

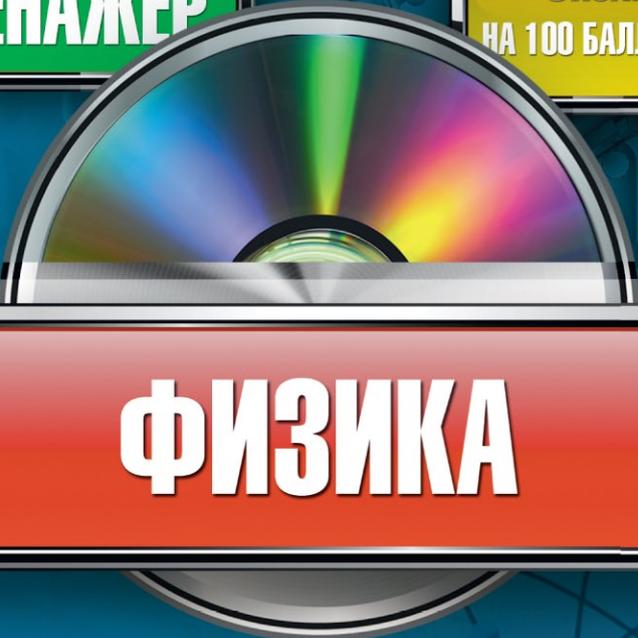
ТВОЙ РЕПЕТИТОР
ПО ФИЗИКЕ

ПОЛНЫЙ КУРС ПОДГОТОВКИ К ЕГЭ

М. Б. БОЙДЕНКО
О. Н. МИРОШКИНА

МУЛЬТИМЕДИЙНЫЙ
ТРЕНАЖЕР

ЭКЗАМЕН
НА 100 БАЛЛОВ!



ФИЗИКА

Яндекс
ege.yandex.ru

Аванта

Полный курс подготовки к ЕГЭ +
мультимедийный репетитор Яндекс

Бойденко М. В.
Мирошкина О. Н.

ФИЗИКА

Полный курс
подготовки к ЕГЭ + CD

АСТ
Москва

УДК 373:53
ББК 22.3.я72
Б77

Бойденко М. В.

Б77

ФИЗИКА. Полный курс подготовки к ЕГЭ (+CD) /
М. В. Бойденко, О. Н. Мирошкина — Москва: ООО «Изда-
тельство АСТ», 2014. — 256 с. (Полный курс подготовки
к ЕГЭ + мультимедийный репетитор Яндекс).

ISBN 978-5-17-079488-1

Пособие подготовлено в соответствии с обязательным мини-
мумом содержания основного общего и среднего (полного) общего
образования по физике, кодификатором элементов содержания по
физике для составления контрольных измерительных материалов
единого государственного экзамена и содержит весь материал, не-
обходимый школьнику для самостоятельной подготовки к ЕГЭ. При-
лагаемый компакт-диск, содержащий тесты по физике в формате
ЕГЭ, позволит школьнику организовать самостоятельную работу по
проверке собственных знаний. Программа автоматически проверяет
правильность выполнения экзаменационных заданий, что позволяет
контролировать уровень готовности к экзамену.

УДК 373:53
ББК 22.3.я72

© Бойденко М. В., Мирошкина О. Н., 2014
© ООО «Издательство АСТ», 2014

Содержание

Введение	8
1. МЕХАНИКА	
1.1. Кинематика	9
1.1.1. Механическое движение и его виды	9
1.1.2. Относительность механического движения	10
1.1.3. Скорость	12
1.1.4. Ускорение	12
1.1.5. Равномерное движение	13
1.1.6. Прямолинейное равноускоренное движение	15
1.1.7. Свободное падение (ускорение свободного падения)	17
1.1.8. Движение по окружности с постоянной по модулю скоростью	20
Основные формулы по теме «Кинематика»	22
1.2. Динамика	25
1.2.1. Инерциальные системы отсчета. Первый закон Ньютона	25
1.2.2. Принцип относительности Галилея	26
1.2.3. Масса тела. Плотность вещества	26
1.2.4. Сила	27
1.2.5. Принцип суперпозиции сил	27
1.2.6. Второй закон Ньютона	28
1.2.7. Третий закон Ньютона	29
1.2.8. Закон всемирного тяготения. Искусственные спутники Земли	30
1.2.9. Сила тяжести	31
1.2.10. Сила упругости. Закон Гука	33
1.2.11. Сила трения	36
1.2.12. Давление	37
Основные формулы по теме «Динамика»	38
1.3. Статика	39
1.3.1. Момент силы	39
1.3.2. Условия равновесия тел	40
1.3.3. Давление жидкости	42
1.3.4. Закон Паскаля	43
1.3.5. Закон Архимеда	44
1.3.6. Условия плавания тел	44
Основные формулы по теме «Статика»	45
1.4. Законы сохранения в механике	46
1.4.1. Импульс тела	46
1.4.2. Импульс системы тел	47
1.4.3. Закон сохранения импульса	48
1.4.4. Работа силы	51

1.4.5. Мощность	52
1.4.6. Работа как мера изменения энергии	53
1.4.7. Кинетическая энергия	54
1.4.8. Потенциальная энергия.....	54
1.4.9. Закон сохранения механической энергии.....	55
Основные формулы по теме «Законы сохранения в механике»	56
1.5. Механические колебания и волны	57
1.5.1. Гармонические колебания	58
1.5.2. Амплитуда и фаза колебаний.....	60
1.5.3. Период колебаний	61
1.5.4. Частота колебаний	61
1.5.5. Свободные колебания (математический и пружинный маятники).....	61
1.5.6. Вынужденные колебания.....	64
1.5.7. Резонанс	64
1.5.8. Длина волны	65
1.5.9. Звук	65
Основные формулы по теме «Механические колебания и волны»	66
2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА	
2.1. Молекулярная физика	68
2.1.1. Модели строения газов, жидкостей и твердых тел	69
2.1.2. Тепловое движение атомов и молекул вещества.....	70
2.1.3. Броуновское движение	71
2.1.4. Диффузия.....	72
2.1.5. Экспериментальные доказательства атомистической теории. Взаимодействие частиц вещества.....	72
2.1.6. Модель идеального газа	76
2.1.7. Связь между давлением и средней кинетической энергией теплового движения молекул идеального газа.....	76
2.1.8. Абсолютная температура.....	78
2.1.9. Связь температуры газа со средней кинетической энергией его частиц.....	79
2.1.10. Уравнение $p = nkT$	80
2.1.11. Уравнение Менделеева–Клапейрона	81
2.1.12. Изопроцессы: изотермический, изохорный, изобарный, адиабатный процессы.....	81
2.1.13. Насыщенные и ненасыщенные пары	86
2.1.14. Влажность воздуха	88
2.1.15. Изменение агрегатных состояний вещества: испарение и конденсация, кипение жидкости	89
2.1.16. Изменение агрегатных состояний вещества: плавление и кристаллизация	91
2.1.17. Изменение энергии в фазовых переходах	92
Основные формулы по теме «Молекулярная физика»	94

