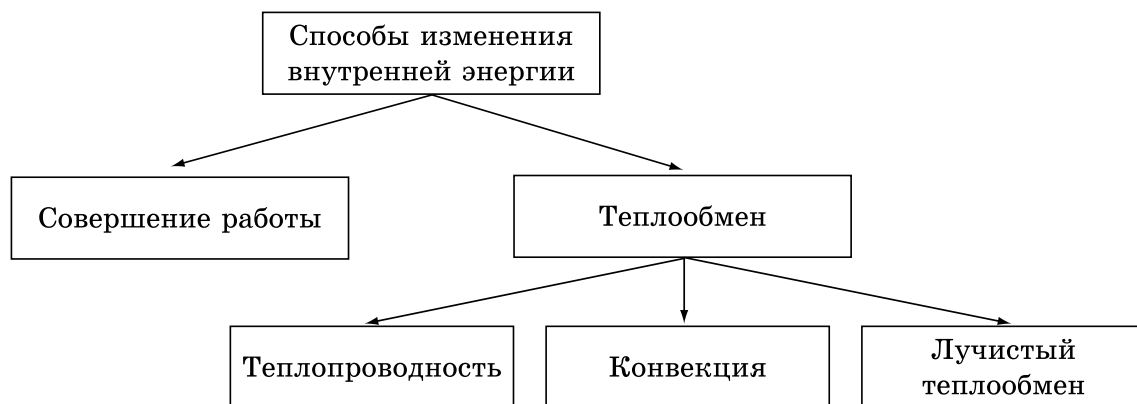
2.2.3. Теплообмен

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



К одному из способов теплообмена относится также и теплопередача. Теплопередача — это теплообмен между двумя теплоносителями через разделяющую их твердую стенку или через поверхность раздела между ними. Теплопередача включает в себя теплоотдачу от более горячей жидкости или газа к стенке, теплопроводность в стенке, теплоотдачу от стенки к более холодной жидкой или газообразной среде.

Теплопроводность — это один из видов переноса тепла, 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 кусочки 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 доньшко. 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 свежеевыпавшего 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 горящей 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 затушат 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, закупленную с одной стороны, колбу (рис. 2.11). 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 закупленной 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 закупленной, а затем светлой стороной, то столбик жидкости в первом случае переместится на большее расстояние, чем во втором (рис. 2.11). Из этого следует, что тела с темной поверхностью лучше поглощают энергию (и, следовательно, сильнее нагреваются), чем тела со светлой или зеркальной поверхностью.

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.

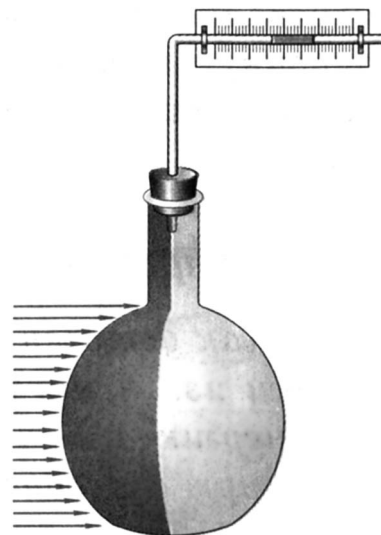


Рис. 2.11

2.2.4. Количество теплоты. Удельная теплоемкость вещества

Количеством теплоты называют количественную меру изменения внутренней энергии тела при теплообмене.

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 ($\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$).

Удельная теплоемкость одного и того же вещества в разных агрегатных состояниях (твердом, жидком и газообразном) различна. Например, удельная теплоемкость воды равна $4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$, а удельная теплоемкость льда $2100 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; алюминий в твердом состоянии имеет удельную теплоемкость, равную $920 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$, а в жидком — $1080 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$.

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:

$$Q = cm(t_2 - t_1), \quad (2.37)$$

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

$$Q = C(t_2 - t_1). \quad (2.38)$$

2.2.5. Удельная теплота парообразования, плавления, сгорания

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 :

$$Q = rm. \quad (2.39)$$

При конденсации пара происходит выделение такого же количества теплоты:

$$Q = -rm. \quad (2.40)$$

Удельная 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:

$$Q = \lambda m. \quad (2.41)$$

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»:

$$-Q = \lambda m. \quad (2.42)$$

Удельная 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:

$$Q = qm. \quad (2.43)$$

Чтобы найти количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании топлива произвольной массы, нужно удельную теплоту сгорания этого топлива умножить на его массу.

2.2.6. 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.

Рассмотрим работу газа при изобарическом расширении.

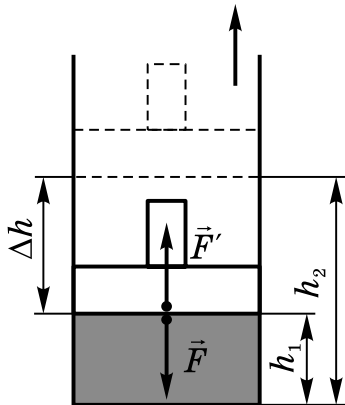


Рис. 2.12

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. 2.12): $\vec{F}' = -\vec{F}$ (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:

$$A' = F' \Delta h = pS \Delta h = p \Delta V. \quad (2.44)$$

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 (2.44) появится знак «минус»: $\Delta V < 0$, поскольку $\Delta h < 0$ (см. рис 2.13).

Работа внешних сил A , наоборот, положительна при сжатии газа и отрицательна при расширении:

$$A = -A' = -p\Delta V. \quad (2.45)$$

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. 2.14 а, б).

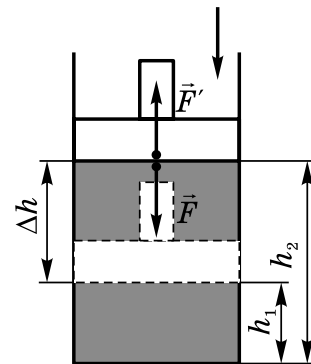


Рис. 2.13

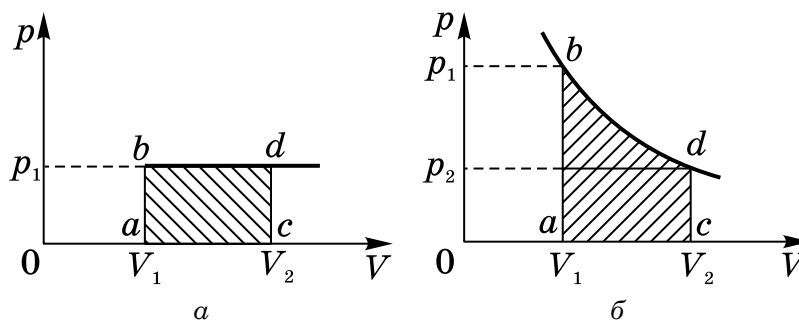


рис. 2.14

2.2.7. 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:

$$\Delta U = A + Q, \quad (2.46)$$

где ΔU — изменение внутренней энергии, A — работа внешних сил, Q — количество теплоты, переданной системе.

Из (2.46) 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 (2.46) записывается в виде:

$$Q = \Delta U + A', \quad (2.47)$$

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 (2.47), 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. 2.5).

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 (2.47)),

$$\Delta U = Q, \quad (2.48)$$

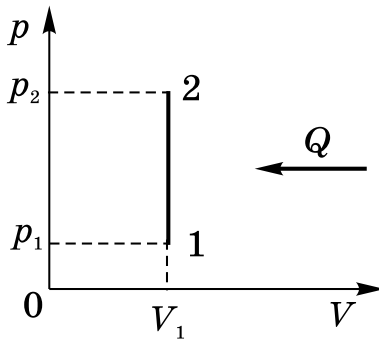


Рис. 2.15

т. е. изменение внутренней энергии равно количеству переданного тепла, т. к. работа ($A = p\Delta V = 0$) газом не совершается (рис. 2.15).

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. 2.4).

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:

$$Q = A'. \quad (2.49)$$

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. 2.14, б).

Изобарный процесс на термодинамической диаграмме изображается *изобарой* (см. рис. 2.6).

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 (2.47) 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. 2.14, 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

$$\Delta U = A, \quad (2.50)$$

где A — работа внешних сил.

При адиабатном расширении газа $A < 0$.

Следовательно, согласно (2.21)

$$\Delta U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} R \Delta T < 0,$$

что означает уменьшение температуры при адиабатном расширении. Оно приводит к тому, что давление газа уменьшается более резко, чем при изотермическом процессе. На рис. 2.16 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.

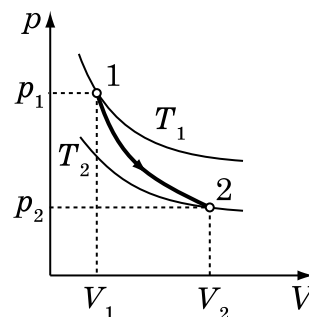


Рис. 2.16

2.2.8. Второй закон термодинамики. Необратимость

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 за-

мене 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.

На 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*).

2.2.9. Принцип действия тепловых двигателей

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. 2.17).

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:

$$\eta = \frac{A'}{|Q_1|} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}. \quad (2.51)$$

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.

2.2.10. 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.

На рис. 2.18 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 :

$$A_{12} = Q_1.$$

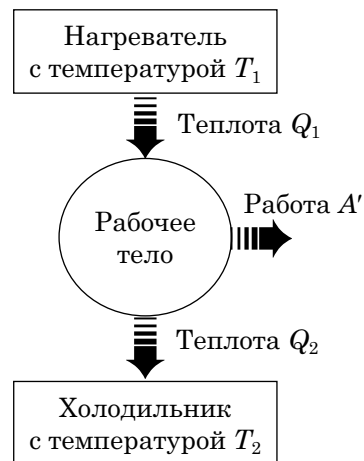


Рис. 2.17

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:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (2.52)$$

Суть формулы (2.52) 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.*

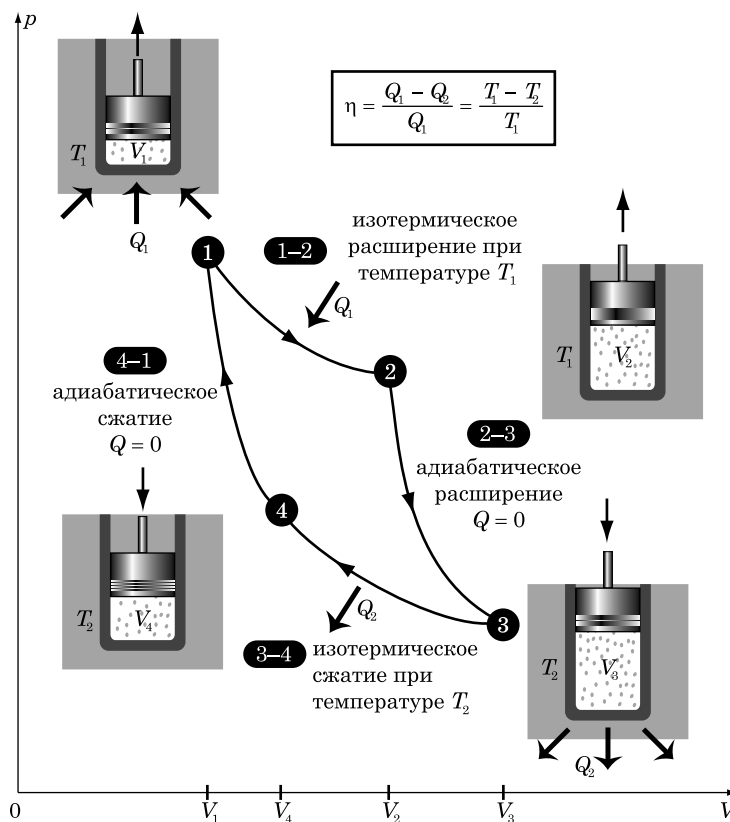


Рис. 2.18

2.2.11. 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,

$$\Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \dots + \Delta U_n = \sum_i^n \Delta U_i = 0. \quad (2.53)$$

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 (2.53), получим:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n = \sum_i^n Q_i = 0. \quad (2.54)$$

Это уравнение называется уравнением теплового баланса. Здесь Q_i — количество теплоты, полученное или отданное i -м 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.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ 2.2 «ТЕРМОДИНАМИКА»

Ответами к заданиям 1–8 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

- 1** В каких 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, длительное время спустя.
 - 3) В помещении топится печь, но при этом открыто окно.
 - 4) В сосуд с водой опустили включенный кипятильник.
 - 5) В системе отсутствуют потоки энергии, импульса, массы и т. д.

Ответ:

- 2** Как изменится внутренняя энергия идеального одноатомного газа, если его молярную массу увеличить в 2 раза, а температуру уменьшить в 2 раза: **возрастет в 2 раза, уменьшится в 4 раза, не изменится?** Ответ запишите словами.

Ответ: _____ .

- 3** Для увеличения температуры тела на 10°C ему передали энергию 420 Дж. Чему равна теплоемкость тела?

Ответ: _____ Дж/К.

- 4** При кристаллизации 100 г жидкости было выделено 0,17 Дж. Определить удельную теплоту плавления этого вещества.

Ответ: _____ Дж/кг.

- 5** 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 изменилась его внутренняя энергия: **удвоилась, уменьшилась в 1,5 раза, увеличилась в 1,2 раза?** Ответ запишите словом (словами).

Ответ: _____ .

- 6** Какую работу совершает идеальный газ при изобарном расширении, если количество подведенного к нему тепла равно 2 кДж, а его внутренняя энергия изменилась на 1 кДж?

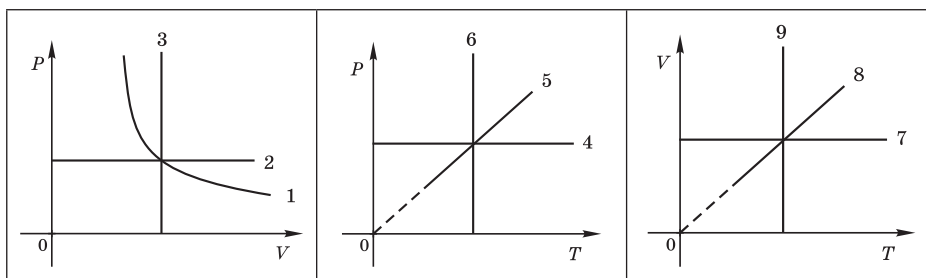
Ответ: _____ кДж.

- 7** В результате изотермического процесса газом совершена работа 5 Дж. Каково количество тепла, подведенное к газу?

Ответ: _____ Дж.

8

На рисунках представлены графики (кривые 1–9) изопроцессов в координатах $p(V)$, $p(T)$, $V(T)$. Проанализируйте рисунки и выберите два верных утверждения о процессах, представленных графиками 1–9.



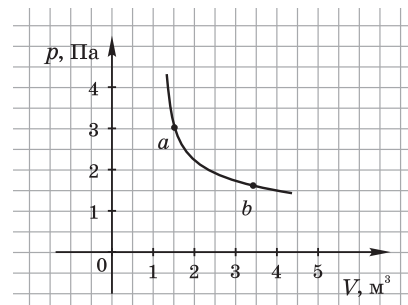
- 1) Графики 3, 5, 7 описывают изохорический процесс.
- 2) Изохорический процесс представлен графиками 2, 5, 7.
- 3) Изобару представляют кривые 8, 1, 9.
- 4) Изотермический процесс представлен графиками 4, 1, 9.
- 5) Изобары описаны графиками 2, 4, 5; изотермы — 1, 3, 7; изохоры — 6, 9, 2.
- 6) Изобары описаны графиками 2, 4, 8; изотермы — 1, 6, 9.

Ответ:

Ответами к заданиям 9–11 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

9

Определите по графику примерное значение работы, совершенной газом при изотермическом расширении на участке между точками a и b .



Ответ: _____ Дж.

10

В термостат с 2 л воды при температуре 90°C опустили кусок льда в медном ведре. Масса льда $0,2$ кг, температура -10°C , масса ведерка 100 г, его температуру считать комнатной $+20^\circ\text{C}$. Какой будет температура содержимого термостата после установления термодинамического равновесия? Ответ дайте в $^\circ\text{C}$.

Ответ: _____ $^\circ\text{C}$.



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 заканчивая 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. Электрическое поле

3.1.1. Электрические заряды. Закон сохранения заряда

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.

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, могут 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.

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 Бенджаминем 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.

3.1.2. 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 зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

В аналитическом виде закон Кулона имеет вид:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}, \quad (3.1)$$

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

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 $\text{Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2$. 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.

3.1.3. 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 близкодействия*, главным отличием которой от теории дальнего действия 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.

3.1.4. Напряженность электрического поля

Напряженность электрического поля — векторная характеристика поля, сила, действующая на единичный покоящийся в данной системе отсчета электрический заряд.

Напряженность определяется по формуле:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad (3.2)$$

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 q с силой, равной

$$F = k \frac{|q_0||q|}{r^2}.$$

Модуль напряженности поля точечного заряда q_0 на расстоянии r от него равен

$$E = \frac{F}{q} = k \frac{|q_0|}{r^2}. \quad (3.3)$$

Вектор напряженности в любой точке электрического поля направлен вдоль прямой, соединяющей эту точку и заряд (рис. 3.1).

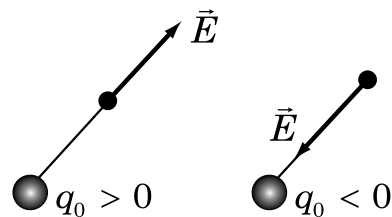


Рис. 3.1

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. 3.2–3.5 изображены линии напряженности положительно заряженного шарика (рис. 3.2); двух разноименно заряженных шариков (рис. 3.3); двух одноименно заряженных шариков (рис. 3.4) и двух пластин, заряженных разными по знаку, но одинаковыми по абсолютной величине зарядами (рис. 3.5).

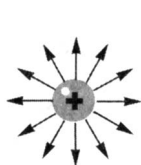


Рис. 3.2

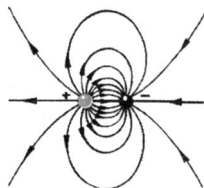


Рис. 3.3

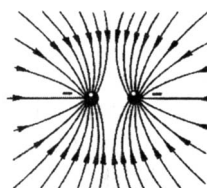


Рис. 3.4

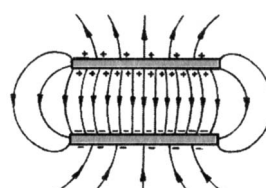


Рис. 3.5

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, пересечение силовых линий говорило бы о неопределенности направления напряженности поля в точке пересечения. *Плотность силовых линий больше вблизи заряженных тел, где напряженность поля больше.*

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. 3.6, а), аналогичное распределению линий напряженности точечного заряда (рис. 3.6, б).

Заряд шара распределен равномерно по его поверхности. Внутри проводящего шара напряженность поля равна нулю.

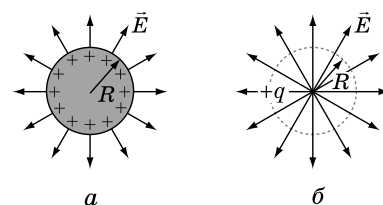


Рис. 3.6

3.1.5. 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: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$

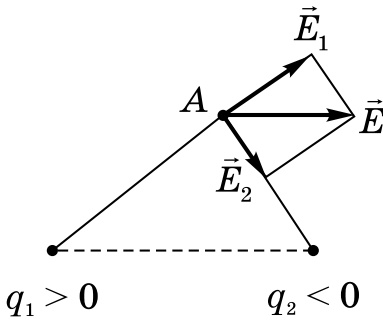


Рис. 3.7

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. 3.7 показано, как в точке А определяется напряженность поля \vec{E} , созданная двумя точечными зарядами q_1 и q_2 .

3.1.6. 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

Пусть в однородном электрическом поле \vec{E} положительный заряд q перемещается на расстояние $\Delta \vec{r}$ из точки 1 в точку 2 (рис. 3.8). Сила, действующая со стороны поля на электрический заряд, направлена всегда вдоль поля и определяется согласно (3.2):

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

Работа A , совершаемая постоянной силой \vec{F} при прямолинейном перемещении, равна скалярному произведению \vec{F} на $\Delta \vec{r}$:

$$A = (\vec{F} \cdot \Delta \vec{r}) = F \cdot \Delta r \cdot \cos \alpha = Fh, \quad (3.4)$$

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 (3.4), 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.*

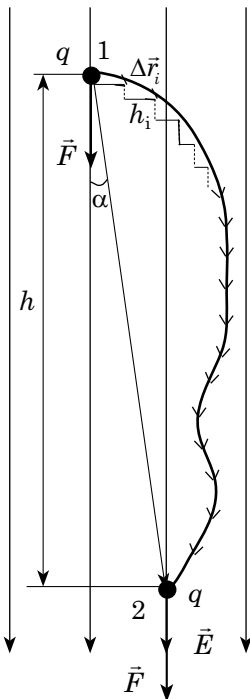


Рис. 3.8

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: $A = -(E_{n\infty} - E_{n_1})$. Потенциальная энергия точки в бесконечности принята равной нулю: $E_{n\infty} = 0$; $E_{n_1} \equiv E_n$ — потенциальная энергия рассматриваемой точки поля. Выбор нулевого уровня потенциала произволен, так как физический смысл имеет не сам потенциал, а *разность потенциалов*, или *напряжение* поля.

Разность потенциалов

Разность потенциалов (напряжение) между двумя точками поля равна отношению работы поля по перемещению заряда из начальной точки в конечную к этому заряду:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}. \quad (3.5)$$

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:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n. \quad (3.6)$$

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 к эквипотенциальным поверхностям. Эквипотенциальные поверхности однородного поля представляют собой плоскости, а точечного заряда — концентрические сферы.

Вектор напряженности \vec{E} (как и сила \vec{F}) перпендикулярен к эквипотенциальным поверхностям. Эквипотенциальной является поверхность любого проводника в электростатическом поле, так как силовые линии перпендикулярны к 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

$$A = F \cdot d = qEd = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU \quad (3.7)$$

или

$$E = \frac{U}{d}. \quad (3.8)$$

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 (3.5), $1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}$.

Разность потенциалов между двумя точками равна 1 вольту, если при перемещении заряда в 1 Кл между этими точками поле совершает работу в 1 Дж.

3.1.7. 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.

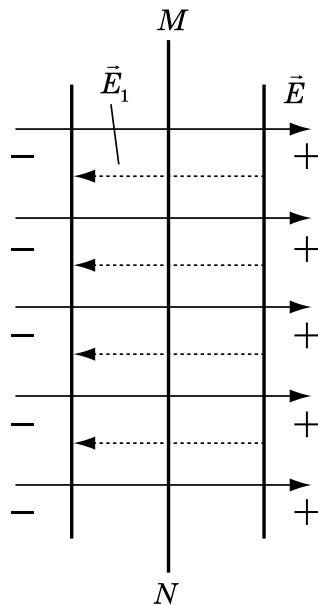


Рис. 3.9

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. 3.9). 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. 3.9).

Линии напряженности электрического поля вне проводника всегда перпендикулярны к 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.

Таким образом, при равновесии зарядов внутри проводника, помещенного во внешнее электрическое поле, $E_{\text{внутр}} = 0$, поверхность проводника эквипотенциальна, т. е. $\varphi = \text{const}$, а разность потенциалов между любыми точками внутри проводника равна нулю.

3.1.8. 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. 3.10).

Неполярные диэлектрики состоят из атомов и молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов совпадают.

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. 3.11). Разворот происходит под действием пары сил, приложенных со стороны поля, к двум зарядам диполя (рис. 3.12). 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.

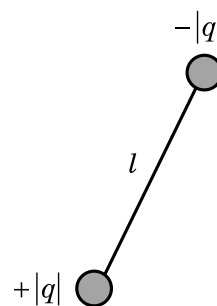


Рис. 3.10

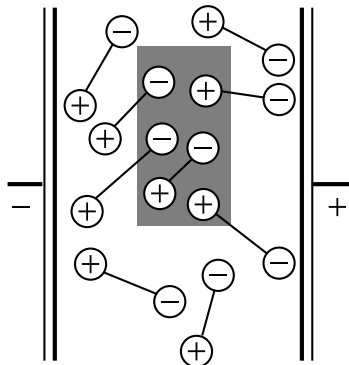


Рис. 3.11

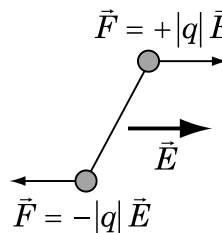


Рис. 3.12

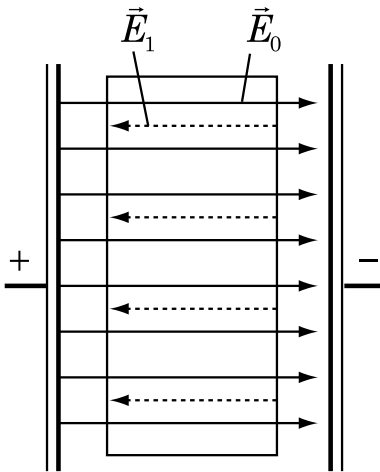


Рис. 3.13

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.

Поляризованный диэлектрик сам создает электрическое поле (\vec{E}_1 , рис. 3.13). 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:

$$\varepsilon = E_0/E. \quad (3.9)$$

В соответствии с этим сила взаимодействия зарядов в среде в ε раз меньше, чем в вакууме и, следовательно, в среде с диэлектрической проницаемостью ε закон Кулона имеет вид:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon r^2}. \quad (3.10)$$

3.1.9. Электрическая емкость конденсатора

Емкость

Емкостью проводника C называют численную величину заряда, которую нужно сообщить проводнику, чтобы изменить его потенциал на единицу:

$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (3.11)$$

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:

$$C = \frac{q}{U} \sim \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}, \quad (3.12)$$

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.

3.1.10. Параллельное и последовательное соединение конденсаторов

Электроемкость батареи конденсаторов при параллельном соединении равна сумме электроемкостей отдельных конденсаторов:

$$C = C_1 + C_1 + C_1 + \dots \quad (3.13)$$

При последовательном соединении конденсаторов складываются обратные величины электроемкостей:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \quad (3.14)$$

Очевидно, что электроемкость батареи из последовательно соединенных конденсаторов меньше электроемкости любого из конденсаторов, а при параллельном — больше.

3.1.11. Энергия поля конденсатора

Энергия заряженного конденсатора выражается формулами

$$E_n = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}, \quad (3.15)$$

которые выводятся с учетом выражений для связи работы и напряжения (3.5) и для емкости плоского конденсатора (3.12).

Энергия электрического поля. Объемная плотность энергии электрического поля (энергия поля в единице объема) напряженностью E выражается формулой:

$$\omega = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2}, \quad (3.16)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость среды, ε_0 — электрическая постоянная.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ 3.1 «ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ»

Ответами к заданиям 1–7 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

- 1** Если два заряда притягиваются друг к другу, это значит, что заряды эти **одноименные** (оба имеют знак «плюс» или знак «минус»), **разноименные** (один имеет знак «минус», второй — знак «плюс»)? Ответ запишите словом.

Ответ: _____.

- 2** Как изменится сила и направление взаимодействия между двумя точечными зарядами, если абсолютную величину каждого заряда увеличить вдвое, знак одного из них поменять на обратный, а расстояние между ними уменьшить в два раза? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) останется неизменной
- 2) увеличится вдвое по модулю и поменяет свое направление на обратное
- 3) увеличится по модулю в 8 раз
- 4) увеличится по модулю в 16 раз
- 5) поменяет свое направление на обратное

Запишите в **таблицу** выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Сила взаимодействия	Направление взаимодействия

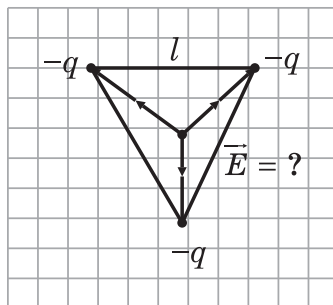
- 3** Какую **напряженность** поля создает точечный заряд величиной $+3 \text{ мкКл}$ в вакууме на расстоянии 3 м? Как **направлен** вектор напряженности? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) вдоль линии, соединяющей заряд и точку, направлен от заряда
- 2) направлен перпендикулярно линии, соединяющей заряд и точку
- 3) вдоль линии, соединяющей заряд и точку, направлен к заряду
- 4) 2000 В/м
- 5) 3000 В/м
- 6) 2500 В/м

Запишите в **таблицу** выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Напряженность	Направление взаимодействия

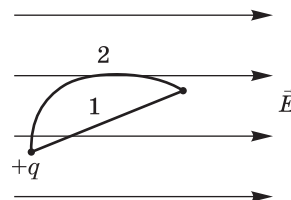
- 4** Чему равна величина напряженности электрического поля в центре равностороннего треугольника, в вершинах которого расположены три равных заряда $-q$?



Ответ: _____.

5

На рисунке изображены траектории перемещения электрического заряда между двумя точками в однородном электростатическом поле. В каком случае работа поля по перемещению заряда больше: **вдоль траектории 1, вдоль траектории 2, одинакова?** Ответ запишите словом (словами).



Ответ: _____.

6

Потенциалы электрических полей трех точечных зарядов в некоторой точке А равны соответственно -5 В, $+3$ В и -1 В. Чему равно суммарное значение потенциала в этой точке?

Ответ: _____ В.

7

Как изменится энергия заряженного конденсатора, если напряжение между его обкладками уменьшить вдвое, а площадь пластин увеличить вдвое: **увеличится вдвое, уменьшится вдвое, увеличится в 4 раза, останется неизменной?** Ответ запишите словами.

Ответ: _____.

Ответами к заданиям 8–11 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

8

Для перемещения заряда 1 мкКл из одной точки поля в другую была совершена работа $0,4$ мДж. Определите разность потенциалов между этими точками.

Ответ: _____ В.

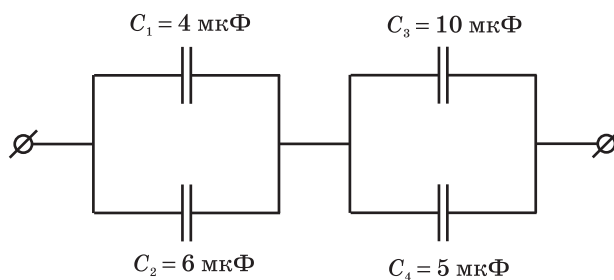
9

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 $\epsilon=6$?

Ответ: _____ мкФ.

10

Чему равна емкость батареи конденсаторов, изображенных на рисунке? Ответ дайте в мкФ.



Ответ: _____ мкФ.

11

Напряженность электрического поля в воде равна 10 В/м. Чему равна объемная плотность поля? Ответ дайте в мкДж/м³.

Ответ: _____ мкДж/м³.

3.2. Законы постоянного тока

3.2.1. Сила тока

Электрическим током называется упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.

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:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (3.17)$$

Итак, чтобы найти силу тока I , надо электрический заряд Δq , прошедший через поперечное сечение проводника за время Δt , разделить на это время.

Сила тока зависит от заряда, переносимого каждой частицей, скорости их направленного движения и площади поперечного сечения проводника.

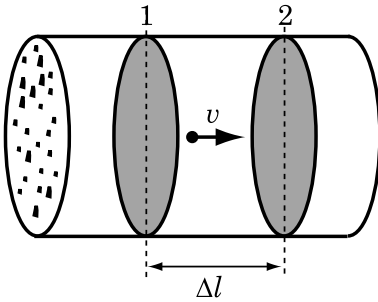


Рис. 3.14

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 $q = q_0 n S \Delta l$. 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:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{q_0 n S \Delta l \cdot v}{\Delta l} = q_0 n v S. \quad (3.18)$$

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. Условия существования электрического тока

Для существования электрического тока необходимо:

- 1) наличие в теле свободных заряженных частиц. Они называются *носителями тока*;
- 2) наличие силы, заставляющей носителей заряда двигаться в заданном направлении. Такую силу может обеспечить электрическое поле внутри проводника, которое создает между концами проводника разность потенциалов $U = \varphi_1 - \varphi_2$.

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 обладающим электродвижущей силой ε и за счет этого, 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.

3.2.3. 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:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (3.19)$$

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 (3.19), и растворов электролитов. Знание ВАХ играет большую роль при изучении тока.

Закон Ома — это основа всей электротехники. Из закона Ома (3.19) 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).

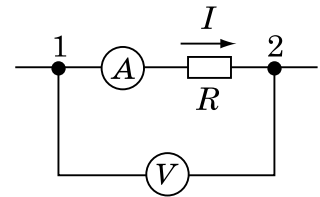


Рис. 3.15

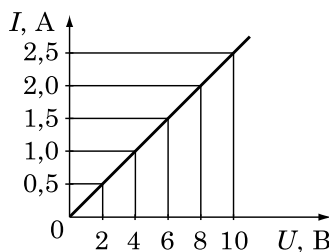


Рис. 3.16

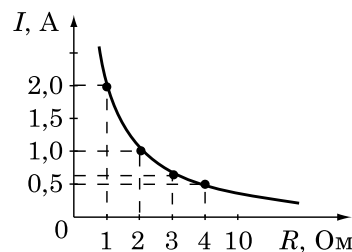


Рис. 3.17

3.2.4. 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:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (3.20)$$

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 (3.20) 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:

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}. \quad (3.21)$$

Зависимость удельного сопротивления проводников от температуры выражается формулой:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t). \quad (3.22)$$

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%-го раствора поваренной соли $\alpha = -0,02 \text{ K}^{-1}$. Для константана (сплав меди с никелем) $\alpha = 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Зависимость сопротивления проводника от температуры используется в *термометрах сопротивления*.

3.2.5. 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*:

$$\varepsilon = A_{\text{ст}}/q, \quad (3.23)$$

где ε — 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.

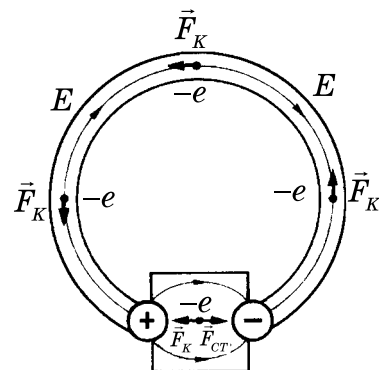


Рис. 3.18

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.

3.2.6. Закон Ома для полной электрической цепи

Электрическая цепь

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.

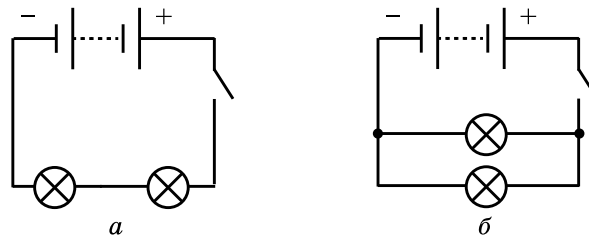


Рис. 3.19

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

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 (ε), равна $A_{\text{ст}} = \varepsilon q$, где q — заряд, перемещенный ЭДС. Согласно определению тока $q = It$, где t — время, в течение которого переносился заряд. Отсюда имеем:

$$A_{\text{ст}} = \varepsilon It. \quad (3.24)$$

Тепло, выделяемое при совершении работы в цепи, согласно закону Джоуля — Ленца, равно:

$$Q = I^2 R t + I^2 r t. \quad (3.25)$$

Согласно закону сохранения энергии $A = Q$. Приравняв (3.24) и (3.25), получим:

$$\varepsilon = IR + Ir. \quad (3.26)$$

Закон Ома для замкнутой цепи обычно записывается в виде:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (3.27)$$

Сила тока в полной цепи равна отношению ЭДС цепи к ее полному сопротивлению.

Если цепь содержит несколько последовательно соединенных источников с ЭДС $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 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:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = |\varepsilon_1| - |\varepsilon_2| + |\varepsilon_3|. \quad (3.28)$$

В соответствии с (3.27) 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:

$$R_n = R + r_1 + r_2 + r_3. \quad (3.29)$$

3.2.7. Параллельное и последовательное соединение проводников

Для **параллельного соединения** проводников (рис. 3.22) справедливы следующие соотношения:

- 1) электрический ток, поступающий в точку A разветвления проводников (она называется также *узлом*), равен сумме токов в каждом из элементов цепи:

$$I = I_1 + I_2; \quad (3.30)$$

- 2) напряжение U на концах проводников, соединенных параллельно, одно и то же:

$$U = U_1 = U_2; \quad (3.31)$$

- 3) при параллельном соединении проводников складываются их обратные сопротивления:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}; \quad (3.32)$$

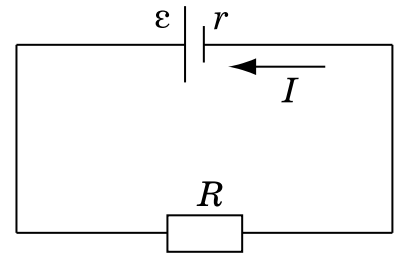


Рис. 3.20

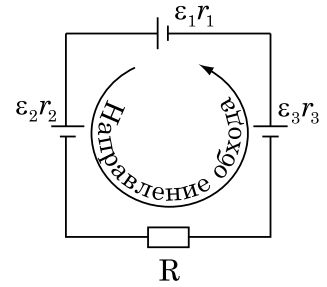


Рис. 3.21

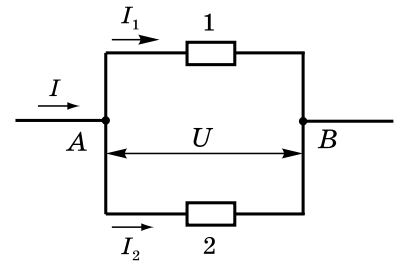


Рис. 3.22

4) сила тока и сопротивление в проводниках связаны соотношением:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (3.33)$$

Для **последовательного соединения проводников в цепи** (рис. 3.23) справедливы следующие соотношения:

1) для общего тока I :

$$I = I_1 = I_2, \quad (3.34)$$

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;

2) общее напряжение U на концах всего рассматриваемого участка равно сумме напряжений на отдельных его участках:

$$U = U_1 + U_2; \quad (3.35)$$

3) полное сопротивление R всего участка цепи равно сумме последовательно соединенных сопротивлений:

$$R = R_1 + R_2; \quad (3.36)$$

4) также справедливо соотношение:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (3.37)$$

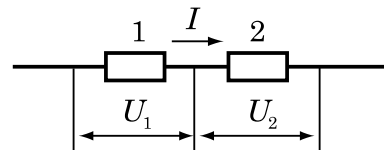


Рис. 3.23

3.2.8. Работа электрического тока. Закон Джоуля — Ленца

Работа, совершаемая током, проходящим по некоторому участку цепи, согласно (3.5) равна:

$$A = qU,$$

где A — работа тока; q — электрический заряд, прошедший за данное время через рассматриваемый участок цепи. Подставляя в последнее равенство формулу $q = It$, получаем:

$$A = IUt. \quad (3.38)$$

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:

$$Q = I^2 Rt. \quad (3.39)$$

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 (3.39) следует, что, так как, согласно закону Ома (см. *Ома закон*) $I = \frac{U}{R}$, то

$$Q = \frac{U^2 t}{R}. \quad (3.40)$$

Следовательно, на проводнике с меньшим сопротивлением будет выделяться больше тепла.

Если в формуле (3.38) 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.

3.2.9. 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 (3.38), получаем:

$$P = IU. \quad (3.41)$$

Это выражение можно переписать в разных формах, воспользовавшись законом Ома для участка цепи:

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (3.42)$$

Из соотношения (3.10) для ЭДС легко получить мощность источника тока:

$$P_\epsilon = \epsilon I. \quad (3.43)$$

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 большей 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 кВт · ч = 1000 Вт · 3600 с = 3 600 000 Дж.

3.2.10. Свободные носители электрического заряда в металлах, жидкостях и газах. Полупроводники

Электрический ток в металлах

Электрический ток в металлах обусловлен упорядоченным движением свободных электронов (электронов проводимости).

Положительные ионы участия в переносе заряда не принимают.

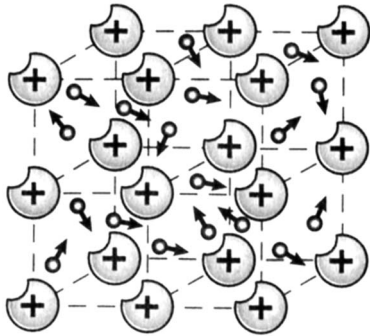


Рис. 3.24

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.

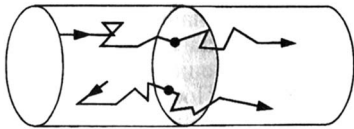
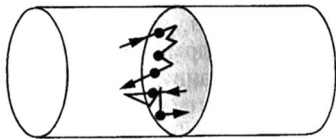


Рис. 3.25

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.).

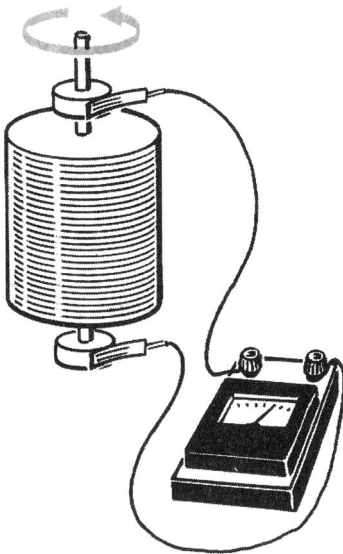


Рис. 3.26

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 электронной 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 формулу (3.18) для силы тока.

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 выражения 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 .

Далее, подставляя полученное уравнение в выражение (3.18), получим:

$$I = envS = \frac{e^2 n \tau S U}{mL}. \quad (3.44)$$

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:

$$m = kI\Delta t. \quad (3.45)$$

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

$$k = \frac{1}{eN_A} \cdot \frac{M}{n}, \quad (3.46)$$

где e — заряд электрона, N_A — число Авогадро, M — молярная (или атомная) масса вещества, n — валентность иона, т. е. $k = \frac{m_{0_i}}{q_{0_i}}$ — 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:

$$e = \frac{M}{mnN_A} I\Delta t. \quad (3.47)$$

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.

Полупроводники

К полупроводникам относят широкий класс веществ, которые отличаются от металлов тем, что:

- 1) концентрация подвижных носителей заряда в них существенно ниже, чем концентрация атомов;
- 2) эта концентрация (а с ней и электропроводность) может меняться под влиянием температуры, освещения, небольшого количества примесей;
- 3) электрическое сопротивление уменьшается с ростом температуры (рис. 3.27).

Отличие полупроводников от диэлектриков условно. К диэлектрикам обычно относят вещества с удельным сопротивлением $\rho \geq 10^{11} - 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (при комнатной температуре); к полупроводникам — соответственно с $\rho \leq 10^{11} \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Полупроводники по своему строению делятся на кристаллические, аморфные 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 рассмотрим на примере кремния (рис. 3.28, а).

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.

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).

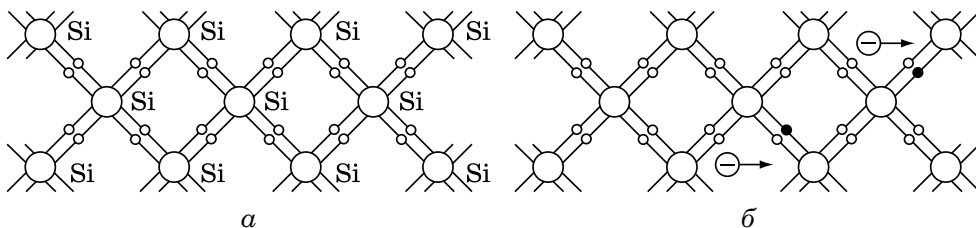


Рис. 3.28

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.

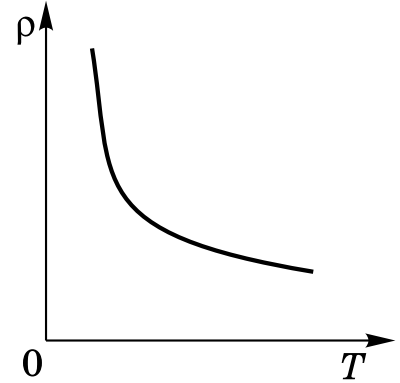


Рис. 3.27

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.

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).

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 пятивалентного 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 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. Полупроводниковый диод

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*.

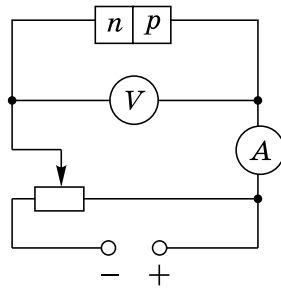


Рис. 3.29

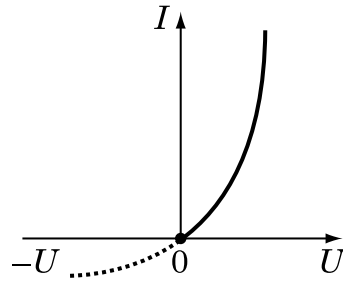


Рис. 3.30

Полупроводниковые диоды изготавливают из германия, кремния, селена и других веществ. Например, для изготовления диода на основе германия (Ge) в одну из поверхностей образца вплавляют индий (In). Проводимость Ge — n -типа. In, диффундируя в образец Ge, создает в приповерхностном слое проводимость p -типа. Остальная часть образца германия, в которую атомы индия не проникли, по-прежнему имеет проводимость n -типа. Между двумя областями с проводимостями разных типов возникает p - n -переход. В таком диоде Ge служит катодом, а In — анодом.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ 3.2 «ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА»

Ответами к заданиям 1–11 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

- 1** 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: **увеличится в 1,5 раза, увеличится в 3 раза, уменьшится в два раза, увеличится в 6 раз?** Ответ запишите словами.

Ответ: _____ .

- 2** Закон Ома для участка цепи связывает напряжение на его концах U , ток в цепи I и его сопротивление R . Как изменится, согласно этому закону, сила тока и сопротивление при увеличении напряжения? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

1) увеличится 2) уменьшится 3) не изменится

Запишите в **таблицу** выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Сила тока I	Сопротивление R

- 3** Какими формулами выражаются законы Ома для участка цепи и для полной цепи? К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в **таблицу** выбранные цифры под соответствующими буквами.

ЗАКОН

ФОРМУЛА

- А) законы Ома для участка цепи
Б) законы Ома для полной цепи

- 1) $R = \rho \frac{l}{S}$
2) $I = envS$
3) $Q = I^2 R t$
4) $I = \frac{U}{R}$
5) $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$

Ответ:

А	Б

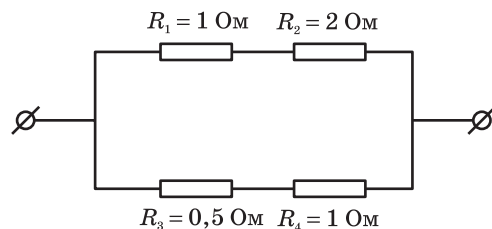
- 4** Сторонние силы при перемещении электрического заряда в 5 Кл от одного полюса к другому внутри источника тока совершают работу, равную 10 Дж. Определите ЭДС источника.

Ответ: _____ В.

5

Зная закон Джоуля — Ленца, можно сказать, что максимальное количество тепла выделится на сопротивлении: **первом, втором, третьем, четвертом?** Ответ запишите словом.

Ответ: _____ .



6

Добавление примеси фосфора в германий приведет к образованию проводимости: ***n*-типа, *p*-типа, не изменит проводимость германия?** Ответ запишите словом (словами).

Ответ: _____ .

7

Установите соответствие между проводником и типом свободных носителей в нем. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ПРОВОДНИКИ

- А) металлы
Б) полупроводники

СВОБОДНЫЕ НОСИТЕЛИ

- 1) положительно заряженные ионы
- 2) отрицательно заряженные ионы
- 3) положительно и отрицательно заряженные ионы
- 4) электроны и ионы
- 5) дырки и электроны
- 6) электроны

Ответ:

А	Б

8

Каково сопротивление алюминиевой проволоки длиной 2 м, диаметром 1 мм?

Ответ: _____ Ом.

9

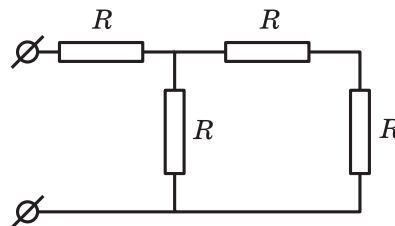
Каково сопротивление проводника из чистого металла при температуре 50°C, если его сопротивление при 0°C равно 10 Ом? Температурный коэффициент сопротивления проводника считать постоянным в этом интервале температур.

Ответ: _____ Ом.

10

Определите сопротивление участка цепи, состоящего из одинаковых резисторов с сопротивлением R , выразив его в «единицах» R .

Ответ: _____ R .



11

Каково сопротивление нити электролампы мощностью 60 Вт?

Ответ: _____ Ом.

3.3. Магнитное поле

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 описанные ниже явления взаимодействия магнитов, опыты Эрстеда и Ампера.

3.3.1. Магнитное поле. Взаимодействие магнитов

Явление взаимодействия постоянных магнитов (установление магнитной стрелки вдоль магнитного меридиана Земли, притяжение разноименных полюсов, отталкивание одноименных) известно с древних времен и систематически исследовано У. Гильбертом (результаты опубликованы в 1600 г. в его трактате «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле»).

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. 3.31, а).

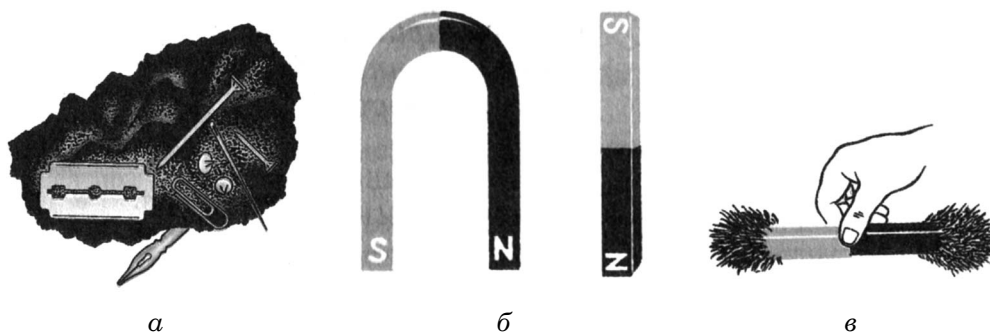


Рис. 3.31

Искусственные постоянные магниты

Постоянный магнит — это изделие из материала, являющегося автономным (самостоятельным, изолированным) источником постоянного магнитного поля.

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. 3.31, б изображены дугообразный и полосовой магниты. На рис. 3.32, 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. 3.31, 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.

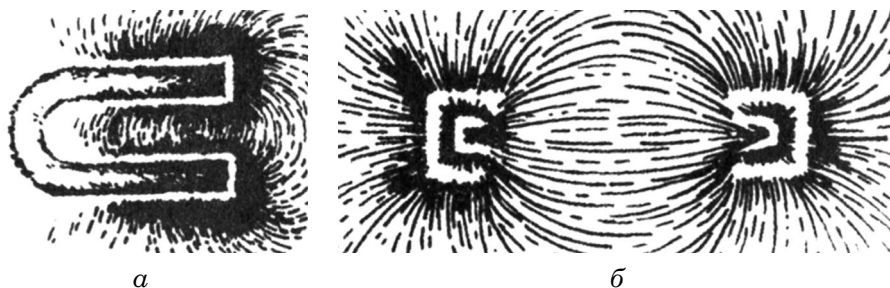


Рис. 3.32

На рис. 3.35 наглядно видно, что магнитные линии магнита — *замкнутые линии*. На рис. 3.33 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).

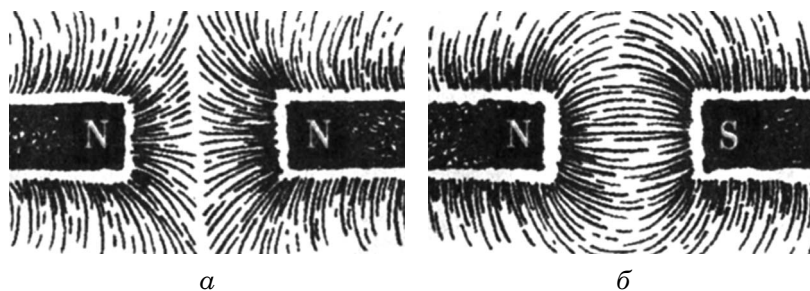


Рис. 3.33

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 северного

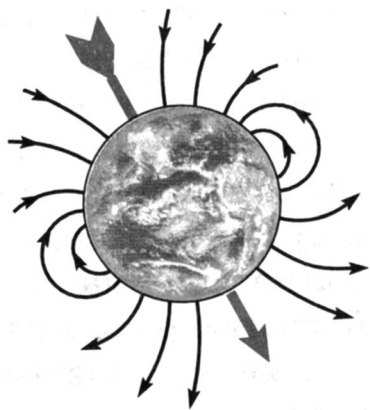


Рис. 3.34

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. 3.34).

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.

3.3.2. Опыт Эрстеда и Ампера. Индукция магнитного поля

В 1820 г. датский ученый Г. Х. Эрстед обнаружил, что магнитная стрелка, помещенная вблизи проводника, по которому течет ток, поворачивается, стремясь расположиться перпендикулярно к проводнику.

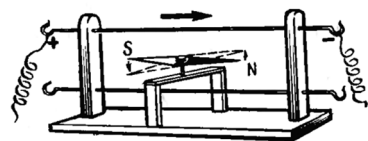


Рис. 3.35

Схема опыта Г. Х. Эрстеда изображена на рис. 3.35. Проводник, включенный в цепь источника тока, расположен над магнитной стрелкой параллельно ее оси. При замыкании цепи магнитная стрелка отклоняется от своего первоначального положения. При размыкании цепи магнитная стрелка возвращается в свое первоначальное положение. Отсюда следует, что проводник с током и магнитная стрелка взаимодействуют друг с другом. На основании

этого опыта можно сделать вывод о существовании магнитного поля, связанного с протеканием тока в проводнике и о вихревом характере этого поля. Описанный опыт и его результаты явились важнейшей научной заслугой Эрстеда.

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. 3.36, а), если в противоположные стороны (т. е. антипараллельны), то отталкиваются (рис. 3.36, 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.

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. 3.37). 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. 3.37, 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. 3.38).

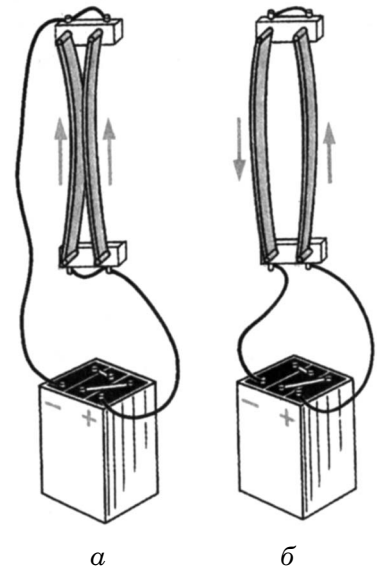


Рис. 3.36

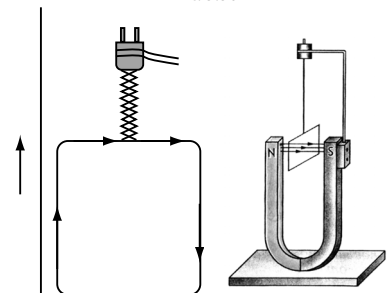


Рис. 3.37

Рис. 3.38

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. 3.39, а), или
- 2) направление положительной нормали к замкнутому контуру с током на гибком подвесе, свободно устанавливающемуся в магнитном поле. Положительной считается нормаль, направленная в сторону перемещения острия буравчика (с правой нарезкой), рукоятку которого вращают по направлению тока в рамке (рис. 3.39, б, в).

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*:

$$B = \frac{F}{I\Delta l}. \quad (3.48)$$

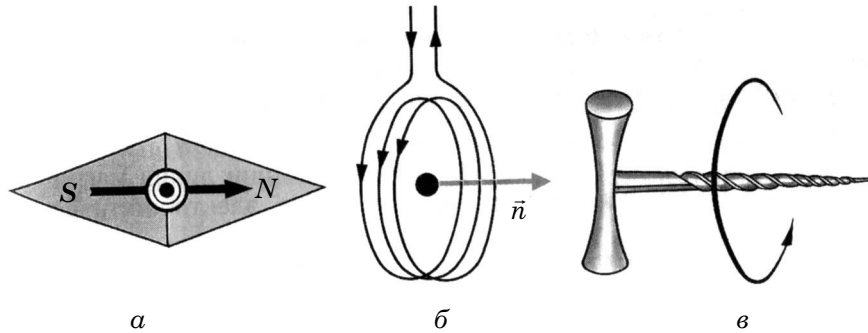


Рис. 3.39

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 сербского электро-техника Николы Теслы. Как видно из формулы, $1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}$.

Если имеется несколько различных источников магнитного поля, векторы индукции которых в данной точке пространства равны $\vec{B}_1, \vec{B}_2, \vec{B}_3, \dots$, то, согласно *принципу суперпозиции полей*, индукция магнитного поля в этой точке равна сумме векторов индукции магнитных полей, создаваемых *каждым* источником:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots$$

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. 3.40–3.43). На рис. 3.40 представлены линии магнитной индукции прямого тока, на рис. 3.41 — соленоида, на рис. 3.42 — кругового тока, на рис. 3.43 — прямого магнита.

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.

Если вместо железных опилок вокруг длинного прямолинейного проводника с током поместить маленькие магнитные стрелки, то можно увидеть не только конфигурацию силовых линий (концентрические окружности), но и направление силовых линий (как уже было сказано выше, северный полюс магнитной стрелки указывает направление вектора индукции в данной точке, рис. 3.44).

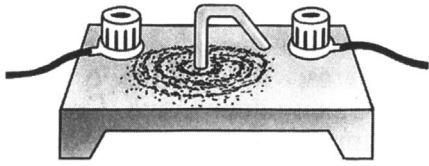


Рис. 3.40

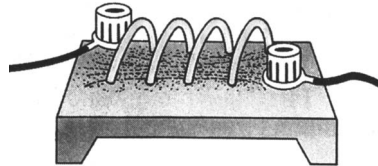


Рис. 3.41

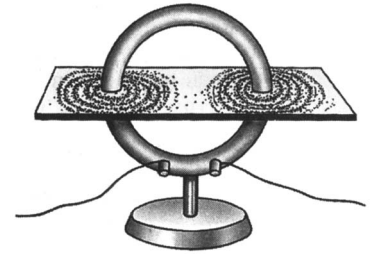


Рис. 3.42

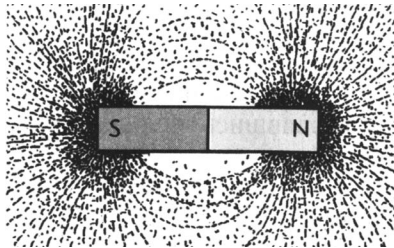
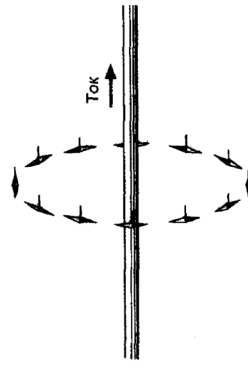
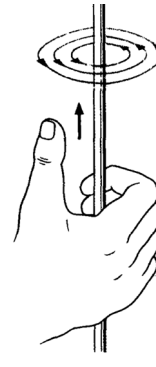


Рис. 3.43



3.44



3.45

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 (рис. 3.45).

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 проволоочная 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. 3.46, а. Направление этих линий определяют с помощью *второго правила правой руки*.

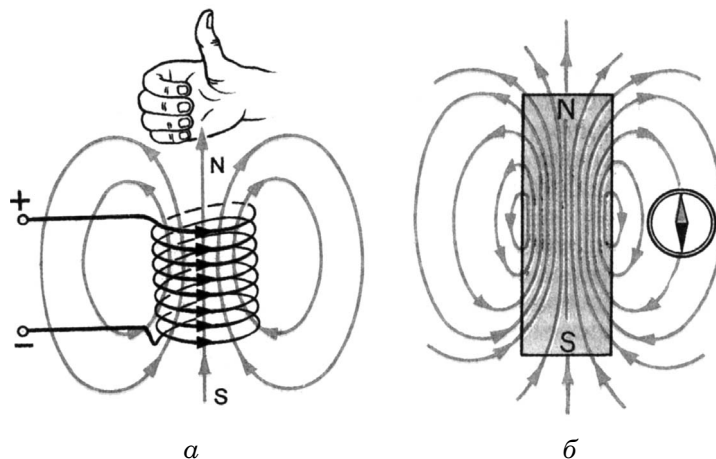


Рис. 3.46

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. 3.46, 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. Стердженем 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.