2.2. Термодинамика	95
2.2.1. Внутренняя энергия.....	95
2.2.2. Тепловое равновесие	96
2.2.3. Теплопередача.....	97
2.2.4. Количество теплоты. Удельная теплоемкость вещества	98
2.2.5. Работа в термодинамике.....	99
2.2.6. Уравнение теплового баланса	99
2.2.7. Первый закон термодинамики	100
2.2.8. Второй закон термодинамики	102
2.2.9. КПД тепловой машины	103
2.2.10. Принципы действия тепловых машин	104
2.2.11. Проблемы энергетики и охрана окружающей среды	105
Основные формулы раздела «Термодинамика»	107
3. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА	
3.1. Электрическое поле	109
3.1.1. Электризация тел	109
3.1.2. Взаимодействие зарядов. Два вида заряда	110
3.1.3. Закон сохранения электрического заряда	111
3.1.4. Закон Кулона.....	111
3.1.5. Действие электрического поля на электрические заряды.....	112
3.1.6. Напряженность электрического поля	114
3.1.7. Принцип суперпозиции электрических полей	115
3.1.8. Потенциальность электростатического поля	115
3.1.9. Потенциал электрического поля. Разность потенциалов.....	116
3.1.10. Проводники в электрическом поле.....	118
3.1.11. Диэлектрики в электрическом поле	119
3.1.12. Электрическая емкость. Конденсатор.....	121
3.1.13. Энергия электрического поля конденсатора	123
Основные формулы раздела «Электрическое поле»	123
3.2. Законы постоянного тока	125
3.2.1. Постоянный электрический ток. Сила тока	125
3.2.2. Постоянный электрический ток. Напряжение	126
3.2.3. Закон Ома для участка цепи.....	127
3.2.4. Электрическое сопротивление. Удельное сопротивление вещества	128
3.2.5. Электродвижущая сила. Внутреннее сопротивление источника тока	129
3.2.6. Закон Ома для полной электрической цепи.....	131
3.2.7. Параллельное и последовательное соединение проводников ..	132
3.2.8. Смешанное соединение проводников	134
3.2.9. Работа электрического тока. Закон Джоуля—Ленца.....	136
3.2.10. Мощность электрического тока	136
3.2.11. Носители свободных электрических зарядов в металлах, жидкостях и газах.....	137

3.2.12. Полупроводники. Собственная и примесная проводимость полупроводников. Полупроводниковый диод.....	141
Основные формулы раздела «Законы постоянного тока».....	145
3.3. Магнитное поле	147
3.3.1. Взаимодействие магнитов.....	149
3.3.2. Магнитное поле проводника с током.....	149
3.3.3. Сила Ампера.....	151
3.3.4. Сила Лоренца.....	153
Основные формулы раздела «Магнитное поле».....	155
3.4. Электромагнитная индукция	155
3.4.1. Явление электромагнитной индукции.....	155
3.4.2. Магнитный поток.....	157
3.4.3. Закон электромагнитной индукции Фарадея.....	158
3.4.4. Правило Ленца.....	159
3.4.5. Самоиндукция.....	160
3.4.6. Индуктивность.....	161
3.4.7. Энергия магнитного поля.....	161
Основные формулы раздела «Электромагнитная индукция».....	162
3.5. Электромагнитные колебания и волны	163
3.5.1. Свободные электромагнитные колебания. Колебательный контур.....	163
3.5.2. Вынужденные электромагнитные колебания. Резонанс.....	164
3.5.3. Гармонические электромагнитные колебания.....	166
3.5.4. Переменный ток. Производство, передача и потребление электрической энергии.....	168
3.5.5. Электромагнитное поле.....	173
3.5.6. Свойства электромагнитных волн.....	174
3.5.7. Различные виды электромагнитных излучений и их применение.....	176
Основные формулы раздела «Электромагнитные колебания и волны».....	179
3.6. Оптика	181
3.6.1. Прямолинейное распространение света.....	181
3.6.2. Закон отражения света.....	182
3.6.3. Построение изображений в плоском зеркале.....	183
3.6.4. Закон преломления света.....	184
3.6.5. Полное внутреннее отражение.....	186
3.6.6. Линзы. Оптическая сила линзы.....	187
3.6.7. Формула тонкой линзы.....	189
3.6.8. Построение изображений в линзах.....	190
3.6.9. Оптические приборы. Глаз как оптическая система.....	193
3.6.10. Интерференция света.....	195
3.6.11. Дифракция света.....	199
3.6.12. Дифракционная решетка.....	200
3.6.13. Дисперсия света.....	201
Основные формулы по теме «Оптика».....	202

4. ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

4.1. Инвариантность скорости света. Принцип относительности Эйнштейна	204
4.2. Полная энергия	206
4.3. Энергия покоя	207
4.4. Релятивистский импульс	207
Основные формулы раздела «Основы специальной теории относительности»	208

5. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

5.1. Корпускулярно-волновой дуализм	210
5.1.1. Гипотеза М. Планка о квантах	210
5.1.2. Фотоэффект	211
5.1.3. Опыты А. Г. Столетова	211
5.1.4. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта	213
5.1.5. Фотоны	214
5.1.6. Энергия фотона	215
5.1.7. Импульс фотона	215
5.1.8. Гипотеза де Бройля о волновых свойствах частиц. Корпускулярно-волновой дуализм	216
5.1.9. Дифракция электронов	218
Основные формулы по теме «Корпускулярно-волновой дуализм» ..	218
5.2. Физика атома	219
5.2.1. Планетарная модель атома	221
5.2.2. Постулаты Бора	222
5.2.3. Линейчатые спектры	225
5.2.4. Лазер	227
Основные формулы по теме «Физика атома»	229
5.3. Физика атомного ядра	230
5.3.1. Радиоактивность. Альфа-распад. Бета-распад. Гамма-излучение	230
5.3.2. Закон радиоактивного распада	233
5.3.3. Нуклонная модель ядра. Заряд ядра. Массовое число ядра	234
5.3.4. Энергия связи нуклонов в ядре. Ядерные силы	236
5.3.5. Ядерные реакции. Деление и синтез ядер	238
Основные формулы по теме «Физика атомного ядра»	243

Приложение 1. Методы научного познания	244
Приложение 2. Элементарные частицы	252
Литература	255

ВВЕДЕНИЕ

Данное пособие является результатом обобщения опыта работы по подготовке обучающихся к единому государственному экзамену по физике. Для успешного прохождения итоговой аттестации в форме ЕГЭ необходимо иметь высокий уровень теоретических знаний по предмету и уметь выполнять различные виды тестовых заданий. Пособие содержит краткий теоретический материал по курсу физики, необходимый для подготовки к ЕГЭ. При подготовке данного пособия авторы руководствовались следующими документами:

- Федеральным компонентом государственных образовательных стандартов среднего (полного) общего образования (Приказ Министерства образования РФ 31089 от 05.03.2004 г.);
- спецификацией КИМ единого государственного экзамена 2013 г. по физике;
- кодификатором элементов содержания по физике для составления КИМ единого государственного экзамена.

Данное пособие ориентировано на последовательное изложение теоретического материала, систематизацию знаний обучающихся по физике.

Важным видом деятельности является решение задач. Многие обучающиеся испытывают сложности при решении задач, им в помощь в пособие включены рекомендации и алгоритмы по решению задач по механике, молекулярно-кинетической теории, термодинамике и электродинамике.

В каждой теме специально выделены словом «**Важно!**» моменты, которые позволят избежать часто встречающихся ошибок и недочетов при выполнении различных заданий. В конце каждого раздела приведен перечень основных формул, знание которых необходимо.

Материал данного пособия предназначен как для самостоятельной подготовки к экзамену, так и для дополнительных занятий при подготовке к ЕГЭ. Структура пособия соответствует кодификатору элементов содержания по физике для составления КИМ единого государственного экзамена.

Материал разделен на пять тематических разделов, охватывающих весь курс физики средней школы. В приложении содержится материал «Методы научного познания», не включенный в кодификатор, но входящий в стандарт образования по физике и необходимый для успешной сдачи экзамена.

1. МЕХАНИКА

- ◆ **Механика** — это раздел физики, изучающий механическое движение тел.

1.1. КИНЕМАТИКА

- ◆ **Кинематика** — это раздел механики, в котором изучается механическое движение тел без учета причин, вызывающих это движение.

Материальная точка — тело, обладающее массой, размерами которого в данной задаче можно пренебречь, если

- расстояние, которое проходит тело, много больше его размера;
- расстояние от данного тела до другого тела много больше его размера;
- тело движется поступательно.

Система отсчета — это тело отсчета, связанная с ним система координат и прибор для измерения времени.

Траектория — это линия, которую описывает тело при своем движении.

Путь — это скалярная величина, равная длине траектории.

Перемещение — это вектор, соединяющий начальное положение тела с его конечным положением за данный промежуток времени.

Важно!

В процессе движения путь может только увеличиваться, а перемещение как увеличиваться, так и уменьшаться, например, когда тело поворачивает обратно.

При прямолинейном движении в одном направлении путь равен модулю перемещения, а при криволинейном — путь больше перемещения.

Перемещение на замкнутой траектории равно нулю.

Основная задача механики — определить положение тела в пространстве в любой момент времени.

1.1.1. Механическое движение и его виды

- ◆ **Механическое движение** — это изменение положения тела в пространстве относительно других тел с течением времени.

Механическое движение может быть:

1. по характеру движения
 - *поступательным* — это движение, при котором все точки тела движутся одинаково и любая прямая, мысленно проведенная в теле, остается параллельна сама себе;
 - *вращательным* — это движение, при котором все точки твердого тела движутся по окружностям, расположенным в параллельных плоскостях;
 - *колебательным* — это движение, которое повторяется в двух взаимно противоположных направлениях;
2. по виду траектории
 - *прямолинейным* — это движение, траектория которого прямая линия;
 - *криволинейным* — это движение, траектория которого кривая линия;
3. по скорости
 - *равномерным* — движение, при котором скорость тела с течением времени не изменяется;
 - *неравномерным* — это движение, при котором скорость тела с течением времени изменяется;
4. по ускорению
 - *равноускоренным* — это движение, при котором скорость тела увеличивается с течением времени на одну и ту же величину;
 - *равнозамедленным* — это движение, при котором скорость тела уменьшается с течением времени на одну и ту же величину.

1.1.2. Относительность механического движения

- ◆ **Относительность движения** — это зависимость характеристик механического движения от выбора системы отсчета.

Правило сложения перемещений

Перемещение тела относительно неподвижной системы отсчета равно векторной сумме перемещения тела относительно подвижной системы отсчета и перемещения подвижной системы отсчета относительно неподвижной системы отсчета:

$$\vec{S} = \vec{S}_1 + \vec{S}_2,$$

где S — перемещение тела относительно неподвижной системы отсчета;
 S_1 — перемещение тела относительно подвижной системы отсчета;
 S_2 — перемещение подвижной системы отсчета относительно неподвижной системы отсчета.

Правило сложения скоростей

Скорость тела относительно неподвижной системы отсчета равна векторной сумме скорости тела относительно подвижной системы отсчета и скорости подвижной системы отсчета относительно неподвижной системы отсчета:

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2,$$

где v — скорость тела относительно неподвижной системы отсчета;

v_1 — скорость тела относительно подвижной системы отсчета;

v_2 — скорость подвижной системы отсчета относительно неподвижной системы отсчета.

Относительная скорость

Важно! Чтобы определить скорость одного тела относительно другого, надо мысленно остановить то тело, которое мы принимаем за тело отсчета, а к скорости оставшегося тела прибавить скорость остановленного, изменив направление его скорости на противоположное.

Пусть v_1 — скорость первого тела, а v_2 — скорость второго тела.

Определим скорость первого тела относительно второго v_{12} :

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

Определим скорость второго тела относительно первого v_{21} :

$$\vec{v}_{21} = \vec{v}_2 + (-\vec{v}_1).$$

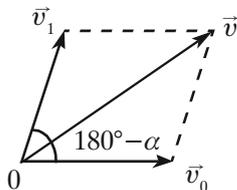
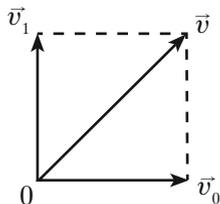
Следует помнить, что траектория движения тела и пройденный путь тоже относительны.

Если скорости направлены перпендикулярно друг к другу, то относительная скорость рассчитывается по теореме Пифагора:

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_0^2}.$$

Если скорости направлены под углом α друг к другу, то относительная скорость рассчитывается по теореме косинусов:

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_0^2 - 2v_1v_0 \cdot \cos(180^\circ - \alpha)}.$$



1.1.3. Скорость

- ◆ **Скорость** — это векторная величина, характеризующая изменение перемещения данного тела относительно тела отсчета с течением времени.