3.3.3. Сила 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:

$$F = B|I|\Delta l \sin \alpha, \quad (3.49)$$

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. 3.47). 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. 3.47). 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.

Следствием действия силы Ампера является вращение рамки с током в постоянном магнитном поле (рис. 3.48). 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.

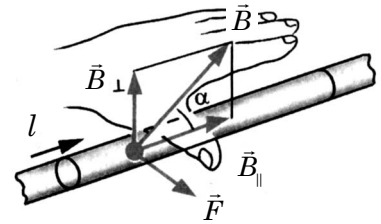


Рис. 3.47

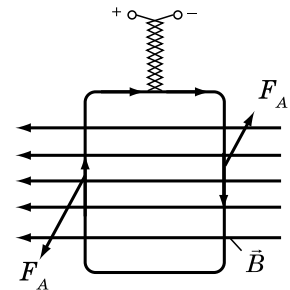


Рис. 3.48

3.3.4. 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. 3.49).

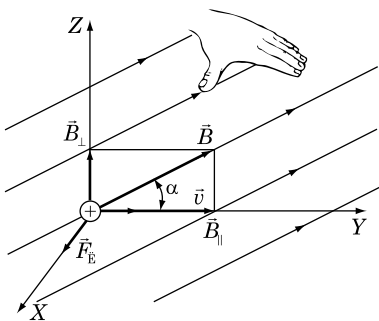


Рис. 3.49

Модуль силы Лоренца легко определяется из закона Ампера и составляет:

$$F = |q|vB \sin \alpha, \quad (3.50)$$

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:

$$\vec{F} = \vec{F}_{эл} + \vec{F}_Л. \quad (3.51)$$

Часто именно эту полную силу называют силой Лоренца, а силу, выраженную формулой (3.50), 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.

Такое искривление траектории электронов в кинескопе телевизора легко наблюдать, если поднести к его экрану постоянный магнит: изображение исказится.

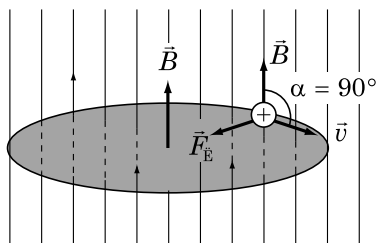


Рис. 3.50

Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле. Пусть заряженная частица влетает со скоростью v в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям напряженности (рис. 3.50). 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 (3.50):

$$\frac{mv^2}{r} = |q|vB. \quad (3.52)$$

Отсюда получим

$$r = \frac{mv}{|q|B}, \quad (3.53)$$

где m — масса частицы.

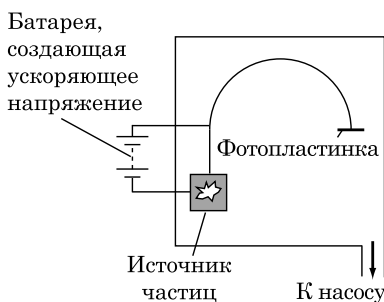


Рис. 3.51

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. 3.51).

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.

Магнитные свойства веществ

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. 3.52). На рис. 3.52, *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. 3.52, *б*) эти плоскости ориентированы одинаково, и их действия складываются.

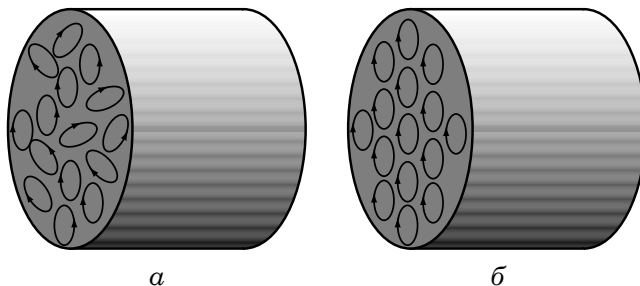


Рис. 3.52

Магнитная проницаемость. Реакция среды на воздействие внешнего магнитного поля с индукцией B_0 (поле в вакууме) определяется магнитной восприимчивостью μ :

$$\mu = \frac{B}{B_0}, \quad (3.54)$$

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.

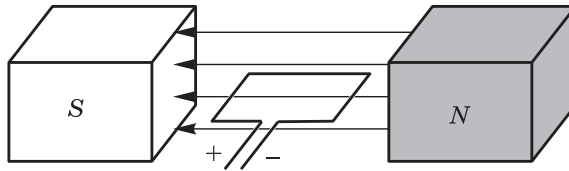
ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ 3.3 «МАГНИТНОЕ ПОЛЕ»

Ответами к заданиям 1–9 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

- 1** Северный магнитный полюс Земли находится вблизи: **Северного географического полюса, Южного географического полюса, экватора?** Ответ запишите словом (словами).

Ответ: _____ .

- 2** Будет ли поворачиваться рамка с током, изображенная на рисунке, и если да, то как? Выберите **два** верных утверждения.



- | | |
|------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1) по часовой стрелке на 90° | 4) по часовой стрелке на 45° |
| 2) не будет поворачиваться | 5) будет поворачиваться |
| 3) против часовой стрелки, на 90° | |

Ответ:

--	--

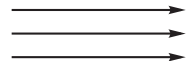
- 3** Протон и α -частица влетают в однородное магнитное поле. Скорость обеих частиц направлена перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Каково отношение периода обращения протона к периоду обращения α -частицы?

Ответ: _____ .

- 4** К горизонтальному пучку положительных ионов сверху подносят магнит (см. рисунок). В какую сторону отклонится пучок: **вверх, вниз, от читателя, к читателю?** Ответ запишите словом (словами).



Ответ: _____ .



- 5** 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.

Ответ: _____ Н.

- 6** Определите силу тока в проводе, если на участок этого провода длиной 20 см действует однородное магнитное поле с силой 0,5 Н, магнитная индукция которого равна 1 Тл. При этом угол между направлением линий магнитной индукции и тока равен 30° .

Ответ: _____ А.

7

Протон в магнитном поле с индукцией 0,01 Тл описывает окружность радиусом 10 см. Какова скорость протона?

Ответ: _____ м/с.

8

Магнитный поток внутри контура с площадью поперечного сечения 30 см² равен 0,15 Вб. Определите индукцию поля внутри контура, считая поле однородным.

Ответ: _____ Тл.

9

На рисунках *a* и *б* показаны параллельные (направленные в одну сторону) и антипараллельные (направленные в противоположные стороны) токи (вид сверху). Как будут себя вести проводники с токами?



Для каждой пары токов определите соответствующий характер поведения:

1) притягиваться 2) отталкиваться 3) не будут взаимодействовать

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Параллельные токи	Антипараллельные токи

3.4. Электромагнитная индукция

3.4.1. Магнитный поток

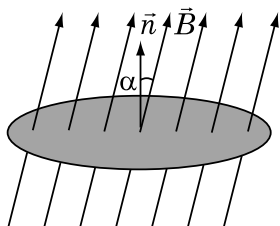


Рис. 3.53

Под магнитным потоком понимают поток Φ вектора магнитной индукции \vec{B} через какую-либо поверхность S .

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. 3.53).

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (3.55)$$

Произведение $B \cos \alpha = B_n$ является проекцией вектора магнитной индукции на нормаль к плоскости контура, поэтому

$$\Phi = B_n S. \quad (3.56)$$

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 м², 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. 3.54 а, б);

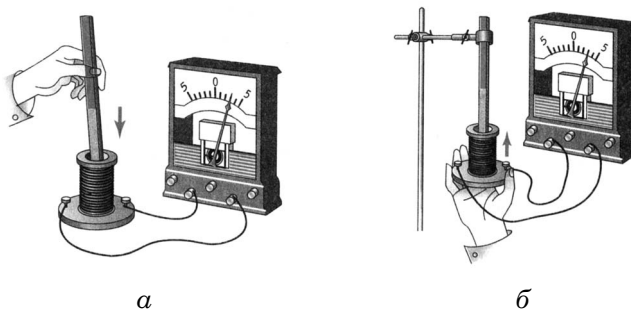


Рис. 3.54

2) при изменении индукции магнитного поля в контуре, расположенном перпендикулярно линиям магнитного поля (рис. 3.55). На этом рисунке катушка А, включенная в цепь источника тока, вставлена в другую катушку С, подключенную к гальванометру. При замыкании и размыкании цепи катушки А в катушке С возникает индукционный ток. Индукционный ток возникает также при изменении тока в катушке С или при движении катушек друг относительно друга;

- 3) при изменении положения контура, расположенного в постоянном магнитном поле (рис. 3.56). Ток в контуре появляется как при вращении контура в поле постоянного магнита (рис. 3.56, а), так и при вращении самого магнита внутри контура (рис. 3.56, б).

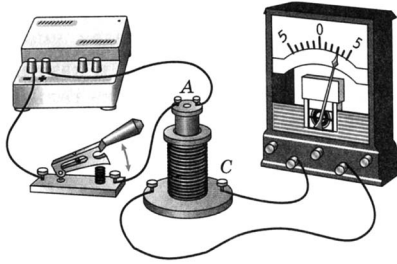
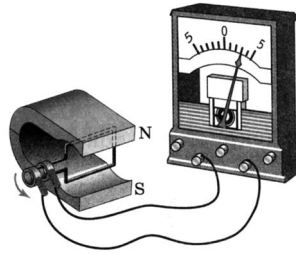
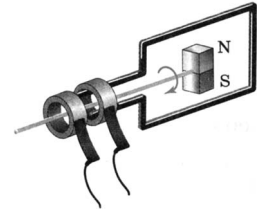


Рис. 3.55



а



б

Рис. 3.56

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. Закон электромагнитной индукции Фарадея

М. Фарадеем было установлено, что *сила индукционного тока пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром*:

$$I_i \sim \Delta\Phi / \Delta t. \quad (3.57)$$

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 ε_i , которую называют ЭДС индукции. Согласно закону Ома для замкнутой цепи, $I_i = \frac{\varepsilon_i}{R}$.

Следовательно, ЭДС индукции пропорциональна $\Delta\Phi / \Delta t$, поскольку сопротивление R не зависит от изменения магнитного потока.

Закон электромагнитной индукции формулируется так:

ЭДС индукции ε_i в замкнутом контуре равна по модулю скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:

$$\varepsilon_i = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|. \quad (3.58)$$

Применение правила Ленца к замкнутому контуру с положительной нормалью приводит к выражению:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (3.59)$$

Формула (3.59) выражает *основной закон электромагнитной индукции*. На рис. 3.57 внешнее магнитное поле индукции B возрастает со временем и направлено вдоль положительной нормали к контуру с током.

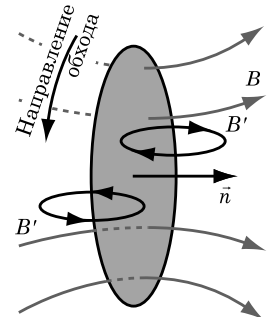


Рис. 3.57

Индукцированный 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 (3.59).

Вихревое электрическое поле

В первом типе электромагнитной индукции ЭДС возникает в неподвижном замкнутом проводнике при любом изменении магнитного поля.

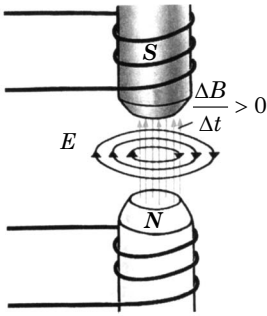


Рис. 3.58

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.

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. 3.58).
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.

3.4.4. 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:

$$\varepsilon_i = \frac{A}{|q|} = \frac{F_L l}{|q|} = \frac{|q| v B l \sin \alpha}{|q|} = v B l \sin \alpha, \quad (3.60)$$

где A — работа силы Лоренца по перемещению заряда q на пути l , F_L — сила Лоренца, действующая на движущийся заряд.

Если такой проводник входит в состав замкнутой цепи, остальные части которой неподвижны (рис. 3.59), то в цепи возникает электрический ток. Сила тока равна:

$$I = \frac{\varepsilon_i}{R + r} = \frac{v B l \sin \alpha}{R + r}, \quad (3.61)$$

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 (3.59) и формулу (3.56):

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{B S \sin \alpha}{\Delta t}.$$

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:

$$\varepsilon_i = v B l \sin \alpha. \quad (3.62)$$

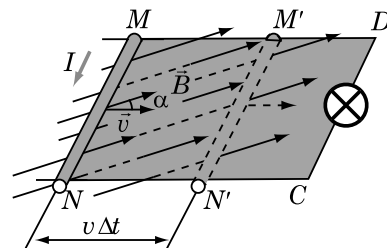


Рис. 3.59

3.4.5. 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 .

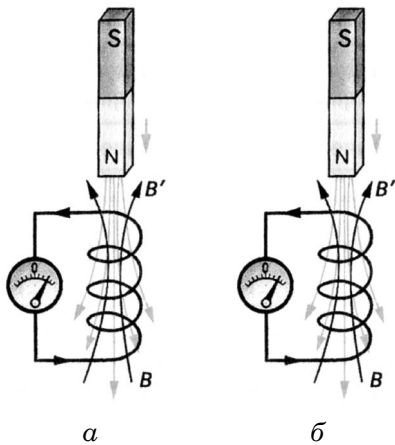


Рис. 3.60

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. 3.60, а, б. 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.

Для применения правила Ленца с целью определения направления индукционного тока I_e 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_e . 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_e , пользуясь *правилом буравчика*.

3.4.6. 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:

$$\varepsilon_{is} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (3.63)$$

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:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}, \quad (3.64)$$

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:

$$\frac{L}{L_0} = \mu, \quad (3.65)$$

где L_0 — индуктивность контура в вакууме, L — индуктивность контура в однородном веществе, заполняющем магнитное поле.

Единицей индуктивности в СИ является *генри* (Гн): $1 \text{ Гн} = 1 \text{ В} \cdot \text{с/А}$.

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. 3.61 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. 3.62).

При размыкании ключа (рис. 3.63) 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.

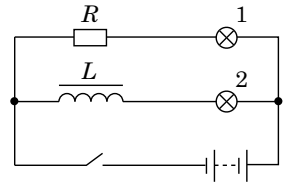


Рис. 3.61

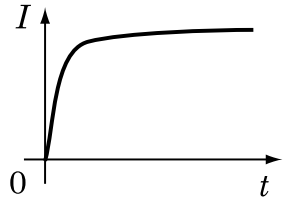


Рис. 3.62

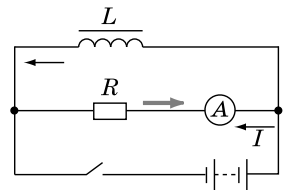


Рис. 3.63

3.4.7. 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 $\frac{mv^2}{2}$.

$$W_M = \frac{LI^2}{2}. \quad (3.66)$$

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»

Ответами к заданиям 1–10 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

1 Явление электромагнитной индукции **заключается** и **проявляется** в следующем:

- 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
- 5) в загорании лампочки, впаянной в проволочное кольцо, при надевании последнего на полосовой магнит

Выберите **два** правильных ответа из предложенного перечня.

Ответ:

--	--

2 В какой-то момент времени переменное внешнее магнитное поле \vec{B} приводит к **увеличению** магнитного потока в замкнутом контуре, находящемся в этом поле. Это изменение магнитного потока индуцирует электрический ток, который, согласно правилу Ленца, индуцирует магнитное поле \vec{B}_1 . Как направлено индуцированное поле \vec{B}_1 по отношению к внешнему полю \vec{B} : **противоположно, параллельно, перпендикулярно**? Ответ запишите словом.

Ответ: _____ .

3 В какой-то момент времени переменное внешнее магнитное поле \vec{B} приводит к **уменьшению** магнитного потока в замкнутом контуре, находящемся в этом поле. Это изменение магнитного потока индуцирует электрический ток, который, согласно правилу Ленца, индуцирует магнитное поле \vec{B}_1 . Как направлено индуцированное поле \vec{B}_1 по отношению к внешнему полю \vec{B} : **противоположно, параллельно, перпендикулярно**? Ответ запишите словом.

Ответ: _____ .

4 Какими формулами выражаются основной закон электромагнитной индукции и ЭДС самоиндукции? К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в **таблицу** выбранные цифры под соответствующими буквами.

ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ

- А) основной закон электромагнитной индукции
Б) ЭДС самоиндукции

ФОРМУЛЫ

- 1) $E_i = \frac{-\Delta\Phi}{\Delta t}$
- 2) $B = \frac{F}{I\Delta l}$
- 3) $F = qB \sin \alpha$
- 4) $\Phi = B_n S$
- 5) $\varepsilon_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$

Ответ:

А	Б

5 Магнитный поток через контур проводника сопротивлением $0,05 \text{ Ом}$ за 2 с равномерно изменился на $0,02 \text{ Вб}$. Определите силу тока в проводнике, возникшую вследствие этого.
 Ответ: _____ А.

6 При изменении силы тока в катушке от 0 до 5 А в течение 2 с в ней возникла ЭДС, равная 1 В . Чему равна индуктивность катушки?
 Ответ: _____ Гн.

7 Определите энергию магнитного поля соленоида, число витков которого равно 500 , площадь поперечного сечения 10 см^2 , а длина $0,2 \text{ м}$. Соленоид расположен в вакууме при токе $0,2 \text{ А}$.
 Ответ дайте в мкДж.
 Ответ: _____ мкДж.

8 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.
 Ответ: _____ В.

9 Изменяющееся во времени магнитное поле вызывает появление вихревого электрического поля, отличающегося от электростатического поля. Установите соответствие между типами полей и их свойствами. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

- А) вихревое электрическое поле
- Б) электростатическое поле

СВОЙСТВА ПОЛЕЙ

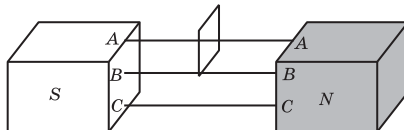
- 1) силовые линии поля начинаются и заканчиваются на неподвижных зарядах
- 2) поле связано исключительно с наличием проводников
- 3) силовые линии поля замкнуты

Ответ:

А	Б

Ответ: _____ см.

10 Небольшая проволочная прямоугольная рамка свободно падает в пространстве между широкими полюсами достаточно сильного электромагнита (см. рисунок). Как направлены индукционные токи, возникающие в рамке, если смотреть из северного полюса магнита на южный, когда ее середина пересекает линии А и В?



Для каждой линии определите соответствующее направление тока:

- 1) ток направлен по часовой стрелке
- 2) ток направлен против часовой стрелки
- 3) ток равен нулю

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой линии. Цифры в ответе могут повторяться.

Линия А	Линия В

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.

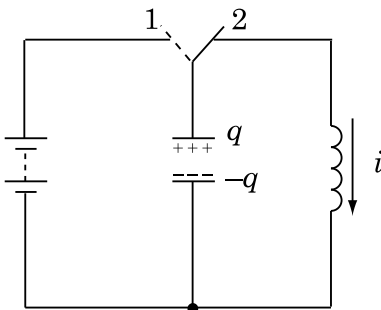


Рис. 3.64

Для возбуждения колебаний в контуре конденсатор предварительно заряжают от батареи аккумуляторов, сообщив ему энергию W_p , и переводят переключатель в положение 2 (рис. 3.64). 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. Полная энергия, в силу закона сохранения энергии, равна максимальной энергии электрического или магнитного поля:

$$W = \frac{LI^2}{2} + \frac{q^2}{2C} = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2}, \quad (3.67)$$

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. 3.65 иллюстрирует сказанное.

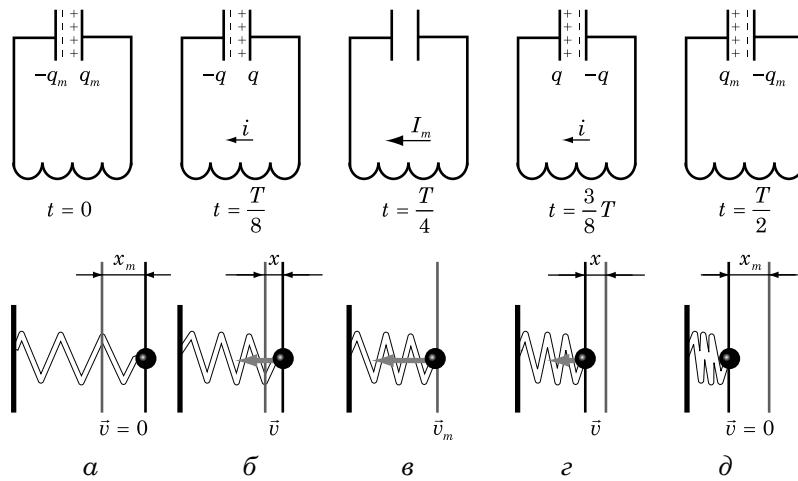


Рис. 3.65

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 Скорость v Масса m Жесткость пружины k Потенциальная энергия $kx^2/2$ Кинетическая энергия $mv^2/2$	Заряд q Сила тока i Индуктивность L Величина, обратная емкости $1/C$ Энергия электрического поля $q^2/(2C)$ Энергия магнитного поля $Li^2/2$

Дифференциальное уравнение, описывающее процессы в колебательном контуре, можно получить, приравняв производную по полной энергии контура (3.67) к нулю (поскольку полная энергия постоянна) и заменив в полученном уравнении ток на производную заряда по времени. В окончательном виде уравнение выглядит так:

$$q'' = -\frac{1}{LC}q. \quad (3.68)$$

Как видно, уравнение (3.68) ничем не отличается по форме от соответствующего дифференциального уравнения (1.137) для свободных механических колебаний шарика на пружине. Заменив механические параметры системы на электрические с помощью приведенной выше таблицы, мы в точности получим уравнение (3.68).

По аналогии с решением дифференциального уравнения для механической колебательной системы *циклическая частота свободных электрических колебаний* равна:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (3.69)$$

Период свободных колебаний в контуре равен:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (3.70)$$

Формула (3.70) 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 (1.139), (1.142):

$$q = q_m \cos \omega_0 t, \quad (3.71)$$

$$i = q' = -\omega_0 q_m \sin \omega_0 t = I_m \cos(\omega_0 t + \pi/2), \quad (3.72)$$

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. Закон сохранения энергии в колебательном контуре

Полную энергию W электромагнитного поля в колебательном контуре в случае отсутствия сопротивления ($R = 0$) можно представить в параметрах цепи колебательного контура L , C , I , U . Для этого,

воспользовавшись уравнением (3.15), произведем в (3.67) замену выражения $\frac{q^2}{2C}$ на $\frac{CU^2}{2}$. Тогда закон сохранения энергии в колебательном контуре примет вид:

$$\frac{LI^2}{2} + \frac{CU^2}{2} = \frac{CU_{\max}^2}{2} = \frac{LI_{\max}^2}{2} = \text{const}. \quad (3.73)$$

3.5.3. Вынужденные электромагнитные колебания. Резонанс

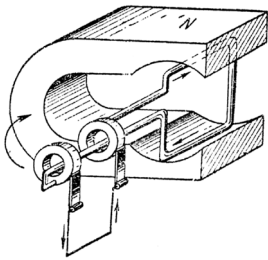


Рис. 3.66

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 проволочной рамке из нескольких витков, вращающейся в поле постоянного магнита (рис. 3.66). 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.

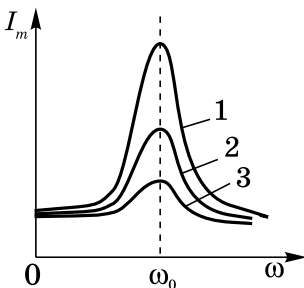


Рис. 3.67

Отличительной особенностью вынужденных колебаний является зависимость их амплитуды от частоты изменения внешней силы.

Явление резонанса заключается в том, что амплитуда установившихся вынужденных колебаний достигает наибольшего значения, когда частота вынуждающей силы равна собственной частоте колебательной системы.

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 (см. рис. 1.63). Сила тока при вынужденных колебаниях в контуре достигнет максимального значения, когда частота вынуждающих колебаний ω (частота

приложенного к контуру переменного напряжения) сравнивается с собственной частотой электрического колебательного контура ω_0 :

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (3.74)$$

Амплитуда установившихся колебаний силы тока при резонансе равна:

$$I_m = \frac{U_m}{R}. \quad (3.75)$$

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. 3.67. 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

$$U_{C,m} = U_{L,m} = I_m \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (3.76)$$

а внешнее напряжение связано с резонансным током соотношением $U_m = I_m R$, то при $R \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$ получим:

$$U_{Cm} = U_{Lm} \gg U_m.$$

3.5.4. 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

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 проволочная рамка, вращающаяся в однородном магнитном поле (рис. 3.68). Поток магнитной индукции Φ , пронизывающий проволочную 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 $\omega = 2\pi n$:

$$\Phi = BS \cos \omega t. \quad (3.77)$$

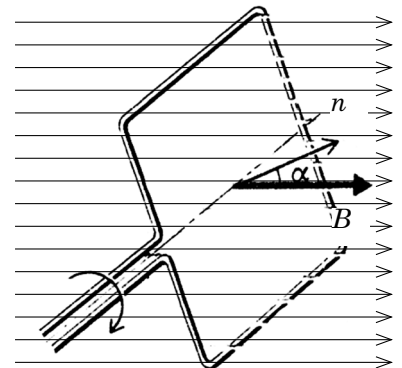


Рис. 3.68

Согласно закону электромагнитной индукции, ЭДС индукции в рамке равна:

$$e = -\Phi' = -BS(\cos \omega t)' = \varepsilon_m \sin \omega t, \quad (3.78)$$

где $\varepsilon_m = BS\omega$ — амплитуда ЭДС индукции.

Таким образом, напряжение в сети переменного тока изменяется по синусоидальному (или косинусоидальному) закону:

$$u = U_m \sin \omega t \text{ (или } u = U_m \cos \omega t), \quad (3.79)$$

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.

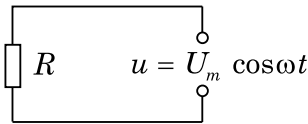


Рис. 3.69

Сила тока в цепи переменного тока с резистором. Если электрическая цепь состоит из активного сопротивления R и проводов с пренебрежимо малой индуктивностью (рис. 3.69), 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:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \cos \omega t}{R} = I_m \cos \omega t. \quad (3.80)$$

В проводнике с активным сопротивлением колебания силы тока по фазе совпадают с колебаниями напряжения (рис. 3.70), а амплитуда силы тока определяется равенством:

$$I_m = \frac{U_m}{R}. \quad (3.81)$$

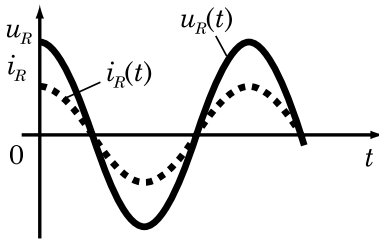


Рис. 3.70

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:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,71 I_m. \quad (3.82)$$

Действующее значение напряжения определяется аналогично:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,71 U_m. \quad (3.83)$$

Мощность, определяемая с использованием действующих значений силы тока и напряжения $P = IU$, равна средней мощности переменного тока при совпадении фаз колебаний тока и напряжения:

$$\bar{P} = \frac{I_m U_m}{2}. \quad (3.84)$$

Последнюю определяют усреднением мгновенной мощности за период колебаний:

$$\overline{p} = \overline{i u} = I_m U_m \overline{\cos^2(\omega t)}.$$

Емкостное сопротивление

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. 3.71). Напряжение на обкладках конденсатора $u = \varphi_1 - \varphi_2 = q/C$ равно напряжению на входе цепи, поэтому

$$q = C U_m \cos \omega t. \quad (3.85)$$

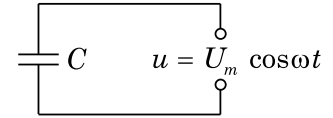


Рис. 3.71

Для силы тока, которая определяется как производная заряда q по времени, из (3.85) получим:

$$i = C \omega U_m \cos(\omega t + \pi/2). \quad (3.86)$$

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. 3.72).

Амплитуда силы тока равна

$$I_m = U_m C \omega. \quad (3.87)$$

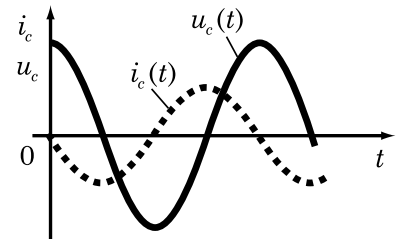


Рис. 3.72

Величина

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (3.88)$$

называется *емкостным сопротивлением*. Если вместо амплитуд силы тока и напряжения в (3.87) использовать их действующие значения, то, учитывая (3.88), получим:

$$I = \frac{U}{X_C}. \quad (3.89)$$

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.

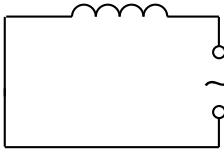


Рис. 3.73

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. 3.73). ЭДС самоиндукции катушки e_i равна по величине и противоположна по направлению напряжению u на ее концах, взятому с обратным знаком:

$$e_i = -Li' = -L \omega I_m \cos \omega t. \quad (3.90)$$

Учитывая, что $u = -e_i$, из данного равенства получим:

$$u = U_m \sin(\omega t + \pi/2), \quad (3.91)$$

где $U_m = L \omega I_m$ — амплитуда напряжения.

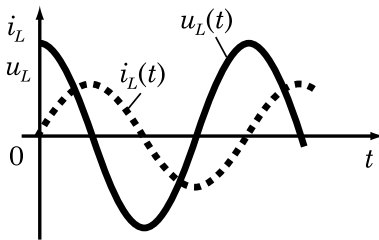


Рис. 3.74

Следовательно, колебания напряжения на катушке опережают колебания силы тока на $\pi/2$ (рис. 3.74). 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:

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}. \quad (3.92)$$

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:

$$I = \frac{U}{X_L}. \quad (3.93)$$

Индуктивное сопротивление зависит от частоты. Чем больше частота, тем больше индуктивное сопротивление, тем меньше ток.