Обозначение — v , единицы измерения — $\frac{M}{C}$ ($\frac{KM}{ч}$).

$$1 \frac{KM}{ч} = \frac{1000 M}{3600 c}; \quad \text{например, } 36 \frac{KM}{ч} = \frac{36 \cdot 1000 M}{3600 c} = 10 \frac{M}{c}.$$

Средняя скорость — это векторная величина, равная отношению всего перемещения к промежутку времени, за которое это перемещение произошло:

$$\vec{v}_{cp} = \frac{\vec{S}}{t}.$$

Средняя путевая скорость — это скалярная величина, равная отношению всего пути, пройденного телом, к промежутку времени, за которое этот путь пройден:

$$v_{cp} = \frac{L}{t}.$$

Важно! Чтобы определить среднюю скорость на всем участке пути, надо время разделить на отдельные промежутки и все время представить в виде суммы этих промежутков.

Чтобы определить среднюю скорость за все время движения, надо путь разделить на отдельные участки и весь путь представить как сумму этих участков.

Мгновенная скорость — это скорость тела в данный момент времени или в данной точке траектории.

Мгновенная скорость направлена по касательной к траектории движения.

1.1.4. Ускорение

- ◆ **Ускорение** — это векторная физическая величина, характеризующая быстроту изменения скорости.

Обозначение — a , единица измерения — $\frac{M}{C^2}$.

В векторном виде:

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

где v — конечная скорость; v_0 — начальная скорость;

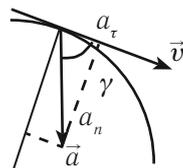
t — промежуток времени, за который произошло изменение скорости.

В проекциях на ось OX:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t},$$

$$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau,$$

где a_n — нормальное ускорение, a_τ — тангенциальное ускорение.



Тангенциальное ускорение сонаправлено с вектором линейной скорости, а значит, направлено вдоль касательной к кривой:

$$\vec{a}_\tau \uparrow \uparrow \vec{v}.$$

Нормальное ускорение перпендикулярно направлению вектора линейной скорости, а значит, и касательной к кривой:

$$\vec{a}_n \perp \vec{v}.$$

Ускорение характеризует быстроту изменения скорости, а скорость — векторная величина, которая имеет модуль (числовое значение) и направление.

Важно!

Тангенциальное ускорение характеризует быстроту изменения *модуля* скорости. Нормальное ускорение характеризует быстроту изменения *направления* скорости.

Если $a_\tau \neq 0$, $a_n = 0$, то тело движется по прямой;

если $a_\tau = 0$, $a_n = 0$, $v \neq 0$, то тело движется равномерно по прямой;

если $a_\tau = 0$, $a_n \neq 0$, тело движется равномерно по кривой;

если $a_\tau = 0$, $a_n = const$, то тело движется равномерно по окружности;

если $a_\tau \neq 0$, $a_n \neq 0$, то тело движется неравномерно по окружности.

1.1.5. Равномерное движение

◆ *Равномерное движение* — это движение, при котором тело за любые равные промежутки времени совершает равные перемещения.

Скорость при равномерном движении — величина, равная отношению перемещения к промежутку времени, за которое это перемещение произошло:

$$\vec{v} = \frac{\vec{S}}{t}, \quad \vec{v} = const.$$

Проекция вектора скорости на ось OX:

$$v_x = \frac{S_x}{t}, \quad v_x = const.$$

Проекция вектора скорости на координатную ось равна быстроте изменения данной координаты:

$$v_x = \frac{x - x_0}{t}.$$

График скорости (проекции скорости)

График скорости (проекции скорости) представляет собой зависимость скорости от времени:

$$v_x = v_x(t).$$

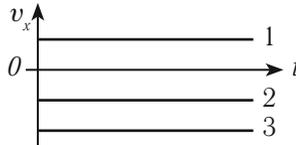


График скорости при равномерном движении — прямая, параллельная оси времени.

График 1 лежит над осью t , тело движется по направлению оси ОХ.

Графики 2 и 3 лежат под осью t , тело движется против оси ОХ.

Перемещение при равномерном движении — это величина, равная произведению скорости на время:

$$\vec{S} = \vec{v} t.$$

Проекция вектора перемещения на ось ОХ:

$$S_x = v_x t.$$

График перемещения (проекции перемещения)

График перемещения (проекции перемещения) представляет собой зависимость перемещения от времени:

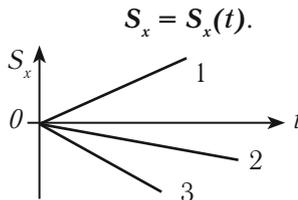
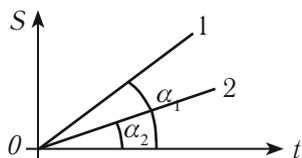


График перемещения при равномерном движении — прямая, выходящая из начала координат.

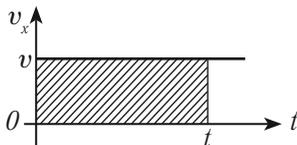
График 1 лежит над осью t , тело движется по направлению оси ОХ.

Графики 2 и 3 лежат под осью t , тело движется против оси ОХ.



$$v_1 > v_2, \text{ т.к. } \operatorname{tg} \alpha_1 > \operatorname{tg} \alpha_2$$

По графику зависимости скорости от времени можно определить перемещение, пройденное телом за время t . Для этого необходимо определить площадь фигуры под графиком (заштрихованной фигуры).



Координата тела при равномерном движении рассчитывается по формуле:

$$x = x_0 + v_x t.$$

График координаты представляет собой зависимость координаты от времени: $x = x(t)$.

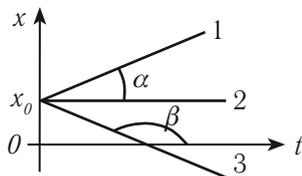


График координаты при равномерном движении — прямая.

График 1 направлен вверх, тело движется по направлению оси ОХ:

$$v_{1x} = \operatorname{tg} \alpha.$$

График 2 параллелен оси ОХ, тело покоится.

График 3 направлен вниз, тело движется против оси ОХ:

$$v_{3x} = \operatorname{tg} \beta.$$

1.1.6. Прямолинейное равноускоренное движение

◆ **Прямолинейное равноускоренное движение** — это движение по прямой, при котором тело движется с постоянным ускорением:

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

При движении с ускорением скорость может как увеличиваться, так и уменьшаться.

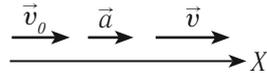
Скорость тела при равноускоренном движении рассчитывается по формуле:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t.$$

При разгоне (в проекциях на ось OX):

$$v_x = v_{0x} + a_x t,$$

$a > 0$, движение равноускоренное.



При торможении (в проекциях на ось OX):

$$v_x = v_{0x} - a_x t,$$

$a < 0$, движение равнозамедленное.

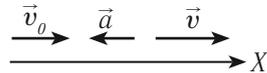


График ускорения (проекция ускорения) при равноускоренном движении представляет собой зависимость ускорения от времени:

$$a_x = a_x(t).$$

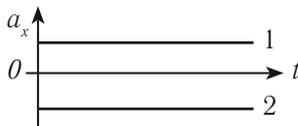


График ускорения при равноускоренном движении – прямая, параллельная оси времени.

График 1 лежит над осью t , тело разгоняется, $a_x > 0$.

График 2 лежит под осью t , тело тормозит, $a_x < 0$.

График скорости (проекция скорости) представляет собой зависимость скорости от времени:

$$v_x = v_x(t).$$

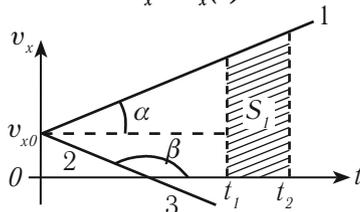


График скорости при равноускоренном движении – прямая.

График 1 направлен вверх, тело движется равноускоренно в положительном направлении оси OX, $v_{0x} > 0$, $a_x > 0$.

$$a_{1x} = \operatorname{tg} \alpha.$$

График 2 направлен вниз, тело движется равнозамедленно в положительном направлении оси ОХ, $v_{0x} > 0$, $a_x < 0$,

$$a_{2x} = \operatorname{tg} \beta.$$

График 3 направлен вниз, тело движется равноускоренно против оси ОХ, $v_{0x} < 0$, $a_x < 0$. По графику зависимости скорости от времени можно определить перемещение, пройденное телом за промежуток времени $t_2 - t_1$. Для этого необходимо определить площадь фигуры под графиком (заштрихованной фигуры).

Перемещение при равноускоренном движении рассчитывается по формулам:

$$S_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2},$$
$$S_x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}.$$

Перемещение в n-ую секунду при равноускоренном движении рассчитывается по формуле:

$$S_n = \frac{a}{2} (2n-1).$$

Координата тела при равноускоренном движении рассчитывается по формуле:

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

1.1.7. Свободное падение (ускорение свободного падения)

◆ **Свободное падение** — это движение тела в безвоздушном пространстве под действием только силы тяжести.

Все тела при свободном падении независимо от массы падают с одинаковым ускорением, называемым ускорением свободного падения.

Ускорение свободного падения всегда направлено к центру Земли (вертикально вниз).

Обозначение — g , единицы измерения — $\frac{M}{c^2}$.

Важно! $g = 9,8 \frac{M}{c^2}$, но при решении задач считается, что $g = 10 \frac{M}{c^2}$.

Движение тела по вертикали

Тело падает вниз, вектор скорости направлен в одну сторону с вектором ускорения свободного падения:

$$\vec{v} \uparrow \uparrow \vec{g},$$

$$h = v_0 t + \frac{gt^2}{2}, \quad v = v_0 + gt, \quad h = \frac{v^2 - v_0^2}{2g}.$$

Если тело падает вниз без начальной скорости, то $v_0 = 0$.

Время падения рассчитывается по формуле:

$$t_{\text{пад}} = \sqrt{\frac{2h_0}{g}}, \text{ где } h_0 \text{ — начальная высота.}$$

Тело брошено вверх:

$$h = v_0 t - \frac{gt^2}{2}, \quad v = v_0 - gt, \quad h = \frac{v^2 - v_0^2}{-2g}.$$

Если брошенное вверх тело достигло максимальной высоты, то $v = 0$.

Время подъема рассчитывается по формуле: $t_{\text{под}} = \frac{v_0}{g}$.

Движение тела, брошенного горизонтально

Движение тела, брошенного горизонтально, можно представить как суперпозицию двух движений:

1) равномерного движения по горизонтали со скоростью $v_0 = v_{0x}$;

2) равноускоренного движения по вертикали с ускорением свободного падения g и без начальной скорости $v_{0y} = 0$.

Уравнение скорости:

$$v_x = v_{0x} = \text{const}, \quad v_y = g t = -gt.$$

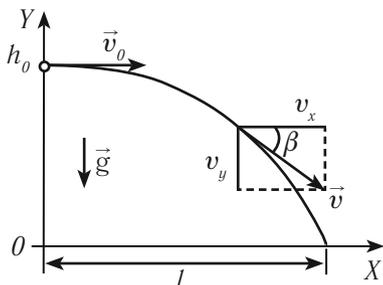
Уравнение координаты:

$$x = v_{0x} t = v_x t, \quad y = h_0 + \frac{g_y t^2}{2} = h_0 - \frac{gt^2}{2}.$$

Скорость тела в любой момент времени: $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$.

Дальность полета: $l = v_{0x} t_{\text{пад}} = v_{0x} \sqrt{\frac{2h_0}{g}}$.

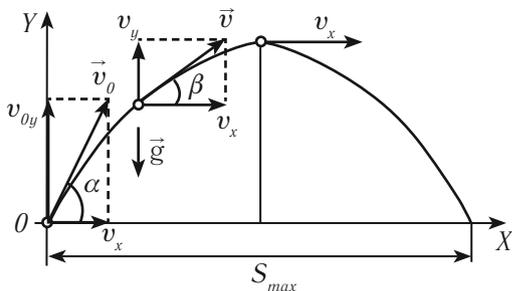
Угол между вектором скорости и осью OX: $\text{tg } \beta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{-gt}{v_{0x}}$.



Движение тела, брошенного под углом к горизонту (баллистическое движение)

Движение тела, брошенного под углом к горизонту, можно представить как суперпозицию двух движений:

- 1) равномерного движения по горизонтали;
- 2) равноускоренного движения по вертикали с ускорением свободного падения.



Уравнение скорости: $v_{0x} = v_x = v_0 \cos \alpha = \text{const}$,

$$v_{0y} = v_0 \sin \alpha, \quad v_y = v_0 \sin \alpha - gt.$$

Уравнение координаты:

$$x = v_0 \cos \alpha \cdot t, \quad y = v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{gt^2}{2}.$$

Скорость тела в любой момент времени: $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$.

Угол между вектором скорости и осью OX:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{v_0 \sin \alpha - gt}{v_0 \cos \alpha}.$$

Время подъема на максимальную высоту: $t_{\text{под}} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$.

Максимальная высота подъема: $h_{\text{max}} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$.

Время полета: $t_{\text{пол}} = 2t_{\text{под}} = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$.

Максимальная дальность полета: $L_{\text{max}} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$.

Важно!