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. 3.75):

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.

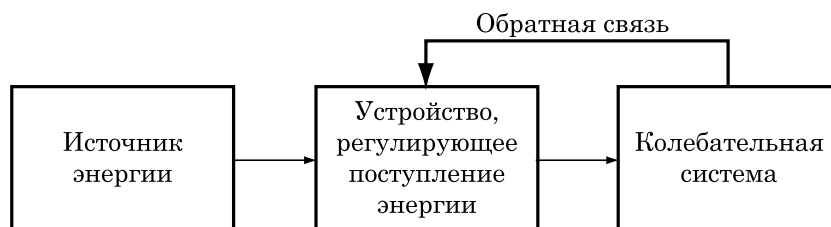


Рис. 3.75

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. 3.76).

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. 3.76, 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.

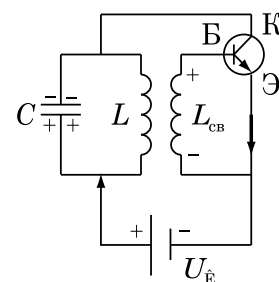


Рис. 3.76

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°C при давлении около 25 МПа. КПД ТЭС достигает 40 %. Превращения энергии показаны на рис. 3.77.

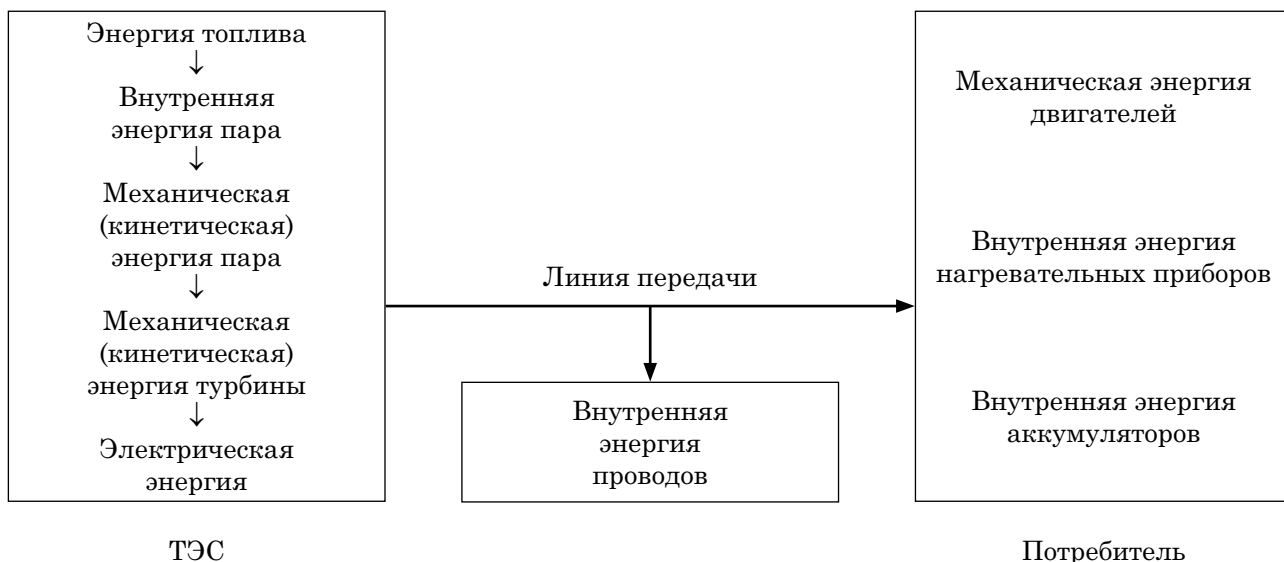


Рис. 3.77

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. 3.78. Мощность станции зависит от разности уровней воды, создаваемых плотиной (напора), и от массы воды, проходящей через турбину за секунду (расхода воды).

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



Рис. 3.78

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 нужно (низкого) напряжения на концах линии электропередачи ставят понижающие трансформаторы. Понижение напряжения обычно осуществляется поэтапно (рис. 3.79).

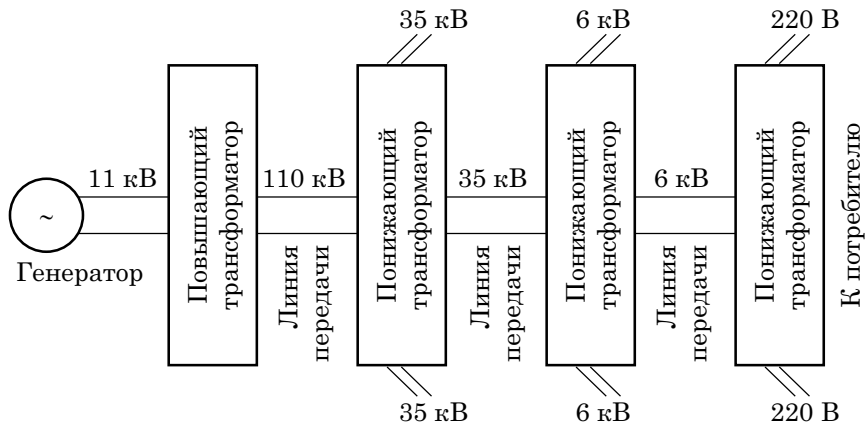


Рис. 3.79

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*:

$$k = \frac{n_1}{n_2}. \quad (3.94)$$

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:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{n_1}{n_2} = k. \quad (3.95)$$

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.

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;
- 4) переменное электрическое поле (переменный поток электрических силовых линий) создает переменное магнитное поле. Линии магнитной индукции этого поля охватывают линии напряженности электрического поля (рис. 3.80) аналогично случаю создания переменным магнитным полем вихревого электрического поля.

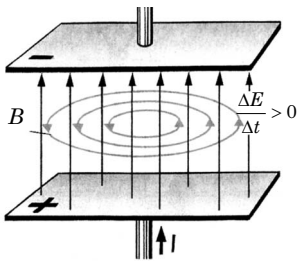


Рис. 3.80

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.

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. 3.81 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 волн: $\vec{E} \perp \vec{B} \perp \vec{v}$, где \vec{v} — скорость волн.

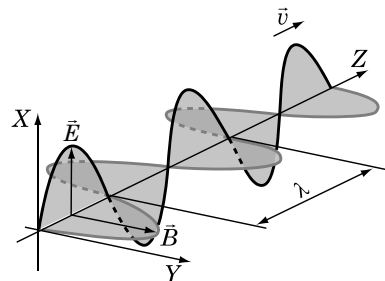


Рис. 3.81

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 (см. формулу (1.152)):

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

Скорость света в вакууме (или в воздухе, поскольку они мало отличаются друг от друга) принято обозначать буквой c , тогда:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}. \quad (3.96)$$

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*.

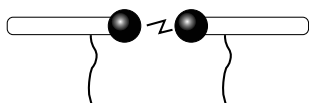


Рис. 3.82

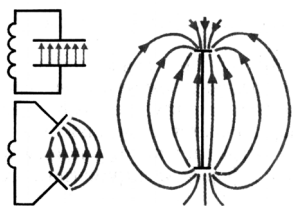


Рис. 3.83

Вибратор Герца — это металлическая антенна, имеющая форму штыва с утолщениями на концах и разрывом посередине для подключения источника (для работы в режиме излучения) или нагрузки (для работы в режиме приема) (рис. 3.81). 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. 3.83). Делается это для того, чтобы увеличить частоту свободных коле-

баний 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.

3.5.6. Шкала электромагнитных волн

Шкала электромагнитных волн с указанием длин волн и частот различных излучений изображена на рис. 3.84.

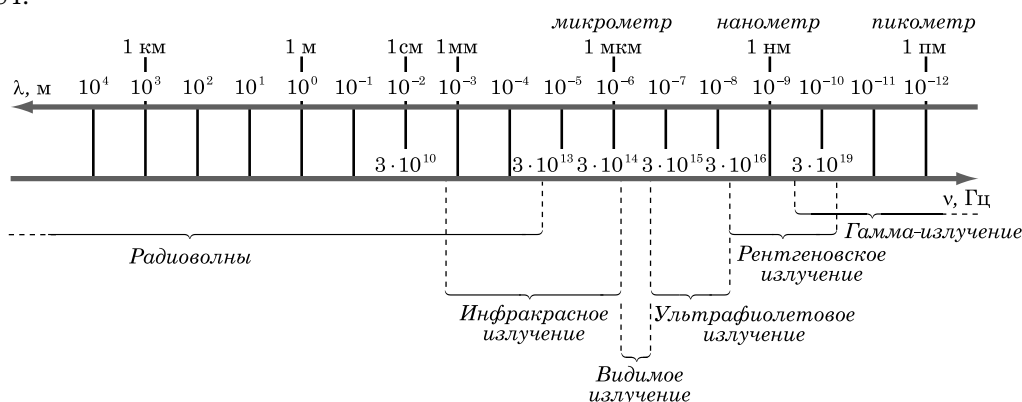


Рис. 3.84

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.

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 близкогодействия, а не дальнегодействия). 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:

$$I = \frac{\Delta W}{S \Delta t}. \quad (3.97)$$

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:

$$I = \frac{\Delta W}{S \Delta t} = \frac{\Delta W}{4\pi \Delta t} \cdot \frac{1}{R^2}. \quad (3.98)$$

Можно показать, что плотность потока излучения пропорциональна четвертой степени частоты:

$$I \sim \omega^4. \quad (3.99)$$

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 (3.99).

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 атомами 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 Х-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. 3.85 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.

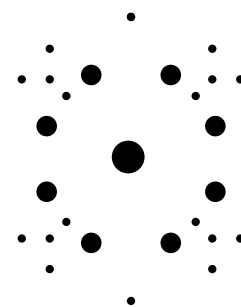


Рис. 3.85

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. 3.86). 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. 3.86).

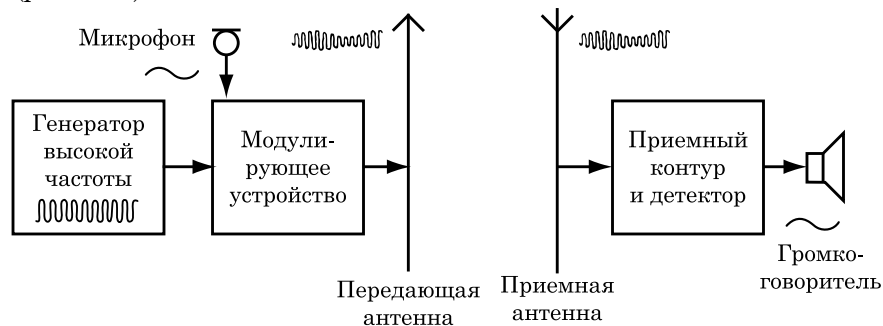


Рис. 3.86

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.

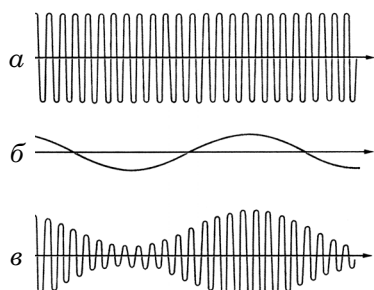


Рис. 3.87

На рис. 3.87 показаны: график колебаний высокой частоты — *несущей частоты* (рис. 3.87, а); график колебаний звуковой частоты — модулирующих колебаний (рис. 3.87, б); график модулированных по амплитуде колебаний (рис. 3.87, 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. 3.88). В результате амплитуда колебаний в колебательном контуре будет меняться в такт с изменениями анодного напряжения, что означает амплитудную модуляцию высокочастотных колебаний низкочастотным сигналом.

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. 3.89. Здесь детектирующим элементом служит полупроводниковый диод. Сигнал на входе имеет вид кривой, представленной на рис. 3.87, в. Диод пропускает пульсирующий ток одного направления, что соответствует верхней части кривой на рис. 3.87, в. Для сглаживания этого тока применяется конденсатор, являющийся простейшим *фильтром* (рис. 3.89). 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. 3.89). 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. 3.89). 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. 3.87, б).

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:

$$l = \frac{c\tau}{2}, \quad (3.100)$$

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».

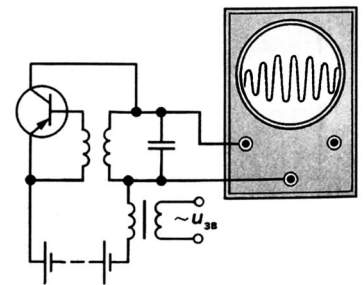


Рис. 3.88

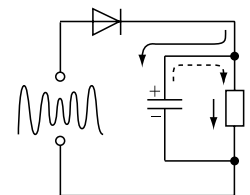
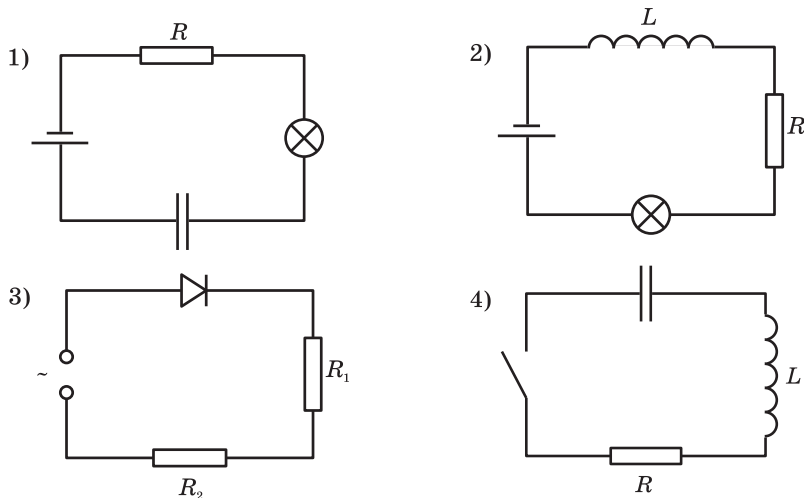


Рис. 3.89

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ 3.5 «ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ»

Ответами к заданиям 1–9 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

- 1** На каком из приведенных ниже рисунков изображен колебательный контур: **первом, втором, третьем, четвертом**? Ответ запишите словом.



Ответ: _____.

- 2** В электрическом колебательном контуре колеблющимися величинами являются

- | | |
|--------------------------|--------------------------------------------------|
| 1) заряд конденсатора | 4) сопротивление проводов |
| 2) индуктивность катушки | 5) полная энергия электромагнитного поля контура |
| 3) емкость конденсатора | 6) сила тока |

Выберите **два** правильных ответа из предложенного перечня.

Ответ:

- 3** Свободные колебания **определяются и проявляются** как

- 1) периодически изменяющиеся характеристики системы
- 2) колебания, совершаемые в электрическом колебательном контуре при $R = 0$
- 3) колебания ветвей деревьев на ветру
- 4) приливы и отливы рек и морей
- 5) колебания системы, совершающиеся только за счет первоначально сообщенной энергии при отсутствии внешних воздействий

Выберите **два** правильных ответа из предложенного перечня.

Ответ:

- 4** Как изменится период свободных колебаний в электрическом контуре, если пластины конденсатора раздвинуть: **уменьшится, увеличится, не изменится**? Ответ запишите словом (словами).

Ответ: _____.

- 5 Циклическая частота колебаний электрического контура при введении железного сердечника в катушку индуктивности: **уменьшится, увеличится, не изменится?** Ответ запишите словом (словами).

Ответ: _____ .

- 6 В цепи переменного тока между током и напряжением на активном сопротивлении **имеется** или **не имеется** сдвиг фаз? Ответ запишите словом (словами).

Ответ: _____ .

- 7 Емкостное сопротивление цепи переменного тока X_C после уменьшений емкости конденсатора в 2 раза и частоты генерируемого тока в 4 раза стало X_{C1} . Найдите отношение X_{C1} / X_C .

Ответ: _____ .

- 8 Как меняется резонансная частота колебаний и амплитуда тока на частоте резонанса электрического колебательного контура при увеличении активного сопротивления контура? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

1) увеличится 2) уменьшится 3) не изменится

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Резонансная частота	Амплитуда

- 9 Индуктивность электрического колебательного контура соответствует в механической колебательной системе: **координате, скорости, массе, жесткости?** Ответ запишите словом.

Ответ: _____ .

Ответами к заданиям 10–12 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

- 10 Сколько колебаний происходит в электромагнитной волне с длиной волны 30 м в течение одного периода звуковых колебаний с частотой 200 Гц?

Ответ: _____ .

- 11 Зная уравнение изменения со временем разности потенциалов на обкладках конденсатора $U = 50 \cos 10^4 \pi t$ В, найти длину волны, соответствующую этому контуру.

Ответ: _____ м.

- 12 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.

Ответ: _____ м.

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:

$$c'(\nu) = c/n(\nu). \quad (3.101)$$

Впервые скорость света определил датский ученый О. К. Рёмер по изменению промежутков времени между затемнениями спутников Юпитера (рис. 3.90). 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 велись 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.

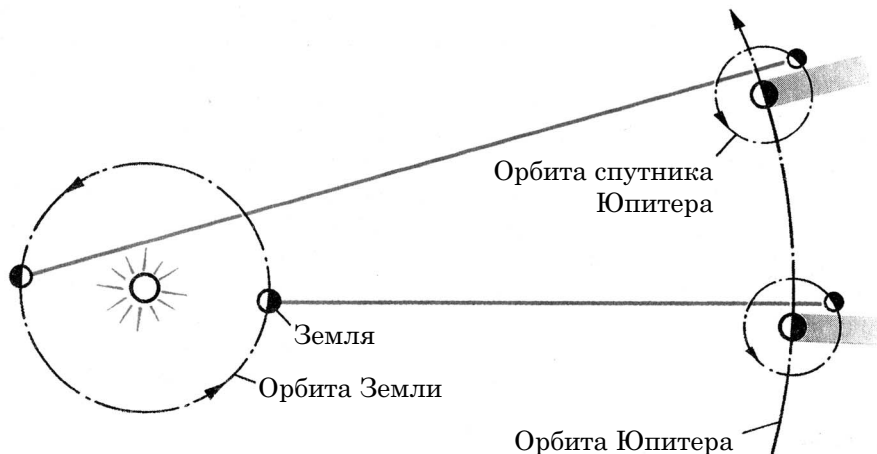


Рис. 3.90

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. 3.91). 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.

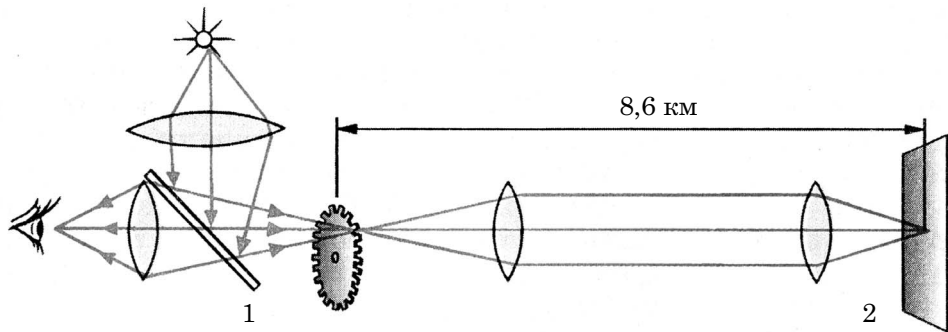


Рис. 3.91

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. 3.92, 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. 3.92, б). Тень (черный круг на рис. 3.92, б) образуется в том месте на экране Э, куда не доходят лучи ни от одной из точек источника. Полутень (серый круг на рис. 3.92, 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. 3.93).

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.

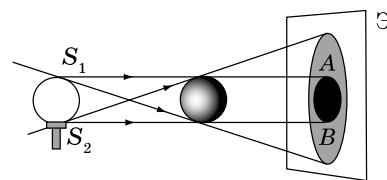
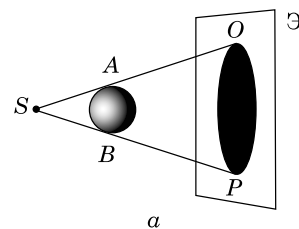


Рис. 3.92

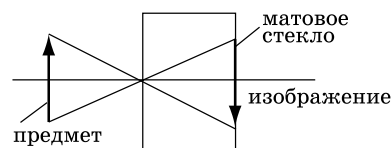


Рис. 3.93

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. 3.94). Этот принцип справедлив для распространения волн любой природы, хотя Гюйгенсом он был сформулирован именно для световых волн.

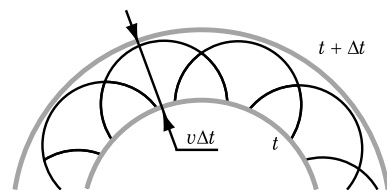


Рис. 3.94

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.

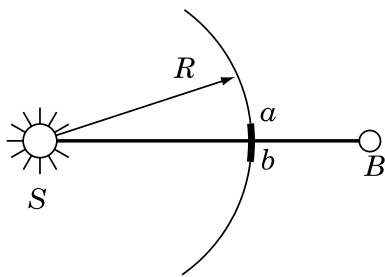


Рис. 3.95

Такого рода расчеты показали, что результат интерференции вторичных волн в точке B от источников, расположенных на сферической поверхности радиуса R (рис. 3.95), 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.

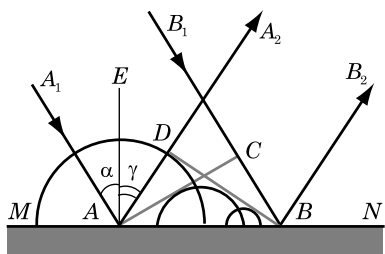


Рис. 3.96

Закон отражения света. Пусть на зеркальную поверхность MN (рис. 3.96) 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. 3.96 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.

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 $\Delta t = CB/v$ (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. 3.96. 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. 3.97). 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. 3.98): 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 так же поступают с точкой B . Затем соединяют точки A_1 и B_1 . Стрелка A_1B_1 и будет мнимым изображением стрелки AB .

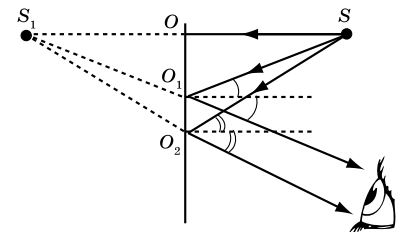


Рис. 3.97

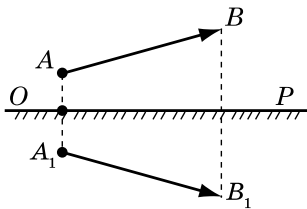


Рис. 3.98

3.6.4. Закон преломления света

Преломление света — это изменение направления распространения светового луча при его прохождении через границу раздела двух прозрачных сред.

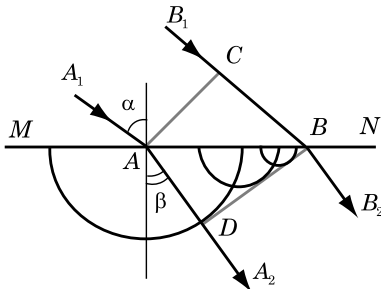


Рис. 3.99

На рис. 3.99 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:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n, \quad (3.102)$$

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 (3.102), 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. 3.99). 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,

$$CB = v_1 \Delta t = AB \sin \alpha. \quad (3.103)$$

Угол преломления β равен углу ABD треугольника ABD . Поэтому

$$AD = v_2 \Delta t = AB \sin \beta. \quad (3.104)$$

Разделив почленно (3.29) на (3.30), получим

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n, \quad (3.105)$$

где n — постоянная величина, не зависящая от угла падения.

Из построения (рис. 3.99) 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

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta, \quad (3.106)$$

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.

Изложенные выше закономерности поведения света на границе двух сред относятся к монохроматическому свету (свету одной определенной частоты, или одного цвета). Было установлено, что частота электромагнитных колебаний при прохождении волны из первой среды во вторую, остается неизменной: $\nu_1 = \nu_2$, а вот скорость распространения волны меняется, что и означает изменение показателя преломления (см. формулу (3.105)). В более плотных средах скорость света меньше, чем в менее плотных, а абсолютный показатель преломления — больше. Поскольку частота, скорость и длина волны связаны известным соотношением (1.152), то с учетом вышесказанного легко показать, что

$$n_1 \lambda_1 = n_2 \lambda_2. \quad (3.107)$$

где λ_1 и λ_2 — длины волн света в средах 1 и 2 соответственно.

Зависимость показателя преломления от цвета (длины волны) называется дисперсией. Подробнее о ней будет сказано далее.

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 $\sim 1,000292$. Поэтому показатели преломления различных веществ рассматривают относительно воздуха.

3.6.5. Полное внутреннее отражение

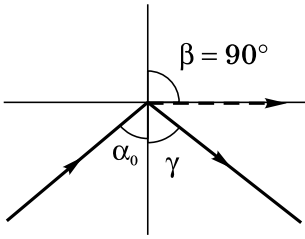


Рис. 3.100

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. 3.100). В соответствии с законом преломления света

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}; \alpha_0 = \arcsin\left(\frac{1}{n}\right), \quad (3.108)$$

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).



Рис. 3.101

Знание законов отражения и преломления света позволяет рассчитывать ход лучей в различных элементах оптических систем, например в призме. Призма представляет собой три плоскости, пересекающие друг друга под разными углами так, что линии их пересечения взаимно параллельны. На рис. 3.101 изображено сечение стеклянной призмы плоскостью, перпендикулярной к ее боковым ребрам.

Рассмотрим ход лучей в призме. Угол между гранями призмы, через которые проходит луч света, угол γ на нашем рисунке, называется *преломляющим*. Углом отклонения θ призмы называют угол, образованный пересечением продолжения луча, падающего на призму, с лучом, вышедшим из призмы.

Вычислим угол θ . Для этого запишем сумму углов $\triangle DME$, выразив их через углы падения и преломления на входную и выходную грани призмы AB и BC (вспомним, что вертикальные углы при точках D и E равны между собой, а сумма смежных углов при точке M , как и сумма углов треугольника, равны 180°):

$$180^\circ - \theta + \alpha_1 - \beta_1 + \beta_2 - \alpha_2 = 180^\circ,$$

откуда следует:

$$\theta = \alpha_1 - \beta_1 + \beta_2 - \alpha_2.$$

Применив аналогичные рассуждения для $\triangle DBE$, находим выражение для угла γ :

$$\gamma = \alpha_2 + \beta_1.$$

В итоге получим:

$$\theta = \alpha_1 + \beta_2 - \gamma. \quad (3.109)$$

Из этого выражения видно, что угол отклонения призмы зависит от угла падения луча на призму α_1 , преломляющего угла призмы γ и коэффициента преломления n призмы, который неявным образом входит в выражение угла β_2 выхода луча из призмы. В рассматриваемой задаче заданными

параметрами являются углы падения луча на призму α_1 , преломляющий угол призмы γ и относительный показатель материала призмы

$$n = \frac{n_{\text{м.п.}}}{n_{\text{ос.}}}, \quad (3.110)$$

где $n_{\text{м.п.}}$ и $n_{\text{ос.}}$ — абсолютные показатели преломления материала призмы и окружающей среды соответственно, см. (3.105) и (3.106).

Чтобы ввести в выражение (3.109) n в явном виде и избавиться от угла β_2 , который не задан, необходимо воспользоваться законом преломления света (3.105) и произвести ряд тригонометрических преобразований, после чего уравнение (3.109) примет вид:

$$\theta = \alpha_1 - \gamma + \arcsin\left(\sin \gamma \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_1} - \sin \alpha_1 \cos \gamma\right).$$

Если углы γ и α_1 малы, то угол отклонения лучей от своего первоначального направления θ не зависит от угла падения и равен

$$\theta = \gamma(n - 1). \quad (3.111)$$

Если световые лучи падают на вторую грань призмы под углом большим предельного угла, величина которого определяется по формуле (3.108), то они полностью отразятся внутрь призмы и могут выйти через другую грань. Это используют для создания *поворотных и оборачивающих призм*, схема лучей в которых изображена на рис. 3.102. Поскольку предельный угол для разных сортов стекла составляет 35–40°, то удобно использовать призмы с прямым углом преломления, направляя лучи перпендикулярно к ее граням (рис. 3.102 а, б) или параллельно к ее основанию (рис. 3.102, в). Такие призмы применяют в биноклях, перископах и других оптических приборах.

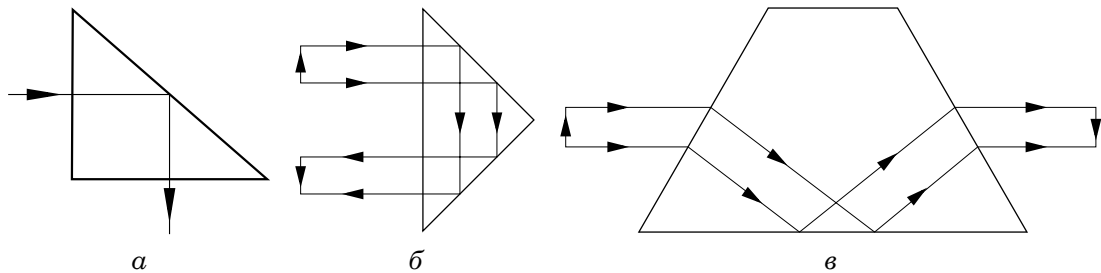


Рис. 3.102

Призма используется в спектральных приборах в качестве диспергирующей системы и для получения наиболее качественного спектра, ее необходимо устанавливать в параллельных лучах под таким углом падения α_1 , при котором угол отклонения θ минимален. Из полученных выше соотношений может быть выведена связь между $\theta_{\text{мин.}}$, α_1 , показателем преломления n и углом преломления призмы γ . Это позволяет рассчитывать и изготавливать призмы с необходимыми для решаемой задачи параметрами.

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 микрочастиц).