При движении вверх вертикальная составляющая скорости будет уменьшаться, т. е. тело вдоль вертикальной оси движется равнозамедленно.

При движении вниз вертикальная составляющая скорости будет увеличиваться, т. е. тело вдоль вертикальной оси движется равноускоренно.

Скорость v_0 , с которой тело брошено с Земли, будет равна скорости, с которой оно упадет на Землю. Угол α , под которым тело брошено, будет равен углу, под которым оно упадет.

При решении задач на движение тела, брошенного под углом к горизонту, важно помнить, что в точке максимального подъема проекция скорости на ось ОУ равна нулю:

$$v_y = 0.$$

Это облегчает решение задач: $v_0 \sin \alpha = gt_{\text{под}}$, $t_{\text{под}} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$.

1.1.8. Движение по окружности с постоянной по модулю скоростью

◆ *Движение по окружности с постоянной по модулю скоростью* — простейший вид криволинейного движения.

Траектория движения — окружность. Вектор скорости направлен по касательной к окружности.

Модуль скорости тела с течением времени не изменяется, а ее направление при движении по окружности в каждой точке изменяется, поэтому движение по окружности — это движение с ускорением.

Ускорение, которое изменяет направление скорости, называется центростремительным.

Центростремительное ускорение направлено по радиусу окружности к ее центру.

Центростремительное ускорение — это ускорение, характеризующее быстроту изменения направления вектора линейной скорости.

Обозначение — $a_{\text{цс}}$, единицы измерения — $\frac{M}{c^2}$.

$$a_{\text{цс}} = \frac{v^2}{R}.$$

Движение тела по окружности с постоянной по модулю скоростью является периодическим движением, т. е. его координата повторяется через равные промежутки времени.

Период — это время, за которое тело совершает один полный оборот.

Обозначение — T , единицы измерения — с.

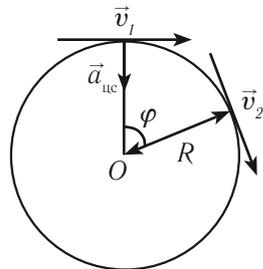
$$T = \frac{t}{N},$$

где N — количество оборотов, t — время, за которое эти обороты совершены.

Частота вращения — это число оборотов за единицу времени.

Обозначение — ν , единицы измерения — c^{-1} (Гц).

$$\nu = \frac{N}{t}.$$



Период и частота – взаимно обратные величины:

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

Линейная скорость – это скорость, с которой тело движется по окружности.

Обозначение – v , единицы измерения – $\frac{м}{с}$.

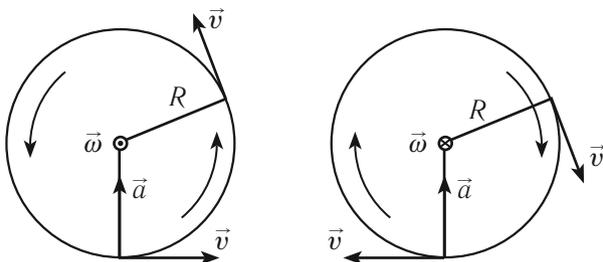
Линейная скорость направлена по касательной к окружности:

$$v = \frac{2\pi \cdot R}{T}, \quad \text{где } R \text{ – радиус окружности.}$$

Угловая скорость – это физическая величина, равная отношению угла поворота к времени, за которое поворот произошел.

Обозначение – ω , единицы измерения – $\frac{рад}{с}$.

$$\omega = \frac{\varphi}{t}, \quad \text{где } \varphi \text{ – угол поворота.}$$



Направление угловой скорости можно определить по правилу правого винта (буравчика).

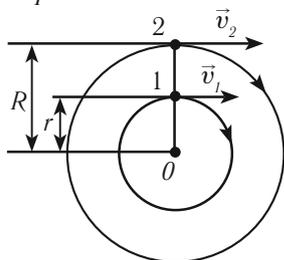
Если вращательное движение винта совпадает с направлением движения тела по окружности, то поступательное движение винта совпадает с направлением угловой скорости.

Связь различных величин, характеризующих движение по окружности с постоянной по модулю скоростью:

$$v = \omega R, \quad \omega = \frac{v}{R}, \quad a_{ис} = \omega^2 R, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}, \quad \omega = 2\pi\nu.$$

Важно!

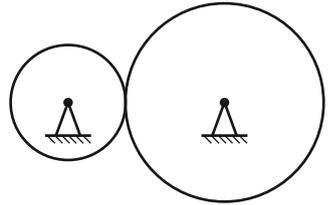
При равномерном движении тела по окружности точки, лежащие на радиусе, движутся с одинаковой угловой скоростью, т. к. радиус за одинаковое время поворачивается на одинаковый угол. А вот линейная скорость разных точек радиуса различна в



зависимости от того, насколько близко или далеко от центра они располагаются:

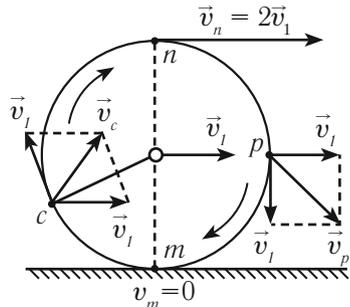
$$v_1 = \omega r, \quad v_2 = \omega R, \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{r}{R}.$$

Если рассматривать равномерное движение двух сцепленных тел, то в этом случае одинаковыми будут линейные скорости, а угловые скорости тел будут различны в зависимости от радиуса тела:



$$\omega_1 = \frac{v}{R_1}, \quad \omega_2 = \frac{v}{R_2}, \quad \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Когда колесо катится равномерно по дороге, двигаясь относительно нее с линейной скоростью v_1 , и все точки обода колеса движутся относительно его центра с такой же линейной скоростью v_1 , то относительно дороги мгновенная скорость разных точек колеса различна.



Мгновенная скорость нижней точки (m) равна нулю, мгновенная скорость в верхней точке (n) равна удвоенной скорости v_1 , мгновенная скорость точки (p), лежащей на горизонтальном радиусе, рассчитывается по теореме Пифагора, а мгновенная скорость в любой другой точке (c) — по теореме косинусов.