Линзы бывают *выпуклые* и *вогнутые*. У выпуклых линз середина толще, чем края, у вогнутых — наоборот. В свою очередь, выпуклые линзы делятся на двояковыпуклые, плосковыпуклые

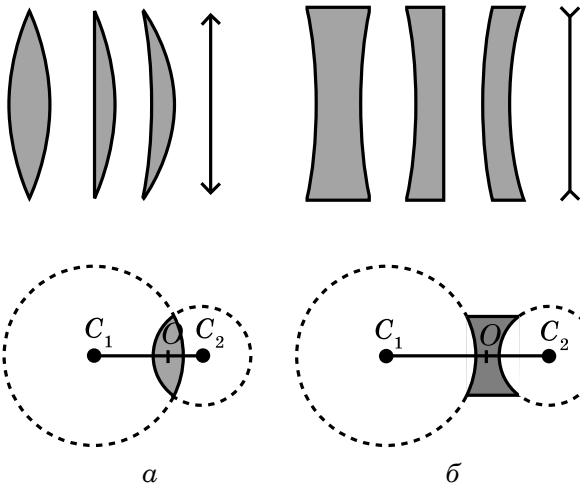


Рис. 3.103

Прямая C_1C_2 , проходящая через центры сферических поверхностей O (рис. 3.103), 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. 3.104, а). Поэтому 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.

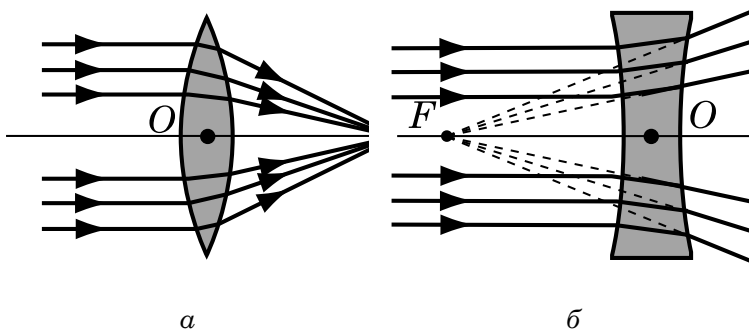


Рис. 3.104

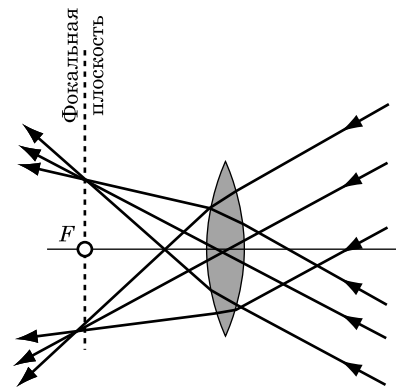


Рис. 3.105

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. 3.105).

Вогнутая (отрицательная, или рассеивающая) линза. Пучок света, направленный параллельно оптической оси вогнутой линзы, после преломления в ней расходится (рис. 3.104, 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

и вогнуто-выпуклые (рис. 3.103, а). Вогнутые линзы делятся на двояковогнутые, плосковогнутые и выпукло-вогнутые (рис. 3.103, б). На рисунках 3.103 а, б рядом с изображениями линз (справа) даны их условные обозначения на оптических схемах.

Тонкая линза. Если толщина линзы пренебрежимо мала по сравнению с радиусами кривизны ее поверхностей (см. нижние части рис. 3.103, 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.

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:

$$D = \frac{1}{F}. \quad (3.112)$$

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. 3.106), который после преломления пересекает оптическую ось в фокусе линзы F ; 2) луч, проходящий через оптический центр линзы, который не меняет своего направления (на рис. 3.106 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. 3.106).

Для построения изображения точки S , находящейся на главной оптической оси (рис. 3.107), 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.

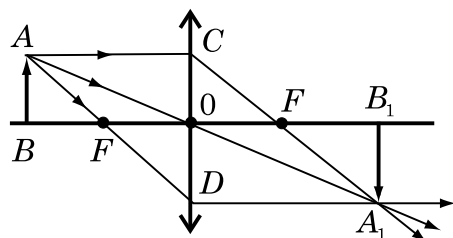


Рис. 3.106

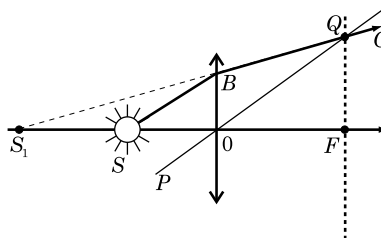


Рис. 3.107

Рассеивающая линза

Построение изображения в рассеивающей линзе показано на рис. 3.108. 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.

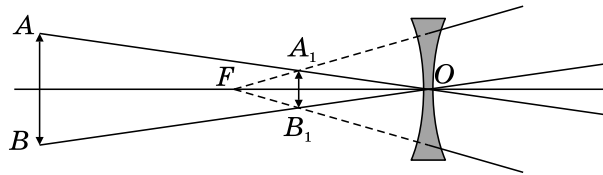


Рис. 3.108

3.6.8. Формула тонкой линзы

Используя законы геометрии, в частности, подобие треугольников (рис. 3.106), можно вывести формулу, связывающую расстояние d от предмета до линзы, расстояние d_1 от изображения до линзы и фокусное расстояние линзы f :

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d_1} = \frac{1}{f} \quad (3.113)$$

или

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d_1} = D. \quad (3.114)$$

Уравнения (3.113) и (3.114) 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 (3.113) и (3.114) 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.

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. 3.106, увеличение линзы равно отношению расстояния от изображения до линзы к расстоянию от линзы до предмета:

$$\Gamma = \frac{|d_1|}{|d|}. \quad (3.115)$$

Линзы являются основной частью фотоаппарата, проекционного аппарата, микроскопа и телескопа. В глазу есть своя линза — хрусталик.

3.6.9. Фотоаппарат как оптический прибор. Глаз как оптическая система

Оптическая схема фотоаппарата, широко применяемого в быту достаточно проста (рис. 3.109). На светочувствительный материал (фотопленка, матрица, и т. п.), расположенный в задней части светонепроницаемой камеры, с помощью объектива проектируется *действительное, уменьшенное, перевернутое изображение* фотографируемых предметов. Для получения качественных изображений предметов, расположенных на разных расстояниях от камеры, предусмотрена возможность передвижения объектива относительно задней части камеры. Кроме того, за объективом установлена диафрагма, которая дает возможность ограничивать диаметр действующей части объектива, что увеличивает резкость изображения (увеличивается «глубина резкости»). Качество фотографии сильно зависит от объектива. Обычно объектив представляет собой сложную конструкцию из многих линз (рис. 3.110). Основные параметры фотообъектива — это фокусное расстояние и светосила. *Светосила* объектива определяется квадратом отношения диаметра максимальной

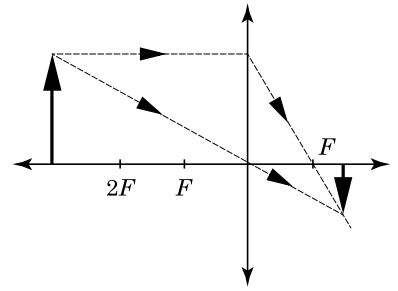


Рис. 3.109

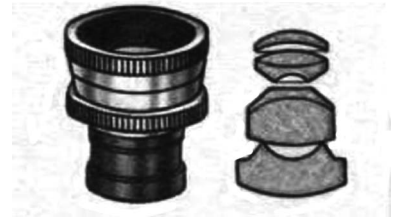


Рис. 3.110

диафрагмы D к фокусному расстоянию f : $\delta = \frac{D^2}{f^2}$. *Светосила* линзы (объектива) характеризует освещенность изображения, которую обеспечивает данный объектив. На фотоаппаратах вместо светосилы указывают величину *относительного отверстия* линзы, которое равно $\frac{D}{f}$. Обычно на объективе относительное отверстие дается в виде дроби $\frac{1}{\alpha}$, где $\alpha = \frac{f}{D}$.

Глаз как оптическая система

Человеческий глаз представляет собой оптическую систему, подобную фотоаппарату (рис. 3.111). Как и в фотоаппарате, изображение предметов, расположенных на расстояниях, много больших фокусного расстояния «объектива глаза», строится на задней стенке «камеры глаза» (т. е. изображение получается действительным, уменьшенным и перевернутым). В качестве объектива здесь выступают совокупность области A (водянистая жидкость, расположенная между роговицей и радужной оболочкой глаза i), хрусталик L и стекловидное тело Q . В качестве камеры можно рассматривать всю область, ограниченную защитной оболочкой — склерой (наружная оболочка на рис. 3.111. Светочувствительный материал глаза — это сетчатая оболочка (сетчатка) R , которая покрывает глазное дно. Роль диафрагмы, ограничивающей входящий световой пучок и изменяющей глубину фокусировки, принадлежит радужной оболочке глаза i (ирис). Она определяет «цвет глаза» и обладает отверстием переменной величины (зрачок глаза). В зависимости от интенсивности падающего света диаметр зрачка рефлекторно меняется приблизительно от 2 до 8 мм.

Чтобы человек мог четко видеть различно удаленные предметы, особая мышца меняет кривизну хрусталика, меняя фокусное расстояние глаза. Такая наводка на различно удаленные предметы называется аккомодацией глаза. Пределы расстояний, на которые возможна аккомодация, носят название дальней и ближней точек. Для нормального глаза дальняя точка аккомодации лежит на бесконечности, а ближняя — на расстоянии, зависящем от возраста (от 10 см для двадцатилетних до 22 см к сорока годам).

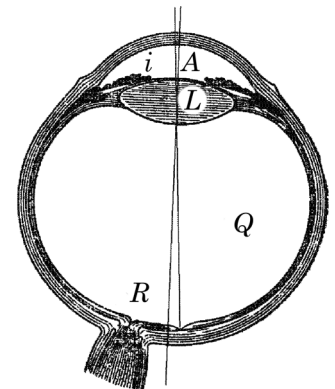


Рис. 3.111

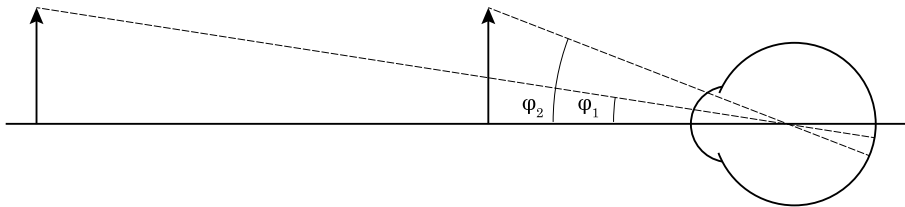


Рис. 3.112

С приближением предмета увеличивается угол зрения φ (рис. 3.112), под которым видны две близкие точки предмета. Когда этот угол становится таким, что изображения точек попадают на разные нервные окончания (колбочки) сетчатки, мы видим их раздельно. Этот минимальный угол зрения, необходимый для различения деталей, называется физиологическим предельным углом и для невооруженного глаза приблизительно равен одной минуте. Таким образом, участок предмета, изображение которого лежит внутри границ, определяемых структурой сетчатки, воспринимается как точка (так называемая физиологическая точка) и никакое распознавание деталей в пределах этого участка невозможно. Конечно, предельный угол зависит от освещенности предмета, значительно уменьшаясь при уменьшении освещенности.

Минимальное расстояние от предмета до глаза, на котором можно рассматривать детали предмета без большого напряжения глаза, называется расстоянием наилучшего зрения. Для нормального глаза оно составляет 25 см. При меньших расстояниях человек с нормальным зрением с трудом аккомодирует свой глаз.

Наибольшей чувствительностью глаз обладает в зеленой области видимого спектра. 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.

3.6.10. 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 являются 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, поляризациями 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. 3.113).

Солнечный свет падал на экран с узкой щелью. Световая волна, прошедшая через эту щель, падала на экран с двумя щелями такой же ширины, находящимися на расстоянии d порядка нескольких микрон (рис. 3.113, а). В результате деления фронта волны световые волны, идущие от щелей, были когерентными и создавали на экране устойчивую интерференционную картину. Ход лучей изображен

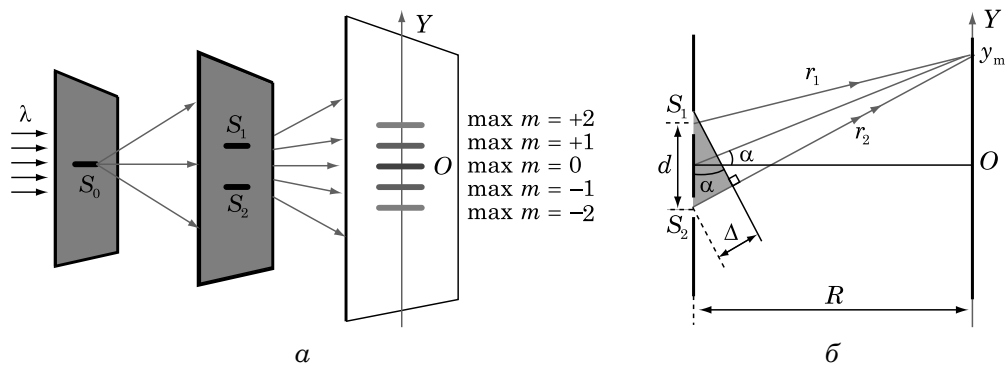


Рис. 3.113

на рис. 3.113, 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:

$$\Delta_{\max} = dy_m/R = m\lambda, \Delta_{\min} = (2m + 1)\lambda/2, \quad (3.116)$$

где $m = 0, \pm 1; \pm 2; \dots$; y_m — координата точки на экране, Δ — оптическая разность хода.

В свою очередь, Δ равно геометрической разности пути, умноженной на показатель преломления n :

$$\Delta = n(y_m S_1 - y_m S_2). \quad (3.117)$$

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:

$$\lambda = dy_m/(Rm), \quad (3.118)$$

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 (3.116), чем больше длина волны, тем дальше отстоит m -й максимум от центра.

3.6.11. 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 каплями 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.

Т. Юнг, открывший интерференцию света, в 1802 г. поставил классический опыт по дифракции (рис. 3.114). 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 — возникшая 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.

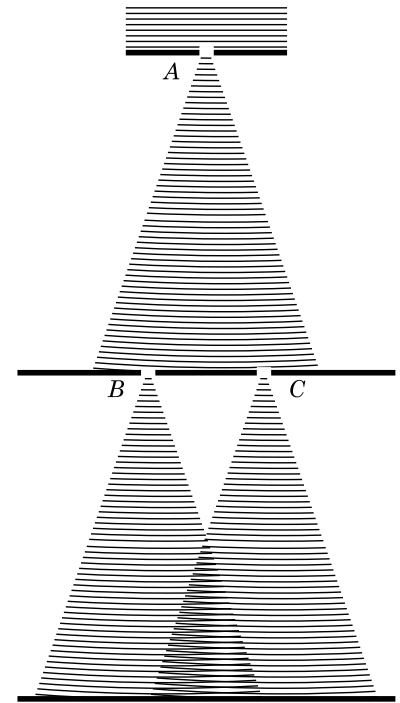


Рис. 3.114

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. 3.115, a — от тонкой проволоки, b — 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. 3.115, $в$ — 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.

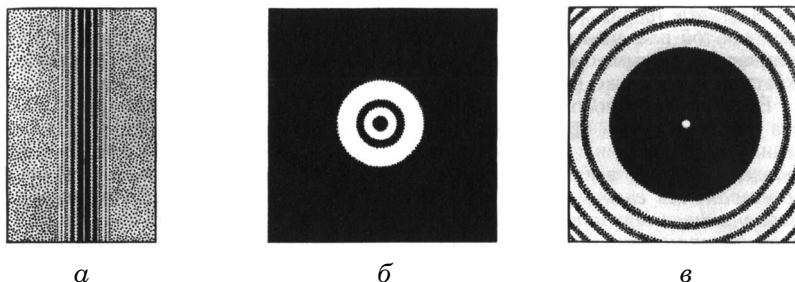


Рис. 3.115

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.

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. 3.116) 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*.

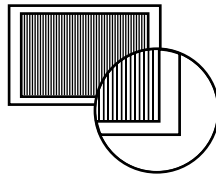


Рис. 3.116

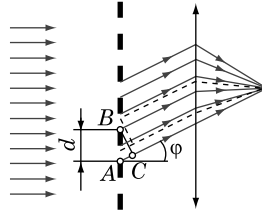


Рис. 3.117

Рассмотрим элементарную теорию дифракционной решетки. Если ширина прозрачных щелей равна a , а ширина непрозрачных промежутков — b , то величину $a + b$ называют *периодом решетки*.

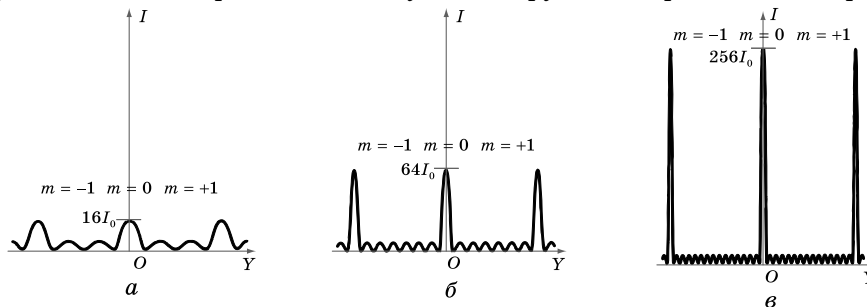
Пусть на решетку (рис. 3.117) падает плоская монохроматическая волна длиной λ . Вторичные источники в щелях создают световые волны, распространяющиеся по всем направлениям. Найдем условие, при котором волны, распространяющиеся от щелей в направлении, определяемом некоторым углом φ , усиливают друг друга. Разность хода между волнами от краев соседних щелей равна длине отрезка AC . Если на этом отрезке укладывается целое число длин волн, то волны от 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:

$$d \sin \varphi = m\lambda, \quad (3.119)$$

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



Интенсивность света за дифракционной решеткой:
а) четыре щели; б) восемь щелей; в) шестнадцать щелей

Рис. 118

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. 3.118). 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 ($\lambda < 10$ А) 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 ($\lambda > 2$ мм).

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

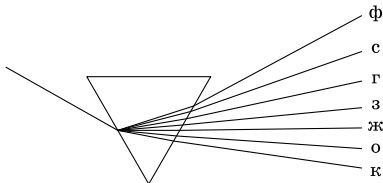
Дисперсией (от лат. *dispergo* — рассеивать, развеивать, разгонять) света называется зависимость показателя преломления света в веществе от частоты колебаний или длины волны.

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. 3.119). 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*.

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.



к — красный; **о** — оранжевый;
ж — желтый; **з** — зеленый;
г — голубой; **с** — синий;
ф — фиолетовый

Рис. 3.119

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ 3.6 «ОПТИКА»

Ответами к заданиям 1–6 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

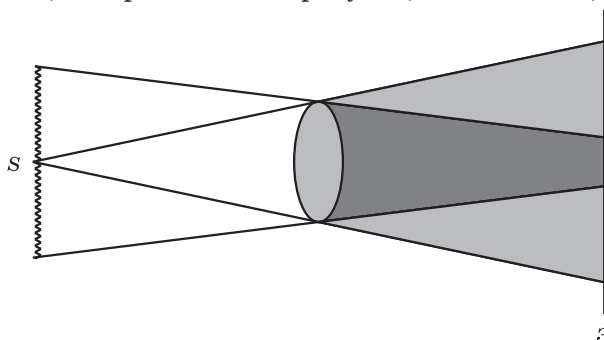
1 Каким является изображение, которое мы видим, разглядывая себя в обычном плоском зеркале?

- 1) действительным, увеличенным
- 2) обратным перевернутым, уменьшенным
- 3) прямым, увеличенным,
- 4) прямым, мнимым
- 5) с увеличением, равным единице

Выберите **два** правильных ответа из предложенного перечня.

Ответ: ☐ ☐

2 Образование полутени, изображенной на рисунке, является следствием



- 1) прямолинейности распространения света
- 2) дифракции света
- 3) протяженности источника света
- 4) преломления света

Выберите **два** правильных ответа из предложенного перечня.

Ответ: ☐ ☐

3 Для какой среды справедлив закон прямолинейного распространения света: **оптически однородной, оптически неоднородной**? Ответ запишите словами.

Ответ: _____ .

4 Что описывает и на какой идее основан основной постулат волновой теории — принцип Гюйгенса — Френеля?

- 1) основан на идее об интерференции волн от вторичных источников, расположенных на волновой поверхности источника света
- 2) идее о дифракции вторичных волн
- 3) идее рассеянии света на волновом фронте
- 4) описывает механизм прямолинейного распространения света
- 5) описывает дисперсию волн

Выберите **два** правильных ответа из предложенного перечня.

Ответ: ☐ ☐

5

Часто наблюдаемые на лужах цветные пятна тонких пленок, как правило, разлитого машинного масла, бензина, керосина являются результатом: **дифракции, интерференции, преломления, рассеяния** света на тонких пленках? Ответ запишите словом.

Ответ: _____ .

6

Глядя на Солнце через ресницы полузакрытых век, можно наблюдать радужную картинку. Она является результатом **дифракции, интерференции, преломления, рассеяния** света? Ответ запишите словом.

Ответ: _____ .

Ответами к заданиям 7–9 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

7

Какова скорость распространения света в стекле с показателем преломления $n = 1,7$?

Ответ: _____ м/с.

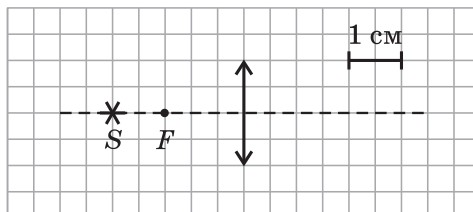
8

Определите период дифракционной решетки, если максимум первого порядка для длины волны 400 нм наблюдается под углом 30° . Ответ дайте в мкм.

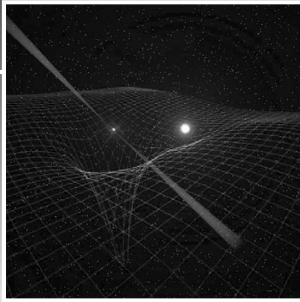
Ответ: _____ мкм.

9

Постройте изображение точки, лежащей на главной оптической оси собирающей линзы, определите расстояние от оси линзы до изображения. Расстояние выразите в см.



Ответ: _____ см.



Основы специальной теории относительности

4.1. Постулаты СТО и его следствия

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.

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 \bar{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 \bar{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.

4.2. Энергия и импульс свободной частицы

В первой (и основной) статье, посвященной СТО, А.Эйнштейн выводит выражение для кинетической энергии свободной частицы, движущейся со скоростью v :

$$E_K = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right). \quad (4.4)$$

Из этой формулы следует, что скорость частицы, превышающая или равная скорости света, недопустима, поскольку выражение для кинетической энергии теряет физический смысл ($E_k = \infty$ или становится мнимым).

В следующей работе по СТО «Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии?», рассматривая потерю энергии тела при излучении в неподвижной и движущейся с постоянной скоростью системах координат, Эйнштейн получает для разности кинетических энергий выражение, аналогичное (4.4), где вместо mc^2 стоит излученная энергия L , и приходит к выводу, что «если тело отдает энергию L в виде из-

лучения, то его масса уменьшается на $\frac{L}{V^2}$ ¹. При этом, очевидно, несущественно, что энергия, взятая у

тела, прямо переходит в лучистую энергию излучения, так что мы приходим к более общему выводу.

«Масса тела есть мера содержащейся в нем энергии...»,

и в следующей статье:

«...инерция тела зависит ... от содержащейся в нем энергии».

В этой работе впервые сформулирована связь между массой и энергией. В современных обозначениях это выглядит так:

$$E_0 = mc^2, \quad (4.5)$$

здесь E_0 — энергия покоящегося тела (энергия покоя), а масса — та же, что и в уравнениях Ньютона (в разных книгах и статьях ее называют также массой покоя).

Таким образом, *любое тело уже только благодаря факту своего существования обладает энергией, которая пропорциональна его массе m .*

К выводу этой знаменитой формулы, которая считается первой из двух великих формул физики (вторая — это формула Планка), Эйнштейн возвращается еще несколько раз.

В настоящее время широко известны экспериментальные доказательства справедливости формулы (4.5). К ним относятся превращения элементарных частиц с $m \neq 0$ в кинетическую энергию частиц с $m = 0$ (например, при аннигиляции электрона и позитрона в два фотона вся энергия покоя электрона и позитрона переходит в кинетическую энергию фотонов).

Далее, в последующих работах (рассматривая, в частности, динамику твердого тела), Эйнштейн выводит выражения для полной энергии и импульса свободной частицы. Энергия определяется формулой:

$$E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (4.6)$$

Она может быть получена из формул (4.4) и (4.5) с учетом того, что полная энергия свободной частицы в СТО равна сумме кинетической и энергии покоя: $E = E_0 + E_k$, а не сумме кинетической и потенциальной энергий, как в классической механике, поскольку в СТО предполагается отсутствие гравитационных полей (см. п. 4.1).

Импульс частицы в релятивистской динамике равен:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (4.7)$$

В двух последних формулах, как и во всех остальных уравнениях релятивистской механики, масса тела та же, что и в ньютоновой механике, а скорость не может превышать скорость света.

¹ V — скорость света в обозначениях Эйнштейна

4.3. Основные уравнения релятивистской механики. Связь массы и энергии

В результате дальнейшего развития теории относительности Эйнштейна его учениками и последователями основные уравнения релятивистской механики были получены в виде:

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4; \quad (4.8)$$

$$\vec{p} = \frac{\vec{v} E}{c^2}. \quad (4.9)$$

Первое из этих равенств можно получить, если возвести в квадрат обе части уравнений (4.6) и (4.7), кроме того, уравнение (4.7) умножить на c^2 . Затем из уравнения (4.6) вычесть (4.7). Второе равенство получается, если в формуле (4.7) выражение $\frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ из правой его части заменить на $\frac{E}{c^2}$, воспользо-

зовавшись выражением для энергии свободной частицы (4.6). Полученные соотношения описывают движение частиц во всем интервале скоростей $0 \leq v \leq c$ и не только частиц, с массой $m \neq 0$ (массовых частиц), но частиц, масса которых равна нулю: $m = 0$, как, например, фотон или нейтрино. Как видно из первого уравнения для безмассовых частиц, энергия и импульс связаны соотношением

$$E = pc. \quad (4.10)$$

Это же соотношение получается из второго равенства при $v = c$. Отсюда следует, что безмассовые частицы могут двигаться только со скоростью света и, наоборот, если частица обладает массой, ее скорость будет всегда меньше скорости света.

Подчеркнем еще раз, что масса, входящая во все уравнения релятивистской механики, та же, что и в ньютоновской механике. 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 на фотоны. Массу в СТО можно рассматривать как меру энергии свободной частицы, а законы сохранения энергии и импульса имеют место.

Вот что писал о связи массы и энергии Эйнштейн:

«...масса любого тела зависит от содержащегося в нем количества энергии. Если обозначить через m массу, соответствующую определенному количеству энергии, содержащемуся в теле, то, увеличив на W энергию тела, мы получим массу, равную

$$m = \frac{W}{c^2},$$

где через c обозначена, как всегда, скорость света в пустоте.

Итак, закон сохранения массы, принятый в механике Ньютона, справедлив только для системы, энергия которой постоянна. Масса и энергия становятся такими же эквивалентными друг другу величинами, как, например, теплота и механическая работа. Таким образом, мы вплотную подошли к тому, чтобы рассматривать массу как сосредоточение колоссального количества энергии.

В заключение отметим, что при скоростях много меньших скорости света, справедливы классические представления о пространстве и времени и законы механики Ньютона. Это проявление общего принципа закона соответствия физических теорий.

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМАМ 4.1–4.3 «ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ»

Ответами к заданиям 1–7 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

- 1** 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
 - 5) в отсутствии гравитационных полей
- Выберите **два** верных утверждения, касающихся СТО.

Ответ: ☐☐

- 2** Одним из выводов СТО является относительность расстояний, измеренных в двух системах отсчета, движущихся друг относительно друга с некоторой постоянной скоростью. Пусть с одной из этих систем (неподвижной) связано тело. В какой из систем (**неподвижной** или **движущейся** относительно тела) **длина тела будет больше?** Ответ запишите словом.

Ответ: _____ .

- 3** Следствием постулатов СТО является «относительность одновременности», означающая, что
- 1) промежуток времени между двумя событиями, отсчитываемый в разных инерциальных системах отсчета, не зависит от скорости движения систем координат
 - 2) длительность события оказывается наименьшей в неподвижной системе отсчета
 - 3) длительность события оказывается наибольшей в неподвижной системе отсчета
 - 4) чем больше относительная скорость движения двух систем, тем больше разница в длительности событий, измеренных в этих системах
- Выберите **два** верных утверждения из предложенного перечня.

Ответ: ☐☐

- 4** Формула Эйнштейна, первая из двух великих формул физики, устанавливает связь между скоростью света, массой тела и его **кинетической энергией, полной энергией** или **энергией покоя**? Ответ запишите словами.

Ответ: _____ .

- 5** Постулат СТО о постоянстве скорости света в вакууме — скорость света в вакууме одинакова во всех ИСО — в частности означает, что
- 1) скорость света во всех веществах одинакова
 - 2) скорость света не зависит от длины световой волны
 - 3) любые сигналы в природе распространяются со скоростями, не превышающими скорость света
 - 4) вместо мгновенного действия на расстоянии или дальнего действия с бесконечной скоростью распространения должно существовать дальнее действие со скоростью света
- Выберите **два** верных утверждения из предложенного перечня.

Ответ: ☐☐

- 6 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 v_k и релятивистской v_p формулам сложения скоростей: v_p / v_k ?

Ответ: _____ .

- 7 Самолет движется со скоростью v навстречу свету, излучаемому неподвижным источником. С какой скоростью v' сближается самолет с фотоном этого света: со скоростью **большой**, **меньшей** или **равной** скорости света? Ответ запишите словом.

Ответ: _____ .

Ответами к заданиям 8–12 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

- 8 При какой относительной скорости движения v/c размеры тела сокращаются на 10%?

Ответ: _____ .

- 9 Солнце ежеминутно излучает энергию, равную $6,5 \cdot 10^{21}$ кв·ч. Считая излучение Солнца постоянным, найдите, за какое время масса Солнца уменьшится в 2 раза.

Ответ: _____ лет.

- 10 При какой скорости полная энергия свободной частицы вдвое больше его энергии покоя?

Ответ: _____ м/с.