Основные формулы по теме «Кинематика»

$$\vec{S} = \vec{S}_1 + \vec{S}_2 \quad \text{— правило сложения перемещений}$$

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2 \quad \text{— правило сложения скоростей}$$

$$\vec{v}_{cp} = \frac{\vec{S}}{t} \quad \text{— средняя скорость}$$

$$v_{cp} = \frac{L}{t} \quad \text{— средняя путевая скорость}$$

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} \quad \text{— вектор ускорения}$$

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t} \quad \text{— проекция вектора ускорения}$$

$$\vec{v} = \frac{\vec{S}}{t} \quad - \text{ скорость равномерного движения}$$

$$v_x = \frac{S_x}{t} \quad - \text{ проекция скорости равномерного движения}$$

$$\vec{S} = \vec{v} t \quad - \text{ перемещение при равномерном движении}$$

$$S_x = v_x t \quad - \text{ проекция перемещения равномерного движения}$$

$$x = x_0 + v_x t \quad - \text{ координата тела при равномерном движении}$$

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t \quad - \text{ скорость тела при равноускоренном движении}$$

$$v_x = v_{0x} + a_x t \quad - \text{ проекция скорости при разгоне}$$

$$v_x = v_{0x} - a_x t \quad - \text{ проекция скорости при торможении}$$

$$S_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2} \quad - \text{ перемещение при равноускоренном движении}$$

$$S_x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} \quad - \text{ формула связи}$$

$$S_n = \frac{a}{2} \cdot (2n-1) \quad - \text{ перемещение в } n\text{-ую секунду при равноускоренном движении}$$

$$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2} \quad - \text{ координата тела при равноускоренном движении}$$

$$h = v_0 t + \frac{gt^2}{2} \quad - \text{ расстояние при движении по вертикали вниз}$$

$$v = v_0 + gt \quad - \text{ скорость при движении по вертикали вниз}$$

$$h = \frac{v^2 - v_0^2}{2g} \quad - \text{ формула связи при движении по вертикали вниз}$$

$$t_{\text{пад}} = \sqrt{\frac{2h_0}{g}} \quad - \text{ время падения}$$

$$h = v_0 t - \frac{gt^2}{2} \quad - \text{ перемещение при движении по вертикали вверх}$$

$$v = v_0 - gt \quad - \text{ скорость при движении по вертикали вниз}$$

$$h = \frac{v^2 - v_0^2}{-2g} \quad - \text{ формула связи при движении по вертикали вверх}$$

$$t_{\text{под}} = \frac{v_0}{g} \quad - \text{ время подъема}$$

$$l = v_{0x} \sqrt{\frac{2h_0}{g}} \quad \text{— дальность полета тела, брошенного горизонтально}$$

$$t_{\text{под}} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g} \quad \text{— время подъема при движении тела под углом к горизонту}$$

$$t_{\text{пол}} = 2t_{\text{под}} = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g} \quad \text{— время полета при движении тела под углом к горизонту}$$

$$h_{\text{max}} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} \quad \text{— максимальная высота подъема}$$

$$S_{\text{max}} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g} \quad \text{— максимальная дальность полета}$$

$$a_{\text{ц}} = \frac{v^2}{R} \quad \text{— центростремительное ускорение}$$

$$T = \frac{t}{N} \quad \text{— период}$$

$$\nu = \frac{1}{T} \quad \text{— частота}$$

$$v = \frac{2\pi \cdot R}{T} \quad \text{— линейная скорость при равномерном движении по окружности}$$

$$v = \omega R \quad \text{— связь линейной и угловой скоростей}$$

$$a_{\text{ц}} = \omega^2 R \quad \text{— связь центростремительного ускорения и угловой скорости}$$

$$\omega = \frac{\varphi}{t} \quad \text{— угловая скорость}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{— угловая скорость, выраженная через период}$$

$$\omega = 2\pi\nu \quad \text{— угловая скорость, выраженная через частоту}$$

1.2. ДИНАМИКА

- ◆ **Динамика** — это раздел механики, который рассматривает законы движения тел и те причины, которые его вызывают или изменяют.

Инерция — это свойство тела сохранять состояние покоя или прямолинейного и равномерного движения при отсутствии воздействия на него других тел или их компенсации.

1.2.1. Инерциальные системы отсчета. Первый закон Ньютона

- ◆ **Инерциальные системы отсчета** — это системы отсчета, относительно которых тела движутся с постоянной по модулю скоростью в отсутствие или при компенсации внешних воздействий.

Инерциальной системой отсчета является система отсчета, связанная с Землей.

Первый закон Ньютона

Существуют такие системы отсчета, относительно которых поступательно движущееся тело сохраняет свою скорость постоянной или покоится, если на него не действуют другие тела или их действие компенсируется:

$$\Sigma \vec{F} = 0, \vec{v} = \text{const.}$$

Физический смысл закона:

- из всех систем отсчета первый закон выделяет только инерциальные системы отсчета;
- закон утверждает, что будет происходить с телом, если на него не действуют другие тела или действие других тел скомпенсировано.

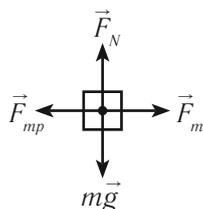
Согласно первому закону Ньютона, когда силы, действующие на движущееся тело, уравновесят друг друга, оно станет двигаться прямолинейно и равномерно, а если оно ранее покоилось, то и останется в покое.

Следствие

Если существует хотя бы одна инерциальная система отсчета, то существует и бесконечное множество таких систем.

Важно!

Скорость движения тела постоянна, если на него не действуют другие тела или действие других тел компенсируется.



1.2.2. Принцип относительности Галилея

Принцип относительности Галилея

Все законы механики имеют одинаковый вид во всех инерциальных системах отсчета.

Никакими механическими опытами нельзя отличить одну инерциальную систему отсчета от другой.

Связь координат точки в системах отсчета, движущихся друг относительно друга, описывается преобразованиями Галилея. Преобразования всех других кинематических величин являются их следствиями.

Важно!

Преобразования Галилея вместе с утверждением о независимости течения времени от движения отражают суть классических представлений о пространстве — времени. Согласно этим представлениям расстояния между телами одинаковы во всех системах отсчета и течение времени одинаково во всех инерциальных системах отсчета.

1.2.3. Масса тела. Плотность вещества

Причиной изменения скорости движения тела является его взаимодействие с другими телами. Все тела обладают свойством, которое называется инертностью.

Инертность — это способность тела изменять свою скорость не мгновенно, а за определенный промежуток времени.

- ◆ **Масса** — это скалярная физическая величина, являющаяся мерой инертности тела.

Чем больше масса тела, тем труднее изменить его скорость и тем сильнее оно притягивает другие тела.

Свойства массы:

- масса не зависит от того, движется тело или покоится;
- масса тела равна сумме масс его частей.

Обозначение — m , единицы измерения — кг ($г$, $мг$, $т$).

$$1 г = 10^{-3} кг, \quad 1 мг = 10^{-6} кг, \quad 1 т = 10^3 кг.$$

- ◆ **Плотность тела** — это скалярная физическая величина, равная отношению массы тела к его объему.

Обозначение — ρ , единицы измерения — $\frac{кг}{м^3}$.