- 11 Во сколько раз увеличивается продолжительность существования нестабильной частицы по часам неподвижного наблюдателя, если она начинает двигаться со скоростью, составляющей 99 % скорости света?

Ответ: _____ .

- 12 Какую часть скорости света должна составлять скорость частицы, чтобы ее кинетическая энергия была равна энергии покоя? Ответ дайте «в единицах» c .

Ответ: _____ c .



5.1. Корпускулярно-волновой дуализм

5.1.1. 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:

$$E = h\nu, \quad (5.1)$$

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*.

5.1.2. Фотоны. Энергия и импульс фотона

Фотон (обозначение — γ) — элементарная частица, квант электромагнитного поля.

Развивая идею Планка об излучении электромагнитных волн квантами, А.Эйнштейн ввел гипотезу, согласно которой электромагнитное излучение само состоит из таких квантов, позднее названных *фотонами*.

Это свойство света было названо *корпускулярным*.

Масса покоя фотона равна нулю, следовательно, согласно СТО скорость его равна скорости света c , а энергия (см. формулы 4.10 и 5.1):

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = pc. \quad (5.2)$$

Из (5.2) находим выражение для импульса:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (5.3)$$

Импульс фотона направлен по световому лучу. Чем больше частота, тем больше энергия и импульс фотона и тем отчетливее выражены корпускулярные свойства света.

5.1.3. 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.

Опыты Столетова. Законы фотоэффекта

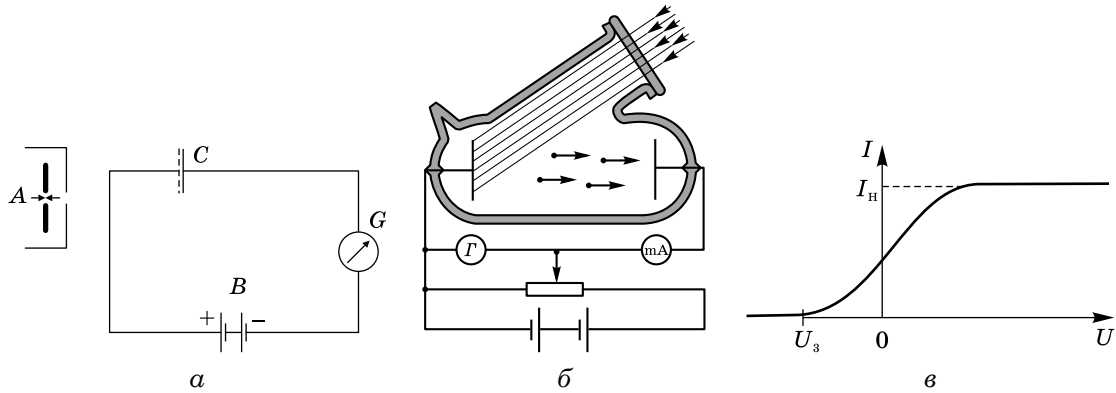


Рис. 5.1

Схема опытов и прибор Столетова по наблюдению фотоэффекта представлены на рис. 5.1, 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. 5.1, 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_s и определяется максимальной кинетической энергией вылетающих электронов: $mv^2/2 = eU_s$.

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 ν_{\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.

5.1.4. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

Объяснение фотоэффекта было дано в 1905 г. Эйнштейном, развившим идею Планка о прерывистом испускании света. 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:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}. \quad (5.4)$$

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 (5.4), если скорость электрона, покидающего металл, приравнять к нулю:

$$\nu_{\min} = \frac{A}{h}, \quad (5.5)$$

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:

$$\lambda_{\min} = \frac{ch}{A}. \quad (5.6)$$

При длинах волн, больших λ_{\min} , т. е. расположенных ближе к красным волнам, фотоэффект не наблюдается. Отсюда и название предельной длины волны λ_{\min} — красная граница фотоэффекта.

5.1.5. Корпускулярно-волновой дуализм. Волны де Бройля

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 результате 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 микрочастицы, 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

$$\lambda = h/p, \quad (5.7)$$

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.

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. 5.2, а). На экране высвечиваются четкие дифракционные кольца (рис. 5.2, б). На рис. 5.2, в представлена аналогичная фотография, полученная при облучении фольги рентгеновскими лучами. Вывод очевиден.

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.

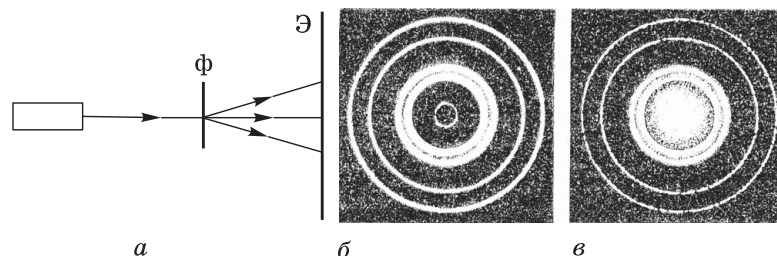


Рис. 5.2

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ 5.1 «КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ»

Ответами к заданиям 1–6 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

1 Выберите два правильных определения слова «фотон» в физике.

- 1) прибор для фотографирования
- 2) луч света
- 3) единица измерения интенсивности света
- 4) элементарная частица
- 5) квант электромагнитного излучения

Ответ:

2 Постоянная Планка это: единица измерения энергии, квант действия, элементарная частица? Ответ запишите словами.

Ответ: _____ .

3 Чему равен импульс фотона красного света $\lambda = 630$ нм? Как он отличается от фотона фиолетового света $\lambda = 400$ нм? Выберите два правильных ответа.

- 1) $p_k = 1 \cdot 10^{-27}$
- 2) $p_k/p_\phi = 0,63$
- 3) $p_k = 1 \cdot 10^{-26}$
- 4) $p_k/p_\phi = 0,5$
- 5) $p_k = 5 \cdot 10^{-27}$
- 6) $p_k/p_\phi = 2$
- 7) $p_k = 3 \cdot 10^{-27}$
- 8) $p_k/p_\phi = 1,5$

Ответ:

4 Определите, которая из длин волн в спектре излучения ртутной лампы: 436 нм, 546 нм, 577 нм, 579 нм может вызвать фотоэффект в металле с красной границей фотоэффекта $\lambda_k = 500$ нм?

Ответ: _____ нм.

5 Чему равна длина волны де Бройля медленных электронов с энергией около 100 эВ, использованных в опытах К. Дэвиссона и Л. Джермера по обнаружению дифракции электронов?

Ответ: _____ Å.

6 Чему равна длина волны де Бройля шарика массой 1 г, движущегося со скоростью 1 см/с?

Ответ: _____ см.

Ответами к заданиям 7–13 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

7 Определите энергию пучка синего света с длиной волны $\lambda = 450$ нм, состоящего из 10 фотонов.

Ответ: _____ Дж.

8 Какой массе эквивалентна энергия фотона рентгеновского излучения с $\lambda = 10$ нм?

Ответ: _____ кг.

9

Какова длина волны де Бройля α -частицы, движущейся со скоростью 30 000 км/с? Импульс частицы можно вычислять по классической формуле.

Ответ: _____ м.

10

Какова красная граница фотоэффекта для платины, если работа выхода электронов $A = 1 \cdot 10^{-18}$ Дж?

Ответ: _____ м.

11

Красная граница фотоэффекта для вольфрама $\lambda_k = 275$ нм. Найдите наибольшую скорость фотоэлектронов, вылетающих из вольфрама при освещении его светом с $\lambda = 180$ нм.

Ответ: _____ м/с.

12

Найдите работу выхода электронов из металла, если фотоэффект начинается при частоте падающего света $6 \cdot 10^{14}$ с⁻¹.

Ответ: _____ Дж.

13

Заряженная частица, прошедшая разность потенциалов 200 В, имеет длину волны де Бройля, равную 0,0202 Å. Заряд частицы равен заряду электрона. Какова масса частицы?

Ответ: _____ кг.

5.2. Физика атома

Атом — это наименьшая частица химического элемента, способная к самостоятельному существованию и обладающая его свойствами.

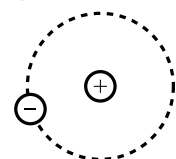
Каждому элементу соответствует определенный род атомов, обозначаемый химическим символом этого элемента. Например, атом кислорода обозначается символом О, атом водорода Н, атом гелия He.

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.

5.2.1. 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. 5.3

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. 5.3).

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.

5.2.2. 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:

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n. \quad (5.8)$$

Отсюда можно получить частоту излучения:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h} = \frac{E_k}{h} - \frac{E_n}{h}. \quad (5.9)$$

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 движения¹:

$$m_e v r = n \frac{h}{2\pi}, \quad n = 1, 2, 3 \dots,$$

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. 5.4). (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.)

Правило квантования орбит и постулаты Бора позволили ему самому и другим ученым объяснить наблюдавшиеся закономерности

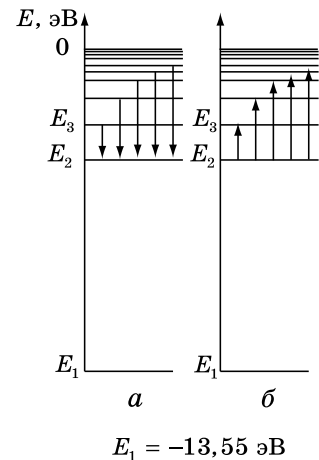


Рис. 5.4

1 Момент количества движения материальной точки относительно центра O равен векторному произведению радиус-вектора \vec{r} точки, проведенного из центра O , на ее количество движения $m\vec{v}$.

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.

5.2.3. 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

Спектральный состав излучения веществ весьма разнообразен. Несмотря 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.

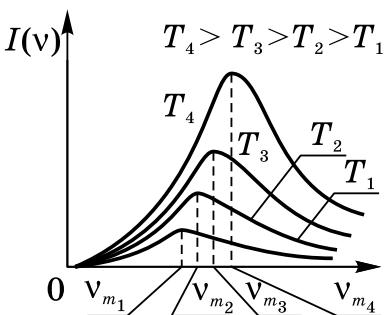


Рис. 5.5

На рис. 5.5 приведена кривая зависимости спектральной плотности интенсивности теплового излучения от частоты (спектр) тела с очень черной поверхностью. Кривая имеет максимум при некоторой частоте ν_{\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. 5.6); это означает, что вещество излучает свет определенных длин волн в определенных, очень узких спектральных интервалах. Каждая линия имеет конечную ширину.

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:

$$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (5.10)$$

где $n = 3, 4, 5, \dots$; $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ — 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 (5.10) нужно поставить числа 1, 3, 4, 5. Ниже в табл. 5.1 приведены номера нижних энергетических уровней, при переходе на которые с верхних уровней излучаются соответствующие серии.

Таблица 5.1

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

Энергии этих уровней, представляющих собой спектр уровней энергий атома водорода можно определить, умножив обе части уравнения (5.10) на hc и приравняв первый член к нулю, что означает переход на ∞ или ионизацию атома (см. рис. 5.4):

$$h \frac{c}{\lambda} = E_n = -hcR \frac{1}{n^2}. \quad (5.11)$$

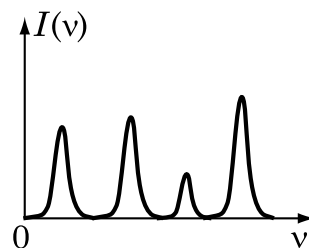


Рис. 5.6

Подставив численные значения постоянных h , c , R , получим:

$$E_n = -\frac{13,6 \text{ эВ}}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5.12)$$

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.

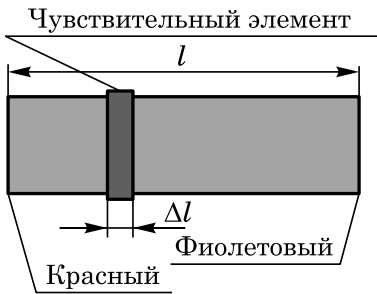


Рис. 5.7

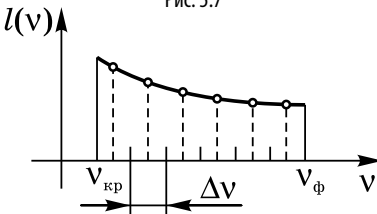


Рис. 5.8

Простейшим способом получения распределения интенсивности света по частотам является разложение его в спектр с помощью призмы с последующим сканированием полученного спектра чувствительным элементом (рис. 5.7). 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. 5.8). 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 $\Delta \nu$, а по оси ординат — спектральную плотность интенсивности излучения, получим кривую распределения энергии по частотам (рис. 5.8). На рис. 5.8 представлена видимая часть спектра электрической дуги.

Спектральные аппараты используют для точного исследования спектров. Схема устройства такого аппарата — спектрографа —

представлена на рис. 5.9. 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

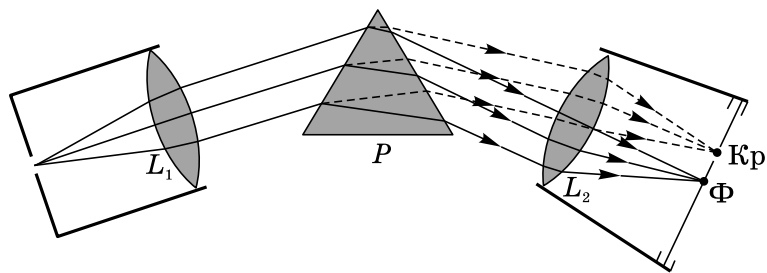


Рис. 5.9

получается целый ряд изображений. Каждому узкому спектральному интервалу соответствует свое изображение. Все эти изображения вместе и образуют *спектр*.

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.

5.2.4. 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. 5.10). Интенсивность поглощенного излучения пропорциональна концентрации n_1 атомов, находящихся в основном состоянии.
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. 5.10, 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. *Индукцированное излучение.* В 1917 г. Эйнштейн предсказал, что возбужденный атом может излучать под действием падающего на него света (рис. 5.10, в).

Индукцированное (вынужденное) излучение — излучение атома, возникающее при переходе на более низкий энергетический уровень под действием внешнего электромагнитного излучения.

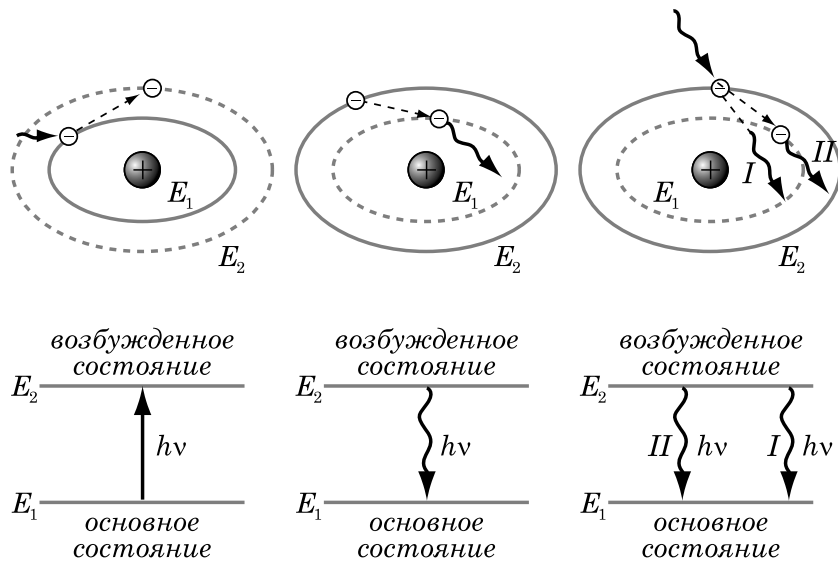


Рис. 5.10

Интенсивность индуцированного излучения пропорциональна концентрации n_2 атомов, находящихся в возбужденном состоянии. При этом световая волна, возникающая при индуцированном 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 индуцированного 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. 5.11). 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.

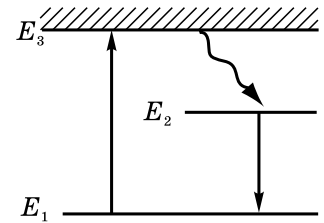
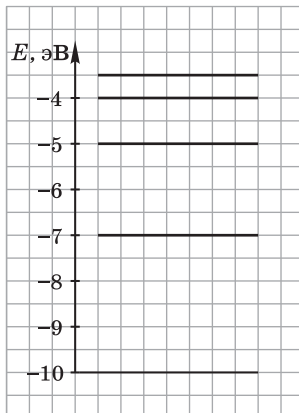


Рис. 5.11

ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ 5.2 «ФИЗИКА АТОМА»

Ответами к заданиям 1–5 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

- 1** На рисунке изображены энергии квантовых состояний (уровни энергии) E_n в эВ атомной системы.



Проанализируйте рисунок и выберите **два** значения энергий фотонов $h\nu_{kn}$, не противоречащих второму постулату Бора применительно к этой системе.

- | | | |
|-----------|---------|------------|
| 1) 7 эВ | 3) 3 эВ | 5) -11 эВ |
| 2) 1,2 эВ | 4) 1 эВ | 6) -5,5 эВ |

Ответ:

- 2** Главной отличительной особенностью излучения лазера по сравнению с естественными источниками света является: **большая интенсивность, спектральный состав, длительность, когерентность**? Ответ запишите словом (словами).

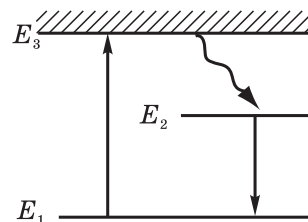
Ответ: _____ .

- 3** Во сколько раз кулоновская сила больше силы тяготения электрона и ядра в атоме водорода (радиус атома водорода $\sim 0,5 \cdot 10^{-10}$ м)?

Ответ: _____ .

- 4** Условием, необходимым для индуцированного излучения трехуровневой системы, является

- 1) большое значение $E_3 - E_2$
 - 2) большое время жизни уровня E_3
 - 3) наличие метастабильного уровня E_2
 - 4) большая интенсивность света накачки
 - 5) инверсная населенность метастабильного уровня E_2
- Выберите **два** верных ответа из предложенного перечня.



Ответ:

- 5 Установите соответствие между названием оптического спектра и источником такого спектра.

ОПТИЧЕСКИЙ СПЕКТР

ИСТОЧНИК СПЕКТРА

- А) линейчатые спектры
Б) полосатые спектры

- 1) спектр Солнца
2) молекулярные спектры
слабых растворов
3) газы в атомарном состоянии
4) сильно нагретое тело
5) спектры звезд

К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

Ответ:

А	Б

Ответами к заданиям 6–8 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

- 6 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} .

Ответ: _____ м^{-1} .

- 7 Определите наибольшую длину волны в ультрафиолетовой серии атома водорода.

Ответ: _____ м.

- 8 Каково изменение энергии атомов водорода при излучении им линии с частотой $4,57 \cdot 10^{14}$ Гц?

Ответ: _____ Дж.

5.3. Физика атомного ядра

5.3.1. Состав ядра. Нуклонная модель Гейзенберга — Иваненко

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 = 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 $m_n = 1,6749286 \times 10^{-27}$ кг = 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 (преодолеvalo преграду из свинцовой пластины толщиной 10–20 см) усиливало свое действие при прохождении через парафиновую пластину (рис. 5.12). 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.

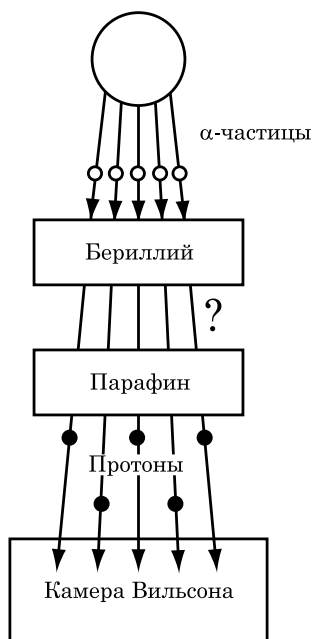


Рис.5.12

Заряд ядра Q определяется числом протонов Z , входящих в состав ядра, и кратен абсолютной величине заряда электрона e :

$$Q = +Ze. \quad (5.14)$$

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:

$$A = Z + N. \quad (5.15)$$

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 °С и замерзает при +3,8 °С. 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 ${}_{92}^{238}\text{U}$.

5.3.2. Энергия связи нуклонов в ядре. 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,

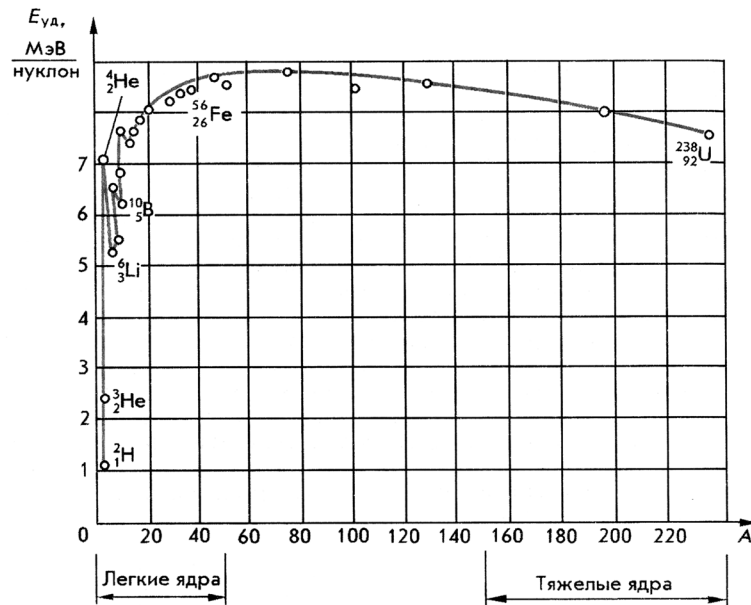


Рис. 5.13

равных по порядку величины размерам ядра, что показали опыты Резерфорда по рассеянию α -частиц ядрами.

Устойчивость атомного ядра характеризуется энергией связи ($E_{св}$). 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: $E = mc^2$.

Удельной энергией связи называют энергию связи, приходящуюся на один нуклон ядра. Ее определяют экспериментально. Зависимость $E_{уд}$ от массового числа A приведена на рис. 5.13. 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.

У тяжелых ядер удельная энергия связи уменьшается за счет растущей с увеличением Z кулоновской энергии отталкивания протонов. Кулоновские силы стремятся разорвать ядро.

5.3.3. Дефект массы

Точнейшие измерения показывают, что масса покоя ядра $M_{я}$ всегда меньше суммы масс покоя составляющих ее протонов и нейтронов: $M_{я} < Zm_p + Nm_n$. Существует положительная разность масс, называемая *дефектом массы*: $\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{я}$. 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 $E_{св}$:

$$E_{св} = \Delta Mc^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{я})c^2. \quad (5.16)$$

Энергия связи переходит в энергию излучаемых при ядерных превращениях γ -квантов, которая равна как раз $E_{\text{св}}$, и масса которых $\Delta M = E_{\text{св}}/c^2$.

5.3.4. 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. 5.14. 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.

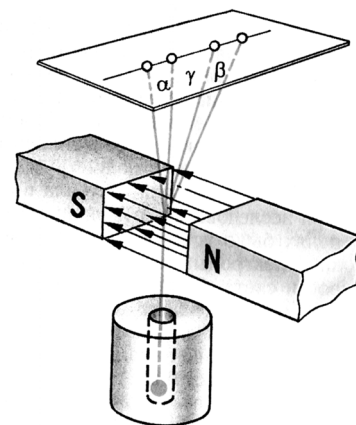


Рис. 5.14

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. 5.14).

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 помощью 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.

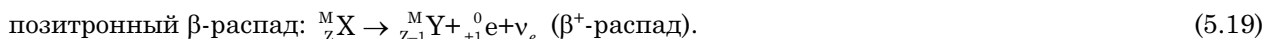
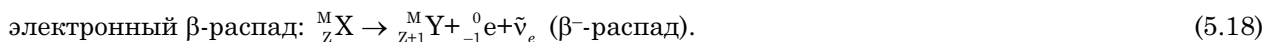
После того, как было открыто атомное ядро, сразу стало ясно, что именно оно претерпевает превращения при радиоактивных распадах. Ведь на электронных оболочках нет α -частиц, а уменьшение числа электронов оболочки превращает атом в ион, а не в новый химический элемент.

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 ${}_2^4\text{He}$.

Явление β -распада состоит в том, что ядро самопроизвольно испускает электрон e^- и электронное антинейтрино $\bar{\nu}_e$ или позитрон e^+ (частица с положительным элементарным электрическим зарядом и массой, равной массе электрона) и электронное нейтрино ν_e ($\bar{\nu}_e$ и ν_e — нейтральные элементарные частицы с очень малой, возможно нулевой массой покоя, уносящие при β -распаде часть энергии), превращаясь в ядро с тем же массовым числом M :



Здесь ${}_{-1}^0e$ 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* после β^- -распада на одну клетку дальше.

При электронном β -распаде один из нейтронов ядра превращается в протон, а при позитронном β -распаде один из протонов ядра превращается в нейтрон.

Гамма-излучение не сопровождается изменением заряда; масса же ядра меняется ничтожно мало.

Правила смещения показывают, что при радиоактивном распаде сохраняется суммарный электрический заряд и приближенно сохраняется относительная атомная масса ядер.

Возникшие при радиоактивном распаде ядра обычно тоже радиоактивны.

5.3.5. Закон радиоактивного распада. Период полураспада

Резерфорд, исследуя превращения радиоактивных веществ, установил опытным путем, что их активность убывает с течением времени¹. Так, активность радона убывает в два раза уже через

¹ Под активностью понимают число ядер, распадающихся в единицу времени.

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.*

Математически закон радиоактивного распада выражается формулой:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}. \quad (5.20)$$

Здесь N_0 — число радиоактивных атомов в начальный момент времени $t = 0$. По формуле (5.20) 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 опре-

делить лишь *среднее время жизни* $\tau \left(\tau = \frac{T}{\ln 2} \right)$ большого числа молекул. Закон радиоактивного рас-

пада 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.

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 самостоятельно-го 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. 5.15) 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).

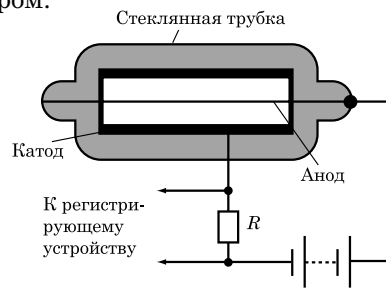


Рис. 5.15

Камера Вильсона

Камера Вильсона — трековый (от англ. *track* — след, траектория) детектор частиц.

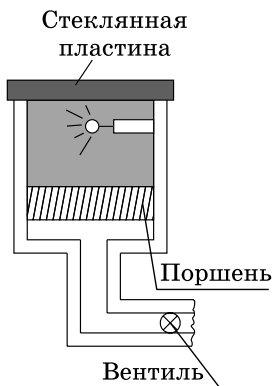


Рис. 5.16

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. 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. 5.16) (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. Скобелцыным).

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.

5.3.6. Ядерные реакции. Деление и синтез ядер

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. 5.2).

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.

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 (5.21), часть энергии переходит во внутреннюю энергию вновь образовавшихся ядер. При ядерной реакции (5.22) кинетическая энергия образовавшихся ядер гелия на 17,3 МэВ больше кинетической энергии вступавшего в реакцию протона.

Реакция	Электрический заряд	Массовое число
${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0n$	$4 + 2 = 6 + 0$	$9 + 4 = 12 + 1$
${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$	$7 + 2 = 8 + 1$	$14 + 4 = 17 + 1$
${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$	$3 + 1 = 2 + 2$	$7 + 1 = 4 + 4$
${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^1_0n \rightarrow {}^{24}_{11}\text{Na} + {}^4_2\text{He}$	$13 + 0 = 11 + 2$	$27 + 1 = 24 + 4$
${}^{239}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{239}_{93}\text{Np} + {}^0_{-1}\text{e}$	$92 = 93 - 1$	$239 = 239 + 0$
${}^{239}_{93}\text{Np} \rightarrow {}^{239}_{94}\text{Pu} + {}^0_{-1}\text{e}$	$93 = 94 - 1$	$239 = 239 + 0$

Деление и синтез ядер

Деление ядер — процесс, при котором из одного атомного ядра возникают два (реже три) ядра-осколков, 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 ${}^{235}_{92}\text{U}$ 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. 5.13 понятно, что такой процесс энергетически выгоден.

Механизм деления ядра объясняется на основе *капельной модели*, согласно которой сгусток нуклонов напоминает капельку заряженной жидкости (рис. 5.17). Ядро удерживают от распада ядерные силы притяжения, большие, чем силы кулоновского отталкивания, действующие между протонами

и стремящиеся разорвать ядро.

Ядро ${}^{235}_{92}\text{U}$ имеет форму шара. После поглощения нейтрона оно возбуждается и деформируется, приобретая вытянутую форму (рис. 5.17, б), и растягивается до тех пор, пока силы отталкивания между половинками вытянутого ядра не станут больше сил притяжения, действующих в перешейке (рис. 5.17, в). После этого ядро разрывается на две части (рис. 5.17, г). Осколки под действием кулоновских сил отталкивания разлетаются со скоростью, равной $1/30$ скорости света.

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.

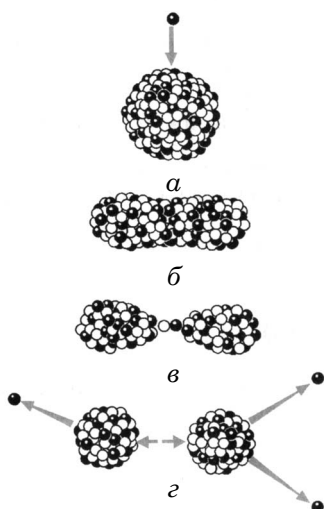


Рис. 5.17

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 107 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 (5.24), 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.

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.

Основными элементами ядерного реактора (рис. 5.18) 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

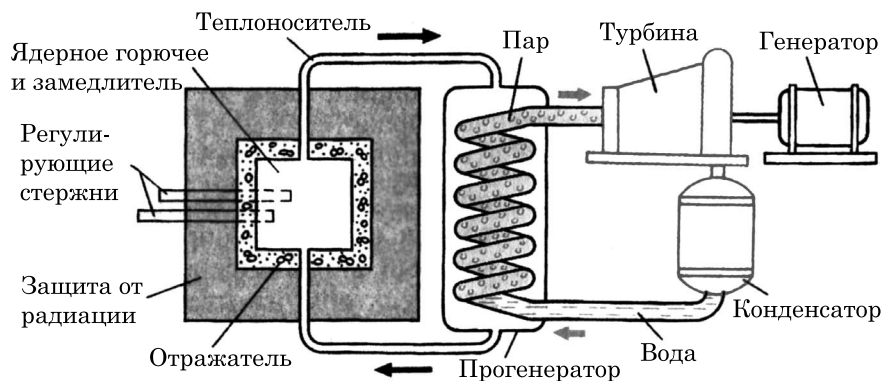


Рис. 5.18

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 окружают 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 5.3 «ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА»

Ответами к заданиям 1–10 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

- 1** α -лучи представляют собой поток **нейтронов, позитронов, ядер атома гелия**? Ответ запишите словом (словами).

Ответ: _____ .

- 2** β -частицы это: электромагнитное **излучение, космические лучи, электроны**? Ответ запишите словом (словами).

Ответ: _____ .

- 3** γ -лучи представляют собой:

- 1) электромагнитные волны
 - 2) кванты электромагнитного излучения с длиной волны $10^{-3} - 10^{-11}$ см
 - 3) поток нейтральных частиц с массой электрона
 - 4) поток кварков
 - 5) электромагнитное излучение радиодиапазона
- Выберите два верных утверждения.

Ответ: ☐ ☐

- 4** Количество радиоактивного радона уменьшилось в 8 раз за 11,4 дня. Каков период полураспада радона?

Ответ: _____ дней.

- 5** Сколько нейтронов и сколько протонов содержится в ядре кюрия ${}^{247}_{96}\text{Cm}$?

Число нейтронов	Число протонов

- 6** В реакции ${}^{55}_{25}\text{Mn} + ? \rightarrow {}^{55}_{26}\text{Fe} + {}^1_0n$ вместо знака «?» следует вписать символ ядра **гелия ${}^4_2\text{He}$, водорода ${}^1_1\text{H}$, дейтерия ${}^2_1\text{H}$** ? Ответ запишите словом.

Ответ: _____ .

- 7** К какому типу взаимодействия относятся ядерные силы: **гравитационному, сильному, слабому, электромагнитному**? Ответ запишите словом.

Ответ: _____ .

- 8** Чему равно число электронов и число протонов в нейтральном атоме ${}^{40}_{20}\text{Ca}$?

Число электронов	Число протонов

- 9** Чему равна энергия связи, приходящаяся на один нуклон изотопа ${}^{15}_7\text{N}$?

Ответ: _____ МэВ.

- 10** Какое количество α - и β -распадов радиоактивного ${}^{238}_{92}\text{U}$ приводит к образованию ${}^{236}_{82}\text{Pb}$?

Число α -распадов	Число β -распадов

Ответами к заданиям 11–14 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

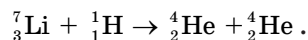
- 11** Активность радиоактивного элемента уменьшилась в 4 раза за 8 дней. Найдите период полураспада. Ответ дайте в днях.

Ответ: _____ дней.

- 12** 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.

Ответ: _____ а.е.м.

- 13** Определите энергетический выход ядерной реакции:



Ответ дайте в МэВ.

Ответ: _____ МэВ.

- 14** Неподвижный нейтральный π -мезон, распадаясь, превращается в два одинаковых фотона. Определите энергию каждого фотона, если масса покоя π -мезона $M = 264,2 m_e$. Ответ дайте в МэВ.

Ответ: _____ МэВ.



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	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с},$ $\hbar = 1,054887 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Молярная газовая постоянная	$R = 8,314 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$ $R = k \cdot N_A$
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	$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 931,5 \text{ МэВ}$ $1 \text{ эВ} = 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$
Ускорение свободного падения	$g = 9,80665 \text{ м/с}^2$

Объем моля идеального газа при нормальных условиях ($p_0 = 7101325 \text{ Па}$; $T_0 = 273,15^\circ \text{ К}$)	$V = 22,41383 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$
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 км/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 км/м^3
Бензин	0,70	Насыщенный раствор медного купороса	1,15
Вода (4° С)	1,00	Ртуть (0° С)	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/м ³	Вещество	кг/м ³
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	$C_p, 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{К}}$	$C_v, 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{К}}$	$\frac{C_p}{C_v}$
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	$t_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$\lambda, 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Вещество	$t_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$\lambda, 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
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, °K	t, °C	$r, 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
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

ОТВЕТЫ К ПРИМЕРАМ ЗАДАНИЙ ЕГЭ

РАЗДЕЛ 1.1 «КИНЕМАТИКА»

№ задания	1	2	3
Ответ	5	левый верхний	0,5
№ задания	4	5	6
Ответ	равнозамедленное	1,8	1,74
№ задания	7	8	9
Ответ	параболу	10,1	3

РАЗДЕЛ 1.2 «ДИНАМИКА»

№ задания	1	2	3
Ответ	сила трения	31	вверх
№ задания	4	5	6
Ответ	800	32	–5
№ задания	7	8	9
Ответ	32	31	$\mu = \operatorname{tg} \alpha$
№ задания	10	11	12
Ответ	0,4	71 100	14

РАЗДЕЛ 1.3 «СТАТИКА»

№ задания	1	2	3
Ответ	3	по часовой стрелке	7,5
№ задания	4	5	6
Ответ	равно	2	35
№ задания	7	8	9
Ответ	понижается	155	7,2
№ задания	10	11	12
Ответ	20	0,04	0,73

РАЗДЕЛ 1.4 «ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ»

№ задания	1	2	3
Ответ	1,6	0	20
№ задания	4	5	6
Ответ	420	одинакова	500
№ задания	7	8	9
Ответ	41	3,3	2
№ задания	10	11	
Ответ	343	34	

12. $v_1' = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2v_2}{m_1 + m_2} = 1,16 \text{ м/с}; v_2' = \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1v_1}{m_1 + m_2} = 0,66 \text{ м/с}.$

РАЗДЕЛ 1.5 «МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ»

№ задания	1	2	3	4
Ответ	13	72	невозможно выполнить задачу	увеличить вдвое
№ задания	5	6	7	8
Ответ	2	2	32	да
№ задания	9	10		
Ответ	0	7,4		

РАЗДЕЛ 2.1 «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА»

№ задания	1	2	3
Ответ	количество молей	42	диффузии
№ задания	4	5	6
Ответ	уменьшится	573	$1,2 \cdot 10^{-20}$
№ задания	7	8	9
Ответ	не изменится	34	21
№ задания	10	11	12
Ответ	432	0,3	83

РАЗДЕЛ 2.2 «ТЕРМОДИНАМИКА»

№ задания	1	2	3
Ответ	25	уменьшится в 4 раза	42
№ задания	4	5	6
Ответ	1,7	удвоилась	1
№ задания	7	8	9
Ответ	5	16	4
№ задания	10		
Ответ	74		

РАЗДЕЛ 3.1 «ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ»

№ задания	1	2	3
Ответ	разноименные	45	51
№ задания	4	5	6
Ответ	0	одинакова	-3
№ задания	7	8	9
Ответ	уменьшится вдвое	400	1,8
№ задания	10	11	
Ответ	6	0,036	

РАЗДЕЛ 3.2 «ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА»

№ задания	1	2	3
Ответ	увеличится в 6 раз	13	45
№ задания	4	5	6
Ответ	2	на четвертом	n -типа
№ задания	7	8	9
Ответ	65	0,064	11,8
№ задания	10	11	
Ответ	1,67	807	

РАЗДЕЛ 3.3 «МАГНИТНОЕ ПОЛЕ»

№ задания	1	2	3
Ответ	Южного географического полюса	51	0,5
№ задания	4	5	6
Ответ	от читателя	$4,8 \cdot 10^{-14}$	5
№ задания	7	8	9
Ответ	10^5	0,05	12

РАЗДЕЛ 3.4 «ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ»

№ задания	1	2	3
Ответ	35	противоположно	параллельно
№ задания	4	5	6
Ответ	15	0,2	0,4
№ задания	7	8	9
Ответ	31,2	12,7	31
№ задания	10		
Ответ	21		

РАЗДЕЛ 3.5 «ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ»

№ задания	1	2	3
Ответ	четвертом	16	52
№ задания	4	5	6
Ответ	уменьшится	уменьшится	не имеется
№ задания	7	8	9
Ответ	8	32	массе
№ задания	10	11	12
Ответ	$5 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	2520

РАЗДЕЛ 3.6 «ОПТИКА»

№ задания	1	2	3
Ответ	45	13	Оптически однородной
№ задания	4	5	6
Ответ	14	интерференции	дифракции
№ задания	7	8	9
Ответ	$1,76 \cdot 10^8$	0,8	3,75

РАЗДЕЛ 4.1–4.3 «ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ»

№ задания	1	2	3
Ответ	45	в неподвижной	24
№ задания	4	5	6
Ответ	энергией покоя	34	0,69
№ задания	7	8	9
Ответ	равной скорости света	0,436	$7 \cdot 10^{12}$
№ задания	10	11	12
Ответ	$2,6 \cdot 10^8$	7,1	0,866

13. ${}^{11}_5\text{B} + {}^4_2\text{He} = {}^1_0n + {}^{14}_7\text{N}$

РАЗДЕЛ 5.1 «КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ»

№ задания	1	2	3
Ответ	45	квант действия	12
№ задания	4	5	6
Ответ	436	1,24	$6,6 \cdot 10^{-27}$
№ задания	7	8	9
Ответ	$4,4 \cdot 10^{-18}$	$2,2 \cdot 10^{-18}$	$3,3 \cdot 10^{-15}$
№ задания	10	11	12
Ответ	$2 \cdot 10^{-7}$	$9,1 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^{-19}$
№ задания	13		
Ответ	$1,67 \cdot 10^{-27}$		

РАЗДЕЛ 5.2 «ФИЗИКА АТОМА»

№ задания	1	2	3
Ответ	34	когерентность	$2 \cdot 10^{39}$
№ задания	4	5	6
Ответ	35	32	$1,1 \cdot 10^7$
№ задания	7	8	
Ответ	$1,21 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-19}$	

РАЗДЕЛ 5.3 «ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА»

№ задания	1	2	3
Ответ	ядер атома гелия	электроны	12
№ задания	4	5	6
Ответ	3,8	15196	водорода
№ задания	7	8	9
Ответ	сильному	2020	7,7
№ задания	10	11	12
Ответ	86	4	-12
№ задания	13	14	
Ответ	17,3	67,5	

ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ



Вариант 1



Вариант 2



Ответы



Вариант 1

Часть 1

Ответами к заданиям 1–23 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы, а затем перенесите в БЛАНК ОТВЕТОВ № 1 справа от номера соответствующего задания, начиная с первой клеточки. Каждый символ пишете в отдельной клеточке в соответствии с приведенными в бланке образцами. Единицы измерения физических величин писать не нужно.

- 1** Движущийся бильярдный шар сталкивается с таким же неподвижным шаром. После соударения шары разлетелись так, что направления их скоростей составили угол 90° , при этом импульс одного шара стал равен $0,3 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$, а другого — $0,4 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. Определите импульс двигавшегося шара до соударения.

Ответ: _____ $\text{кг} \cdot \text{м/с}$.

- 2** Тело равномерно движется по плоскости. Сила давления тела на плоскость равна 40 Н , сила трения — 8 Н . Определите коэффициент трения скольжения.

Ответ: _____.

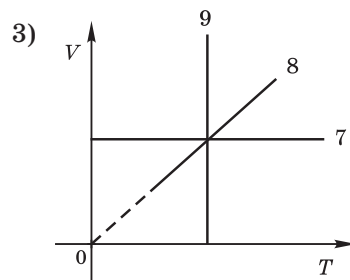
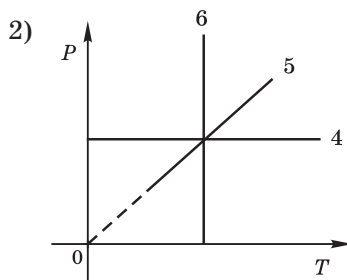
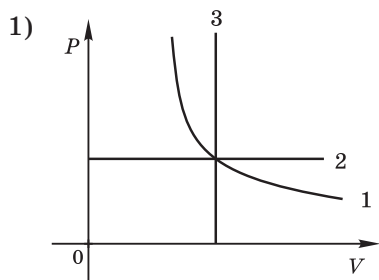
- 3** В вершинах квадрата расположены четыре электрически заряженные шарика. Величины и знаки зарядов шариков одинаковы. Каждый из шариков создает в точке пересечения диагоналей квадрата электрическое поле, напряженность которого равна E . Чему равна результирующая напряженность поля в точке пересечения диагоналей квадрата, создаваемая всеми четырьмя шариками?

Ответ: _____.

- 4** При изменении силы тока в катушке от 0 до 5 А в течение 2 с в ней возникла ЭДС, равная 1 В . Чему равна индуктивность катушки?

Ответ: _____ Гн .

- 5** На рисунках представлены графики (кривые 1–9) изопроцессов в координатах $p(V)$, $p(T)$, $V(T)$. Проанализируйте рисунки и выберите два верных утверждения о процессах, представленных графиками 1–9.



- 1) Графики 3, 5, 7 описывают изохорический процесс.
2) Изохорический процесс представлен графиками 2, 5, 7.

- 3) Изобару представляют кривые 8, 1, 9.
 4) Изотермический процесс представлен графиками 4, 1, 9.
 5) Изобары описаны графиками 2, 4, 5; изотермы — 1, 3, 7; изохоры — 6, 9, 2.
 6) Изобары описаны графиками 2, 4, 8; изотермы — 1, 6, 9.

Ответ:

--	--

6

Маятниковые часы отстают. Чтобы часы шли точно, необходимо уменьшить период колебаний маятника. Для этого необходимо длину маятника и его массу изменить так:

- 1) увеличить
- 2) уменьшить
- 3) не менять, т. к. этот параметр не влияет на период

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Длина маятника	Масса маятника

7

Установите соответствие между названием закона/принципа и его математическим выражением. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ЗАКОН/ПРИНЦИП

ЕГО МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
ВЫРАЖЕНИЕ/ФОРМУЛА

- А) закон всемирного тяготения
 Б) принцип относительности Галилея

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) $p = mv$

Ответ:

А	Б

8

Температура нагревателя идеальной тепловой машины равна 550 К, а температура холодильника составляет 440 К. Двигатель получил от нагревателя количество теплоты 50 кДж. Определите работу, которую совершило рабочее тело.

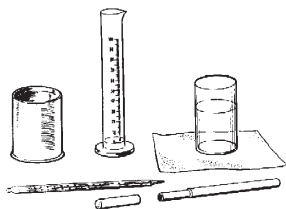
Ответ: _____ кДж.

9

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?

Ответ: _____ ТГц.

- 10** 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.)

Ответ: _____ Дж.

- 11** Электромагнитная волна переходит из среды с показателем преломления $n_1 = 1,3$ в среду с показателем преломления $n_2 = 1,5$. Как при этом изменяются частота, скорость распространения и длина волны? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения. Выберите два верных ответа:

- 1) частота и длина волны увеличились
- 2) длина волны и скорость уменьшились
- 3) частота и скорость не изменилась
- 4) частота не изменилась

Ответ: ☐ ☐

- 12** Космическая ракета стартует с космодрома. Как изменяются в процессе старта ракеты ее масса, скорость и давление воздуха в ракете? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

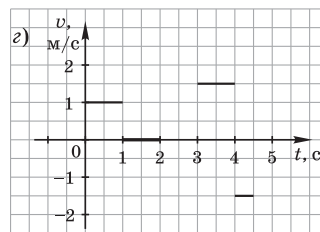
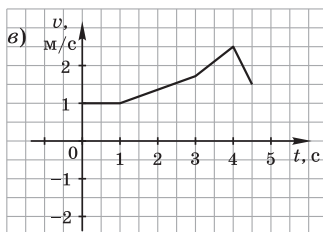
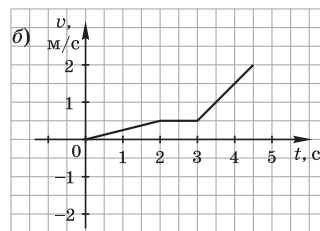
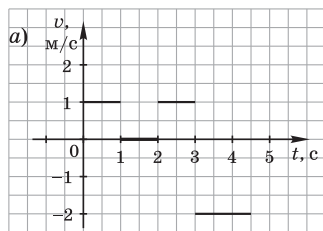
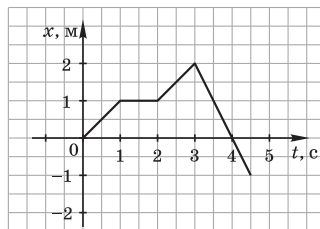
- 1) увеличивается
- 2) уменьшается
- 3) изменяется несущественно

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Масса ракеты	Скорость ракеты

13

На рисунке приведен график движения тела $x(t)$. Под ним приведены четыре графика зависимости скорости от времени $v(t)$. Какой из этих четырех графиков $v(t)$ (**левый верхний, правый верхний, левый нижний, правый нижний**) соответствует графику движения тела $x(t)$? Ответ запишите словами.



Ответ: _____.

14

Скорость звука в воде 1450 м/с. На каком расстоянии находятся ближайшие точки, совершающие колебания в противоположных фазах, если частота колебаний 725 Гц?

Ответ: _____ м.

15

Электрон, пройдя разность потенциалов 4,9 В, сталкивается с атомом ртути и переводит его в первое возбужденное состояние. Чему равна длина волны фотона, соответствующая переходу атома ртути в нормальное состояние?

Ответ: _____ нм.

16

В процессе распространения электромагнитной волны в вакууме

- 1) происходит только перенос энергии
- 2) происходит только перенос импульса
- 3) происходит перенос и энергии, и импульса
- 4) происходит перенос импульса
- 5) не происходит переноса ни энергии, ни импульса

Выберите два верных ответа из приведенного выше перечня

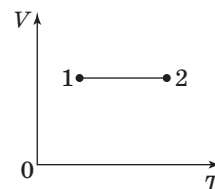
Ответ:

--	--

17

Некий идеальный газ при постоянном давлении был переведен из состояния 1 в состояние 2, как изображено на графике. Как изменится при этом объем, температура и масса газа? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличится 2) уменьшится 3) не изменится



Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Объем газа	Масса газа

18

Установите соответствие между проводником и типом свободных носителей в нем. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ПРОВОДНИКИ

- А) металл
Б) полупроводник

СВОБОДНЫЕ НОСИТЕЛИ

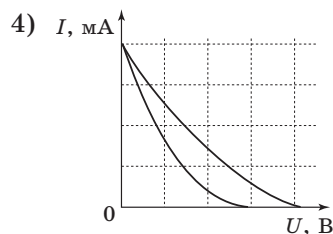
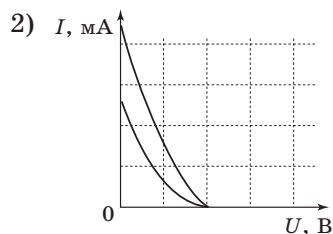
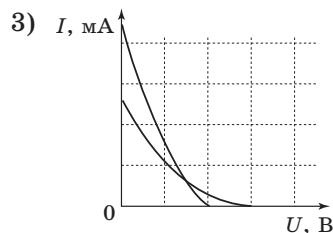
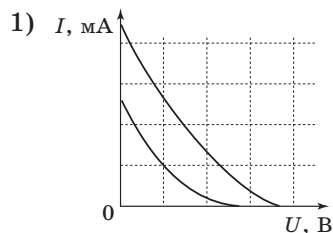
- 1) положительно заряженные ионы
2) отрицательно заряженные ионы
3) и положительно, и отрицательно заряженные ионы
4) электроны и ионы
5) дырки
6) электроны

Ответ:

А	Б

19

Во время проведения эксперимента металлическую пластинку фотокатода дважды освещали монохроматическим светом одной и той же частоты, но разной интенсивности. При этом исследовали зависимость фототока от приложенного напряжения между фотокатодом и анодом. Определите рисунок, на котором правильно изображены графики, отражающие результаты этих экспериментов, и, считая цену деления шкалы абсцис на этом рисунке равной 1 В, определите величину задерживающего напряжения при первом и втором освещении.



Величина задерживающего напряжения при первом освещении	Величина задерживающего напряжения при втором освещении

- 20** Определите показатель преломления, если известно, что преломленный луч составляет с отраженным угол 90° , а синус угла падения равен 0,8.

Ответ: _____.

- 21** Конденсатор, входящий в состав колебательного контура, зарядили и отсоединили от источника напряжения. После этого площадь пластин конденсатора увеличили. Как это повлияло на емкость конденсатора и частоту электромагнитных колебаний в контуре? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличилась
- 2) уменьшилась
- 3) не изменилась

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Емкость конденсатора	Частота колебаний

- 22** Для определения времени протекания некоторого процесса его длительность была измерена 5 раз. Получены следующие результаты:

№ измерения	1	2	3	4	5
Длительность процесса, с	5,8	4,9	5,3	4,7	5,1

Запишите время этого процесса с учетом погрешности измерения.

Ответ: (_____ \pm _____) с.

- 23** Система, состоящая из нескольких свободных протонов и нейтронов, соединяется в атомное ядро. Выберите два верных утверждения, касающиеся этого процесса.

- 1) Масса образовавшегося ядра будет больше массы системы.
- 2) Масса образовавшегося ядра будет меньше массы системы.
- 3) Процесс происходит с выделением энергии.
- 4) Процесс происходит с поглощением энергии.
- 5) Масса образовавшегося ядра будет равна массе системы.

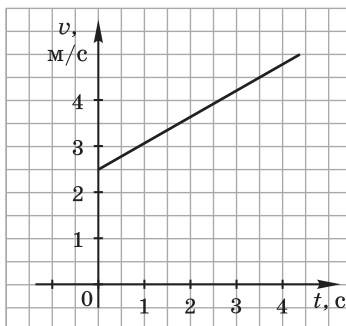
Ответ:

--	--

Часть 2

Ответом к заданиям 24–26 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы, а затем перенесите в БЛАНК ОТВЕТОВ № 1 справа от номера соответствующего задания, начиная с первой клеточки. Каждый символ пишете в отдельной клеточке в соответствии с приведенными в бланке образцами. Единицы измерения физических величин писать не нужно.

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



Ответ: _____ м.

- 25** Луч лазера направлен перпендикулярно плоскости дифракционной решетки. На удаленном экране (расстояние до экрана $L \gg 10$ см) образуется дифракционная картина. Расстояние между нулевым и первым дифракционными максимумами на экране равно 10 см. Чему примерно равно расстояние между нулевым и вторым дифракционными максимумами?

Ответ: _____ см.

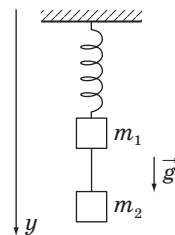
- 26** Период полураспада ядер радиоактивного изотопа некоего химического элемента равен 25 мин. Через какой период времени распадется $\frac{3}{4}$ ядер этого элемента?

Ответ: _____ мин.

Не забудьте перенести все ответы в бланк ответов № 1 в соответствии с инструкцией по выполнению работы.

Для записи ответов на задания 27–31 используйте БЛАНК ОТВЕТОВ № 2. Запишите сначала номер задания (27, 28 и т. д.), а затем решение соответствующей задачи. Ответы записывайте четко и разборчиво.

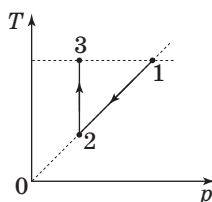
- 27** К нижнему концу легкой пружины подвешены связанные невесомой нитью грузы: верхний — массой $m_1 = 0,4$ кг и нижний — массой $m_2 = 0,1$ кг (см. рис.). Нить, соединяющую грузы, пережигают. Найдите модуль ускорения, с которым начнет двигаться верхний груз.



Полное правильное решение каждой из задач 28–32 должно содержать 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.

- 28** Шар массой 1 кг, подвешенный на нити длиной 90 см, отводят от положения равновесия на угол 60° и отпускают. В момент прохождения шаром положения равновесия в него попадает пуля массой 10 г, летящая навстречу шару. Она пробивает его и продолжает двигаться горизонтально. Определите изменение скорости пули в результате попадания в шар, если он, продолжая движение в прежнем направлении, отклоняется на угол 39° . (Массу шара считать неизменной, диаметр шара — пренебрежимо малым по сравнению с длиной нити, $\cos 39^\circ = \frac{7}{9}$).

- 29** 3 моль идеального одноатомного газа охладили, уменьшив давление в 3 раза. Затем газ нагрели до первоначальной температуры 300 К (см. рисунок). Какое количество теплоты сообщено газу на участке 2–3?



- 30** Плоская горизонтальная фигура площадью $S = 0,05 \text{ м}^2$, ограниченная проводящим контуром, находится в однородном магнитном поле. Пока проекция магнитной индукции на вертикаль z равномерно меняется от $B_{1z} = 3 \text{ Тл}$ до $B_{2z} = -5 \text{ Тл}$, по контуру протекает заряд $\Delta q = 0,04 \text{ Кл}$. Найдите сопротивление контура.

- 31** Какова длина волны λ_k , соответствующая красной границе фотоэффекта, если при облучении металлической пластинки светом с длиной волны $\lambda = 3 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ максимальная скорость выбитых электронов составляет 851 км/с? Ответ округлите до сотен нанометров.

» Единый государственный экзамен

» *Бланк ответов №2*



Регион

Код
предмета

Название предмета

Резерв - 8

Дополнительный
бланк ответов №2

Лист №

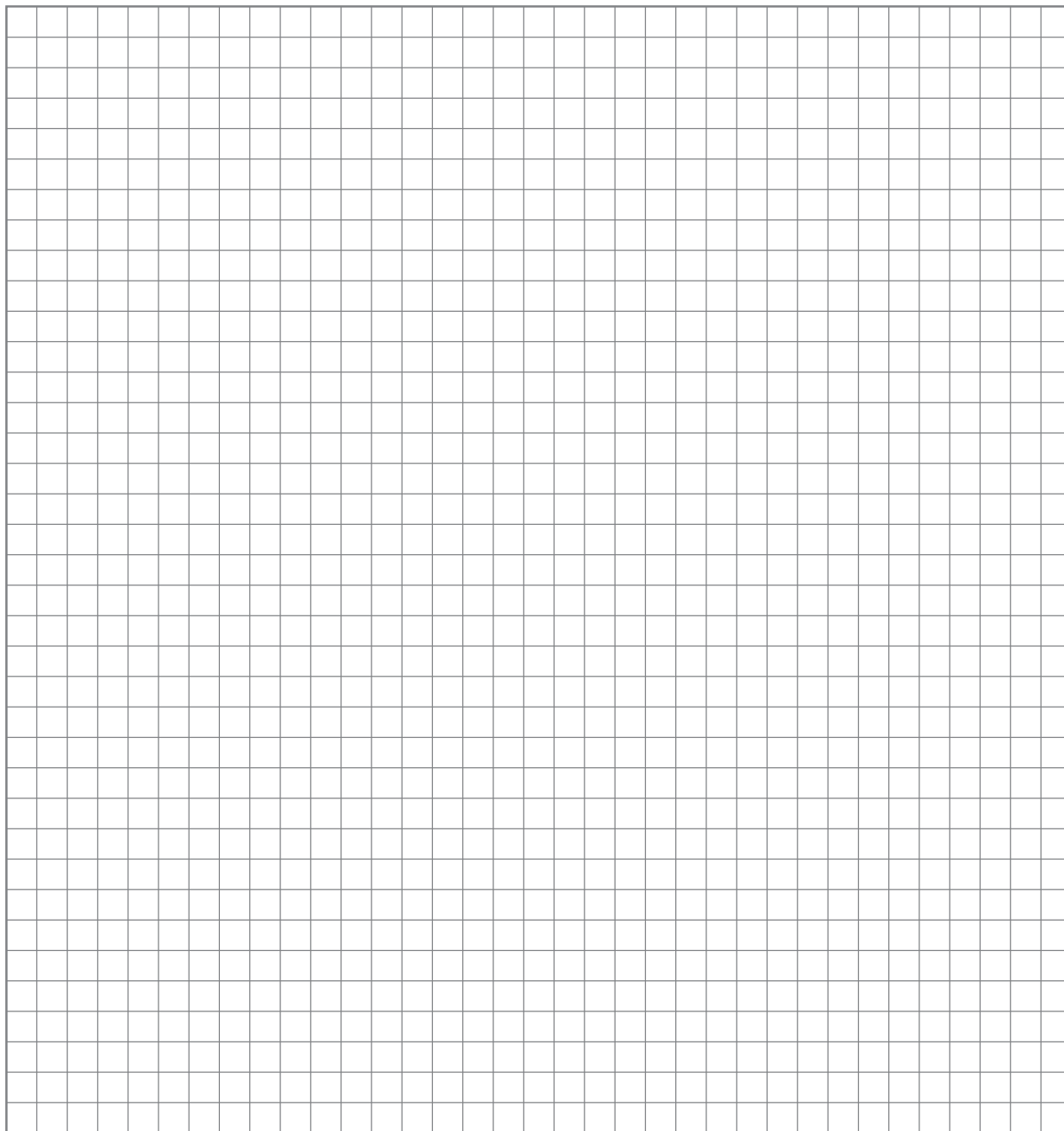
Перепишите значение полей «регион», «код предмета», «название предмета» из БЛАНКА РЕГИСТРАЦИИ.

Отвечая на задание типа С, пишите аккуратно и разборчиво, соблюдая разметку страницы.

Не забудьте указать номер задания, на которое Вы отвечаете, например **С1**.

Условия задания переписывать не нужно.

ВНИМАНИЕ! Все бланки и листы с контрольными измерительными материалами рассматриваются в комплекте.

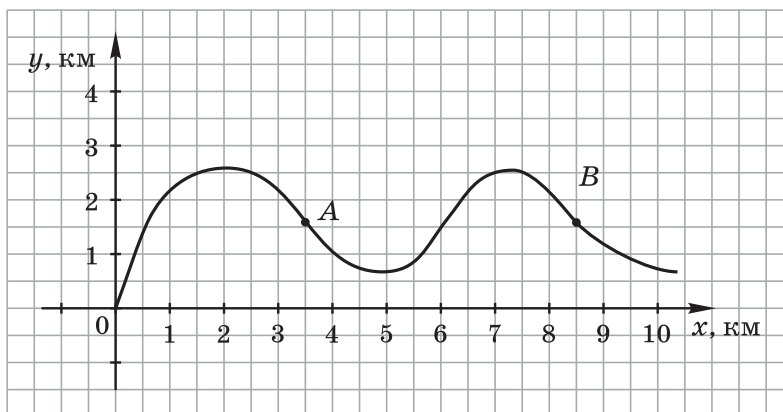


Вариант 2

Часть 1

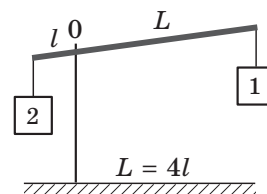
Ответами к заданиям 1–23 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы, а затем перенесите в БЛАНК ОТВЕТОВ № 1 справа от номера соответствующего задания, начиная с первой клеточки. Каждый символ пишете в отдельной клеточке в соответствии с приведенными в бланке образцами. Единицы измерения физических величин писать не нужно.

- 1 На рисунке изображена траектория движения автомобиля. Определите модуль вектора перемещения из точки A в точку B .



Ответ: _____ км.

- 2 Определите вес груза 2, прикрепленного к рычагу (см. рисунок), чтобы он уравнивал вес груза 1, равный 80 Н? Массой рычага пренебречь.



Ответ: _____ Н.

- 3 Коэффициент полезного действия тепловой машины составляет 30 %. Определите температуру нагревателя, если температура холодильника равна 7 °С.

Ответ: _____ К.

- 4 Потенциал в точке A электрического поля равен 200 В, потенциал в точке B равен 100 В. Какую работу совершают силы электрического поля при перемещении точечного тела с положительным зарядом 15 мКл из точки A в точку B ?

Ответ: _____ Дж.

- 5 Тело, движущееся в поле тяжести Земли, находится в состоянии невесомости. Выберите два верных утверждения, касающиеся ускорения a и веса тела P в этом состоянии.

- 1) $a < g$
- 2) $P = 0$
- 3) $a = g$
- 4) $P = mg$

Ответ:

--	--

6

На тело, покоящееся в инерциальной системе отсчета, кратковременно действовали силой, придав ему некоторую скорость. Как будет меняться скорость тела и пройденный путь со временем относительно той же системы отсчета, если в дальнейшем на него не будут действовать никакие силы? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличится
- 2) уменьшится
- 3) не изменится

Запишите в **таблицу** выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Скорость тела	Пройденный путь

7

Установите соответствие между физическим термином и его определением. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго столбца и запишите в **таблицу** выбранные цифры под соответствующими буквами.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО ТЕРМИНА

- А) объект пренебрежимо малых размеров, имеющий массу
Б) величина, равная отношению пути ко времени, за которое этот путь пройден

ФИЗИЧЕСКИЙ ТЕРМИН

- 1) траектория
- 2) материальная точка
- 3) путь
- 4) система отсчета
- 5) скорость

Ответ:

А	Б

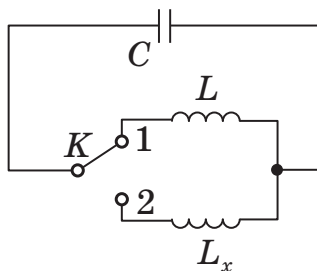
8

Определите отношение силы электростатического взаимодействия двух электрически заряженных шариков в вакууме и в среде с диэлектрической проницаемостью 81 при одинаковом расстоянии между ними.

Ответ: _____.

9

Какой должна быть индуктивность L_x катушки в контуре (см. рисунок), чтобы при переводе ключа K из положения 1 в положение 2 период собственных электромагнитных колебаний в контуре увеличился в 5 раз? (Ответ дайте относительно величины L .)



Ответ: _____ Гн.

- 10** Определите число фотонов в излучении с длиной волны 1 мкм, энергия которого составляет 10^{-7} Дж.

Ответ: _____.

- 11** Плоскопараллельную стеклянную пластинку ($n_{\text{стекла}} = 1,6$), находившуюся в воздухе ($n_{\text{возд}} = 1,0$) и освещаемую лучом света, поместили в воду ($n_{\text{воды}} = 1,3$). Как изменились при этом время прохождения света через пластинку и смещение вышедшего луча по отношению к падающему лучу в сравнении с частотой падающего луча?

Выберите два верных утверждения о характере изменения этих величин.

- 1) Все три величины увеличились.
- 2) Все три величины уменьшились.
- 3) Смещение вышедшего луча по отношению к падающему лучу не изменилось.
- 4) Время прохождения света через пластинку увеличилось.
- 5) Частота падающего луча и время прохождения света через пластинку уменьшились.
- 6) Время прохождения света через пластинку и частота вышедшего луча не изменились.

Ответ:

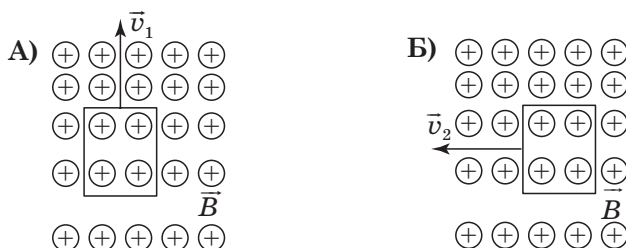
- 12** Поздней осенью идущий дождь сменился мокрым снегом. Как при этом изменились температура и относительная влажность воздуха? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) немного возросла 2) немного снизилась 3) не изменилась

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Температура	Относительная влажность
<input type="text"/>	<input type="text"/>

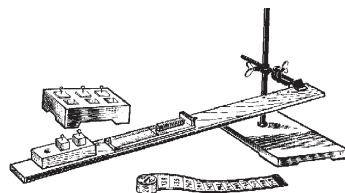
- 13** Проволочная рамка движется в неоднородном магнитном поле с силовыми линиями, входящими в плоскость листа, в случае А со скоростью \vec{v}_1 , в случае Б со скоростью \vec{v}_2 (см. рисунок).



Плоскость рамки остается перпендикулярной линиям вектора магнитной индукции. В каком случае в рамке возникает ток (только в случае А, только в случае Б, в обоих случаях, ни в одном из случаев)? Ответ запишите словами.

Ответ: _____.

- 14** 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?



Показания 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

Ответ: _____ %.

15

Лучи от двух лазеров, свет которых соответствует длинам волн l и $1,5l$, поочередно направляются перпендикулярно плоскости дифракционной решетки. Чему равно расстояние между первыми дифракционными максимумами на удаленном экране во втором случае? (Ответ дайте в единицах аналогичного расстояния в первом случае).

Ответ: _____.

16

Яблоко падает с яблони на землю. Выберите два верных утверждения о характере изменения в процессе падения скорости яблока, его ускорения и его потенциальной энергии относительно земли.

- 1) скорость и ускорение увеличиваются
- 2) потенциальная энергия уменьшается, а скорость увеличивается
- 3) потенциальная энергия и скорость не изменяются
- 4) ускорение и скорость не изменяются
- 5) ускорение не изменяется

Ответ:

--	--

17

Конденсатор, входящий в состав колебательного контура, зарядили и отсоединили от источника напряжения. После этого расстояние между пластинами конденсатора уменьшили. Как это повлияло на емкость конденсатора и частоту электромагнитных колебаний в контуре? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличилась
- 2) уменьшилась
- 3) не изменилась

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Емкость конденсатора	Частота колебаний

18

Установите соответствие между некоторыми свойствами вещества и его агрегатным состоянием. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

- А) расстояние между молекулами намного больше размеров самих молекул
- Б) вещество принимает форму сосуда, в который его помещают

АГРЕГАТНОЕ СОСТОЯНИЕ

- 1) жидкость
- 2) газ
- 3) твердое тело
- 4) плазма
- 5) аморфное тело

Ответ:

А	Б

- 19 Чему равно число нейтронов и число протонов в нейтральном атоме?

Число нейтронов	Число протонов

- 20 Чему равна полная мощность элемента с внутренним сопротивлением 2 Ом, если сопротивление внешней цепи равно 4 Ом, а напряжение на зажимах элемента составляет 6 В?

Ответ: _____ Вт.

- 21 Как изменяются массовое число M и порядковый номер элемента Z , если из ядра элемента выбрасывается протон?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличится на 1
- 2) уменьшится на 1
- 3) не изменится

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

M	Z

- 22 Какое количество α - и β -распадов радиоактивного ${}_{92}^{238}\text{U}$ приводит к образованию ${}_{82}^{236}\text{Pb}$?

Количество α -распадов	Количество β -распадов

- 23 Радиопередатчик работает на частоте 100 кГц. Что произойдет с импульсом, энергией и скоростью фотонов, излучаемых радиопередатчиком, если увеличить частоту излучения? Выберите два верных утверждения о поведении этих характеристик.

- 1) Импульс и энергия фотонов увеличатся.
- 2) Энергия и скорость фотонов уменьшатся.
- 3) Скорость фотонов не изменится.
- 4) Импульс и энергия фотонов уменьшатся.
- 5) Импульс фотонов не изменится.

Ответ:

--	--

Часть 2

Ответом к заданиям 24–26 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы, а затем перенесите в БЛАНК ОТВЕТОВ № 1 справа от номера соответствующего задания, начиная с первой клеточки. Каждый символ пишите в отдельной клеточке в соответствии с приведенными в бланке образцами. Единицы измерения физических величин писать не нужно.

- 24 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?

Ответ: _____ Дж.

- 25** Из баллона со сжатым водородом емкостью 10 л вследствие неисправности вентиля утекает газ. При температуре $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ давление было равно 5 МПа. Через некоторое время при температуре $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ манометр показал такое же давление. Сколько газа утекло? Ответ дать в граммах и округлить до одного знака после запятой.

Ответ: _____ г.

- 26** Квант света с энергией 14,5 эВ выбивает фотоэлектрон из атома водорода. Какова скорость электрона вдали от атома?

Ответ: _____ м/с.

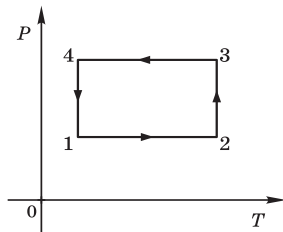
Не забудьте перенести все ответы в бланк ответов № 1 в соответствии с инструкцией по выполнению работы.

Для записи ответов на задания (27–31) используйте БЛАНК ОТВЕТОВ № 2. Запишите сначала номер задания (27, 28 и т. д.), а затем решение соответствующей задачи. Ответы записывайте четко и разборчиво.

- 27** С высоты $H = 40$ м свободно падает стальной шарик. Через время $t = 2$ с после начала падения он сталкивается с неподвижной плитой, плоскость которой наклонена под углом 30° к горизонту. На какую высоту h над поверхностью Земли поднимется шарик после удара? Удар шарика о плиту считать абсолютно упругим.

Полное правильное решение каждой из задач 28–31 должно содержать 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.

- 28** В системе координат p, T изображен цикл, соответствующий работе тепловой машины, у которой рабочим телом является идеальный газ (см. рисунок). Определите модуль отношения работ газа $\frac{\Delta A_{34}}{\Delta A_{12}}$ на участках 3–4 и 1–2.



- 29** Шарик массой $m = 0,15$ кг на нити длиной $L = 0,4$ м раскачивают так, что каждый раз, когда шарик проходит положение равновесия, на него в течение короткого промежутка времени $t = 0,01$ с действует сила $F = 0,2$ Н, направленная параллельно скорости. Через сколько полных колебаний шарик на нити отклонится на 60° ?

30 Горизонтально расположенный проводник длиной 1,5 м движется равноускоренно в вертикальном однородном магнитном поле, индукция которого равна 0,25 Тл и направлена перпендикулярно проводнику и скорости его движения. Начальная скорость проводника равна нулю, а его ускорение 8 м/с^2 . Определите электродвижущую силу индукции на концах проводника в тот момент, когда он переместился на 1 м.

31 Фотокатод освещается светом с частотой $\nu = 1,0 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$. Вылетевшие из катода электроны попадают в однородное магнитное поле с индукцией $B = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$ перпендикулярно линиям индукции этого поля. Работа выхода для материала фотокатода равна $A = 4,42 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. Определите максимальный радиус окружности R , по которой движутся электроны.

Единый государственный экзамен -

Бланк ответов №1



Заполнять гелевой или капиллярной ручкой ЧЕРНЫМИ чернилами ЗАГЛАВНЫМИ ПЕЧАТНЫМИ БУКВАМИ по следующим образцам:

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 , - Ä Å Æ Ö Ø Ë Ò Ó Ô Ù Ú Û Ü

Регион

Код
предмета

Название предмета

С правилами экзамена ознакомлен и согласен
Совпадение вариантов в задании
и бланке ответов подтверждаю
Подпись участника ЕГЭ строго внутри окошка.

Резерв 5

ВНИМАНИЕ! Все бланки и листы с контрольными измерительными материалами рассматриваются в комплекте.

Результаты выполнения заданий с ответом в краткой форме

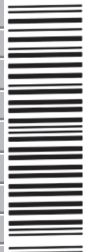
1		21	
2		22	
3		23	
4		24	
5		25	
6		26	
7		27	
8		28	
9		29	
10		30	
11		31	
12		32	
13		33	
14		34	
15		35	
16		36	
17		37	
18		38	
19		39	
20		40	

Замена ошибочных ответов на задания с ответом в краткой форме

-		-	
-		-	
-		-	

» Единый государственный экзамен

» *Бланк ответов №2*



Регион

Код
предмета

Название предмета

Резерв - 8

Дополнительный
бланк ответов №2

Лист №

Перепишите значение полей «регион», «код предмета», «название предмета» из БЛАНКА РЕГИСТРАЦИИ.

Отвечая на задание типа С, пишите аккуратно и разборчиво, соблюдая разметку страницы.

Не забудьте указать номер задания, на которое Вы отвечаете, например **С1**.

Условия задания переписывать не нужно.

ВНИМАНИЕ!

Все бланки и листы с контрольными измерительными материалами рассматриваются в комплекте.



Ответы

Вариант 1

Часть 1

№ задания	Ответ	№ задания	Ответ	№ задания	Ответ	№ задания	Ответ
1	0,5	7	31	13	левый аерхний	19	22
2	0,2	8	10	14	1	20	1,33
3	0	9	180	15	254	21	12
4	0,4	10	14300	16	34	22	$5,2 \pm 0,3$
5	1,6	11	24	17	32	23	23
6	23	12	21	18	65		

Часть 2

24. 10,1

25. 20

26. 50

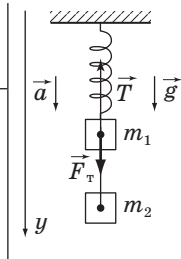
27. Дано:

Решение:

$$m_1 = 0,4 \text{ кг}$$

$$m_2 = 01, \text{ кг}$$

$$a_1 - ?$$



Согласно II закону Ньютона:

$$\vec{F} = m\vec{a};$$

$$\vec{F} = \vec{F}_\tau + \vec{N}$$

или

$$\vec{a}_1 m_1 = m_1 \vec{g} + (m_1 + m_2) \vec{g}. \quad (1)$$

$$\text{Проецируем на ось } y: a_1 m_1 = m_1 g - (m_1 + m_2) g. \quad (2)$$

Отсюда, ускорение направлено вниз и равно по величине $a_1 = g \frac{m_2}{m_1}$,

$$[a_1] = \frac{\text{м кг}}{\text{с}^2 \text{ кг}} = \frac{\text{м}}{\text{с}^2}. \quad a_1 = \frac{9,8 \cdot 0,1}{0,4} = 2,5 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right).$$

$$\text{Ответ: } 2,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

28. Дано:

$$M = 1 \text{ кг}$$

$$l = 90 \text{ см} = 0,9 \text{ м}$$

$$\alpha = 60^\circ, \cos \alpha = \frac{1}{2}$$

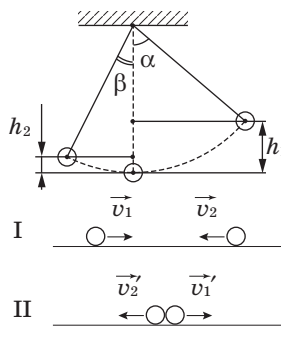
$$m = 10 \text{ г} = 0,01 \text{ кг}$$

$$\beta = 36^\circ$$

$$\cos \beta = \frac{7}{9} \approx 0,78$$

$$\Delta v - ?$$

Решение:



Согласно закону сохранения импульса:

$$M\vec{u} + m\vec{v}_1 = M\vec{u}' + m\vec{v}_2.$$

$$Mu - mv_1 = Mu' - mv_2;$$

$$M(u - u') = m(v_1 - v_2).$$

$$\text{Отсюда: } \Delta v = v_2 - v_1 = \frac{M}{m}(u' - u).$$

$E_{\text{п}} = E_{\text{к}}$ — закон сохранения энергии.

$$Mgh_1 = \frac{Mu^2}{2}; \quad h_1 = l(1 - \cos \alpha); \quad u^2 = 2gl(1 - \cos \alpha).$$

Отсюда, скорость шара до столкновения с пулей: $u = \sqrt{2gl(1 - \cos \alpha)}$.

Согласно закону сохранения энергии, после столкновения:

$$Mgh_2 = \frac{Mu'^2}{2}. \quad h_2 = l(1 - \cos \beta).$$

Отсюда, скорость шара после столкновения с пулей: $u' = \sqrt{2gl(1 - \cos \beta)}$.

$$|\Delta v| = \left| \frac{m}{M} \left\{ \sqrt{2gl(1 - \cos \alpha)} - \sqrt{2gl(1 - \cos \beta)} \right\} \right|.$$

$$|\Delta v| = \left| \frac{1}{0,01} \left\{ \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,9 \left(1 - \frac{1}{2}\right)} - \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,9(1 - 0,78)} \right\} \right| = 100 \text{ (м/с)}.$$

Ответ: 100 м/с.

29. Дано:

$\nu = 3$ моль

$$\frac{p_1}{p_2} = 3$$

$T_1 = 300$ К

$$k = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

Решение:

Первый закон термодинамики:

$$Q = \Delta U + A'.$$

$$Q_{23} = \Delta U_{23} + A_{23};$$

$$Q_{23} = \frac{3}{2} \nu k \Delta T_{23} + \nu k \Delta T_{23};$$

$$A_{23} = \nu k \Delta T_{23}.$$

$Q = ?$

$$Q_{23} = \frac{3}{2} \nu k \Delta T_{23} + \nu k \Delta T_{23}; \quad Q_{23} = \frac{5}{2} \nu k \Delta T_{23}.$$

Так как $T_3 = T_1$, то закон Шарля: $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$. Отсюда, согласно условию задачи:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} = 3. \text{ Следовательно: } T_2 = \frac{T_1}{3}.$$

Подставляем в формулу, получаем: $Q = \frac{5}{2} \nu k \left(T_1 - \frac{T_1}{3} \right); \quad Q = \frac{5}{2} \nu k T_1.$

$$[Q] = \frac{\text{моль} \cdot \text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{моль} \cdot \text{К}} = \text{Дж}. \quad Q = \frac{5}{2} \cdot 3 \cdot 8,31 \cdot 300 = 12\,465 \text{ (Дж)}.$$

Ответ: 12 465 Дж.

30. Дано:

$S = 0,05$ м²

$B_{1z} = 3$ Тл

$B_{2z} = -5$ Тл

$\Delta q = 0,04$ Кл

$R = ?$

Решение:

Закон электромагнитной индукции: $\varepsilon_i = \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|.$

$$\Delta \Phi = \Delta B_z S. \text{ Отсюда: } \varepsilon_i = S \left| \frac{\Delta B_z}{\Delta t} \right|.$$

$$\varepsilon_i = I_i R;$$

$$I_i = \frac{\Delta q}{\Delta t}; \quad I_i = \frac{S}{R} \left| \frac{\Delta B_z}{\Delta t} \right|; \quad |\Delta q| = I \Delta t = \frac{S}{\Delta q} |B_{2z} - B_{1z}|.$$

$$\text{Отсюда: } R = \frac{S}{\Delta q} |B_{2z} - B_{1z}| \cdot [R] = \frac{\text{м}^2 \cdot \text{Тл}}{\text{Кл}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{В}}{\text{А}} = \text{Ом}.$$

$$R = \frac{0,05(3+5)}{0,04} = 10 \text{ (Ом)}.$$

Ответ: 10 Ом.

31. Дано:

$$\lambda = 3 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$v = 851 \frac{\text{КМ}}{\text{с}} = 851 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\lambda_{\text{кр}} = ?$$

Решение:

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}.$$

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - h\nu_{\text{мин}}; \lambda = \frac{c}{\nu}.$$

$$\nu_{\text{мин}} = \frac{c}{\lambda_{\text{кр}}}; A_{\text{вых}} = \frac{ch}{\lambda_{\text{кр}}};$$

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - \frac{ch}{\lambda_{\text{кр}}}; \frac{ch}{\lambda_{\text{кр}}} = h\nu - \frac{mv^2}{2}; \lambda_{\text{кр}} = \frac{hc}{\frac{hc}{\lambda} - \frac{mv^2}{2}}.$$

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{\frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^{-7}} - \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 851^2 \cdot 10^6}{2}} = 600 \text{ (нм)}.$$

Ответ: 600 нм.

Вариант 2

Часть 1

№ задания	Ответ	№ задания	Ответ	№ задания	Ответ	№ задания	Ответ
1	5	7	25	13	ТОЛЬКО В случае А	19	2019
2	320	8	81	14	22	20	13,5
3	400	9	25	15	1,5	21	22
4	1,5	10	$5 \cdot 10^{11}$	16	25	22	86
5	32	11	36	17	12	23	13
6	31	12	12	18	21		

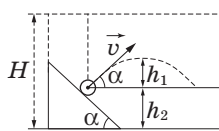
Часть 2

24. 9 25. 1,5 26. 9

27. Дано:

$$\begin{aligned} H &= 40 \text{ м} \\ t &= 2 \text{ с} \\ \alpha &= 30^\circ \\ h &= ? \end{aligned}$$

Решение:



$$\begin{aligned} \vec{v} &= \vec{v}_0 + \vec{g}t \\ \text{Oy: } v_p &= gt \sin 30^\circ \end{aligned}$$

Высота подъема шарика над плитой после удара: $h_1 = \frac{v_p^2}{2g}$.

$$h = h_1 + h_2; \quad h_2 = H - \frac{gt^2}{2}. \quad \text{Тогда: } h = H - \frac{gt^2}{2} + \frac{v_p^2}{2g}.$$

$$h = H - \frac{gt^2}{2} + \frac{gt^2 \sin^2 \alpha}{2g} \quad \text{или} \quad h = H + \frac{gt^2}{2}(\sin \alpha - 1). \quad h = 40 + \frac{9,8 \cdot 2^2}{2} \left(\frac{1}{4} - 1 \right) = 25 \text{ (м)}.$$

Ответ: 25 м.

28. Дано:

$$\begin{aligned} T_1 &= T_4 \\ T_2 &= T_3 \end{aligned}$$

Решение:

На основании анализа графиков процессов сделаем вывод о том, что процессы 3-4 и 1-2 — изобарные.

$$\left| \frac{\Delta A_{34}}{\Delta A_{12}} \right| = ?$$

Работа при изобарном процессе:

$$\Delta A_{34} = p_{34} \Delta V = p_{34} (V_4 - V_3) = \nu k (T_4 - T_3).$$

$$\Delta A_{12} = p_{12} \Delta V = \nu k (T_1 - T_2).$$

$$\left| \frac{\Delta A_{34}}{\Delta A_{12}} \right| = \left| \frac{\nu k (T_4 - T_3)}{\nu k (T_1 - T_2)} \right| = \left| \frac{T_4 - T_3}{T_1 - T_2} \right|; \quad \text{т.к. } T_4 = T_1, \text{ а } T_2 = T_3, \text{ то } \left| \frac{\Delta A_{34}}{\Delta A_{12}} \right| = \left| \frac{T_4 - T_3}{T_1 - T_2} \right| = 1.$$

$$\text{Ответ: } \left| \frac{\Delta A_{34}}{\Delta A_{12}} \right| = 1.$$

29. Дано:	Решение:
$m = 0,5 \text{ кг}$	Изменение импульса тела равно импульсу действующей на тело силы: $m\Delta v = F\Delta t$. Приращение скорости за один удар: $\Delta v = \frac{F\Delta t}{m}$. $v_N = 2N\Delta v$. Отсюда: $v_N = \frac{2NF\Delta t}{m}$.
$L = 0,4 \text{ м}$	
$t = 0,01 \text{ с}$	
$F = 0,2 \text{ Н}$	
$\alpha = 60^\circ$	
$N — ?$	

Закон сохранения энергии:

$$\frac{mv^2}{2} = mgh; \quad h = L(1 - \cos \alpha) = 2L \sin^2 \frac{\alpha}{2}; \quad \frac{mv^2}{2} = 2mgL \sin^2 \frac{\alpha}{2}.$$

Отсюда:

$$v^2 = 2gL \sin^2 \frac{\alpha}{2} = 4N^2 \Delta v^2 = \frac{4N^2 F^2 \Delta t^2}{m^2}; \quad N^2 = \frac{2gLm^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{4 \cdot F^2 \Delta t^2};$$

$$N = \sqrt{\frac{2gLm^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{4 \cdot F^2 \Delta t^2}}; \quad N = \frac{m \sin \frac{\alpha}{2}}{Ft} \sqrt{gL}. \quad N = \frac{0,15 \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{9,8 \cdot 0,4}}{0,2 \cdot 0,01} = 75 \text{ (колебаний)}.$$

Ответ: 75 колебаний.

30. Дано:	Решение:
$l = 1,5 \text{ м}$	$\varepsilon = \frac{-\Delta \Phi}{\Delta t}$. За малое время Δt : $\Delta \Phi = Bl\Delta x$. $ \varepsilon = \frac{Bl\Delta x}{\Delta t} = Blv$; $x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{v^2}{2a}$. Отсюда: $v = \sqrt{2ax}$; $ \varepsilon = Bl\sqrt{2ax}$.
$B = 0,25 \text{ Тл}$	
$v_0 = 0$	
$a = 8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$	
$x = 1 \text{ м}$	
$\varepsilon — ?$	

$$|\varepsilon| = 0,25 \cdot 1,5 \cdot \sqrt{2 \cdot 8 \cdot 1} = 1,5 \text{ (В)}.$$

Ответ: $|\varepsilon| = 1,5 \text{ В}$.

31. Дано:	Решение:
$\nu = 1,0 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$	Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта: $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$.
$B = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$	
$A = 4,42 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$	
$R — ?$	

Согласно II закону Ньютона: $F = ma$; $a = \frac{v^2}{R}$; $F = F_{\pi} = evB$.

$$\text{Тогда: } evB = \frac{mv^2}{R}.$$

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} evBR = h\nu - A. \text{ Следовательно: } R = \frac{\sqrt{m(2h\nu - 2A)}}{eB} = \frac{\sqrt{2m(h\nu - A)}}{eB}.$$

$$R = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} (6,63 - 4,42) \cdot 10^{-19}}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3,9 \cdot 10^{-4}} = 10^{-2} \text{ (м)} = 10 \text{ (мм)}.$$

Ответ: 10 мм.

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

Справочное издание
анықтамалық баспа

ЕГЭ. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СПРАВОЧНИК

Бальва Ольга Павловна
ЕГЭ
ФИЗИКА
УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СПРАВОЧНИК
(орыс тілінде)

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

ООО «Издательство «Эксмо»
123308, Россия, Москва, ул. Зорге, д. 1. Тел.: 8 (495) 411-68-86.
Home page: www.eksmo.ru E-mail: info@eksmo.ru
Өндіруші: «ЭКМО» АҚБ Баспасы, 123308, Мәскеу, Ресей, Зорге көшесі, 1 үй.
Тел.: 8 (495) 411-68-86.
Home page: www.eksmo.ru E-mail: info@eksmo.ru
Тауар белгісі: «Эксмо»

Интернет-магазин : www.book24.ru

Интернет-магазин : www.book24.kz

Интернет-дүкен : www.book24.kz

Импортёр в Республику Казахстан ТОО «РДЦ-Алматы».
Қазақстан Республикасындағы импорттаушы «РДЦ-Алматы» ЖШС.
Дистрибьютор и представитель по приему претензий на продукцию,
в Республике Казахстан: ТОО «РДЦ-Алматы»
Қазақстан Республикасында дистрибьютор және өнім бойынша арыз-талаптарды
қабылдаушының өкілі «РДЦ-Алматы» ЖШС,
Алматы қ., Домбровский көш., 3«а», литер Б, офис 1.
Тел.: 8 (727) 251-59-90/91/92; E-mail: RDC-Almaty@eksmo.kz
Өнімнің жарамдылық мерзімі шектелмеген.
Сертификация туралы ақпарат сайтта: www.eksmo.ru/certification
Сведения о подтверждении соответствия издания согласно законодательству РФ
о техническом регулировании можно получить на сайте Издательства «Эксмо»
www.eksmo.ru/certification
Өндірген мемлекет: Ресей. Сертификация қарастырылған

Дата изготовления / Подписано в печать 16.05.2019. Формат 84х108^{1/16}.

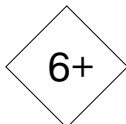
Печать офсетная. Усл. печ. л. 31,92.

Тираж экз. Заказ

ISBN 978-5-04-104162-5



9 785041 041625 >



EKSMO.RU
новинки издательства



**ЭФФЕКТИВНАЯ
ПОДГОТОВКА
К ЕГЭ**

ЕГЭ



ПОЛУЧИ ВЫСШИЙ БАЛЛ НА ЕГЭ!

ИЗДАНИЕ ПОМОЖЕТ:

- сократить время подготовки к ЕГЭ;
- закрепить знания в процессе обучения;
- отработать навыки выполнения заданий разных типов.

ФИЗИКА

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СПРАВОЧНИК

В серии «ЕГЭ. Универсальный справочник» выходят пособия по основным школьным предметам: русскому языку, литературе, математике, истории, обществознанию, биологии, химии, физике, информатике и английскому языку.

ISBN 978-5-04-104162-5



9 785041 041625 >



www.vk.com/eksmo_kids