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

1.2.4. Сила

- ◆ **Сила** — это векторная физическая величина, которая является количественной мерой взаимодействия тел, в результате которого они изменяют свою скорость или деформируются.

Сила характеризуется:

- модулем;
- направлением;
- точкой приложения.

Обозначение — F , единицы измерения — H (*Ньютон*).

1 Ньютон равен силе, которая телу массой 1 кг сообщает ускорение $1 \frac{M}{c^2}$:

$$1 H = 1 \frac{K\mathcal{E} \cdot M}{c^2}.$$

Существуют четыре вида сил различной природы:

- *электромагнитные силы* — силы, действующие между телами вследствие того, что тела состоят из движущихся заряженных частиц, между которыми действуют электрические и магнитные силы (сила трения, сила упругости);
- *гравитационные силы* — это силы притяжения одних тел к другим вследствие наличия у них массы (сила тяжести, сила тяготения);
- *ядерные силы* — это силы, действующие между протонами и нейтронами внутри атомов;
- *слабые силы* — это силы, удерживающие элементарные частицы от распада.

1.2.5. Принцип суперпозиции сил

Принцип суперпозиции сил

Если на тело действует несколько сил, то их можно заменить одной равнодействующей силой, которая равна векторной сумме всех сил, действующих на тело:

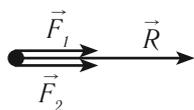
$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N.$$

Сложение сил

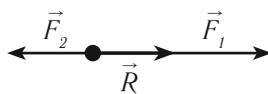
Равнодействующая сил равна геометрической сумме действующих на тело сил:

$$R = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i.$$

Силы направлены вдоль одной прямой:



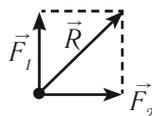
$$R = F_1 + F_2$$



$$R = F_1 - F_2$$

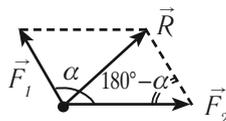
Силы направлены перпендикулярно друг другу:

$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$$



Силы направлены под углом α друг к другу:

$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2 F_1 F_2 \cos(180^\circ - \alpha)}$$



1.2.6. Второй закон Ньютона

Второй закон Ньютона

Равнодействующая сил, приложенных к телу, равна произведению массы тела на сообщаемое ему ускорение:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N = m\vec{a}$$

Физический смысл закона:

- закон связывает кинематические и динамические характеристики одного и того же тела;
- закон утверждает, что будет происходить с телом, если на него действуют другие тела.

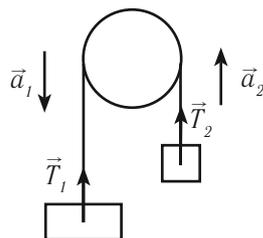
Важно!

Направление ускорения всегда совпадает с направлением равнодействующей сил. Второй закон Ньютона применим для сил любой природы.

Важно!

При рассмотрении движения связанных тел часто употребляется модель «невесомая нерастяжимая нить». Условие «невесомости» нити позволяет не рассматривать ее как отдельное тело и не писать для нее основное уравнение второго закона Ньютона. Поэтому силы натяжения нити, приложенные к связанным телам, оказываются равными по модулю. Условие «нерастяжимости» позволяет считать, что все связанные тела движутся с одинаковым ускорением:

$$T_1 = T_2 \text{ и } a_1 = a_2$$



Алгоритм применения второго закона Ньютона к решению задач

1. Запишите краткое условие задачи.
2. Определите характер движения.
3. Сделайте рисунок, на котором укажите все силы, действующие на тело, направление векторов скорости и ускорения.
4. Выберите инерциальную систему отсчета с удобным для нахождения проекций векторов направлением координатных осей.
5. Запишите второй закон Ньютона в векторной форме.
6. Спроецируйте его на выбранные координатные оси (сколько осей, столько и уравнений в системе).
7. Решите полученную систему уравнений относительно неизвестных величин.
8. Выполните действия с единицами измерения величин.
9. Запишите ответ.

1.2.7. Третий закон Ньютона

Третий закон Ньютона

Силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по модулю, противоположны по направлению и действуют вдоль прямой, соединяющей центры этих тел:

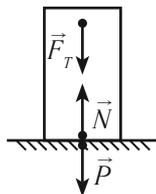
$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

Физический смысл закона:

- закон относится не к одному телу, а к системе тел;
- закон утверждает, что во всех случаях, когда одно тело действует на другое, имеет место не одностороннее действие, а взаимодействие тел;
- закон утверждает, что силы возникают парами, имеют одну и ту же природу, появляются и исчезают одновременно.

Важно!

Несмотря на то, что эти силы равны и противоположны по направлению, они друг друга не компенсируют, т. к. приложены к разным телам. Компенсировать друг друга могут только силы, приложенные к одному и тому же телу, если они равны по модулю и противоположны по направлению. Например, утверждают, что коробка покоится на столе потому, что сила тяжести, действующая на тело, согласно третьему закону Ньютона равна по модулю и противоположна по направлению силе реакции опоры, действующей на



нее со стороны стола. На самом деле равенство $\vec{F}_T + \vec{N} = \mathbf{0}$ является следствием второго закона Ньютона, а не третьего. Ускорение равно нулю, поэтому и сумма сил, действующих на коробку, равна нулю. Из третьего же закона Ньютона следует, что сила реакции опоры равна по модулю весу коробки, т. е. силе, с которой коробка действует на стол. Эти силы приложены к разным телам и направлены в разные стороны.

1.2.8. Закон всемирного тяготения. Искусственные спутники Земли

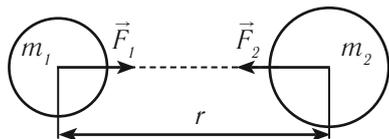
Всякое тело, имеющее массу, является источником гравитационного поля — поля тяготения.

Закон всемирного тяготения

Два тела притягиваются друг к другу с силой, модуль которой прямо пропорционален произведению масс этих тел, обратно пропорционален квадрату расстояния между ними и направлен вдоль линии, соединяющей эти тела:

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

где G — гравитационная постоянная.



Гравитационная постоянная численно равна силе притяжения между двумя телами массой по 1 кг, расположенными на расстоянии 1 м:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{H \cdot M^2}{K^2}.$$

Закон справедлив для:

- материальных точек;
- однородных шаров;
- материальной точки и шара;
- концентрических тел.

Искусственный спутник Земли — это тело, которое обращается вокруг Земли.

Траектория движения искусственных спутников — эллипс, но мы для упрощения считаем, что они движутся по окружности.

Линейная скорость такого движения есть первая космическая скорость.

Первая космическая скорость — это горизонтально направленная минимальная скорость, с которой тело могло бы двигаться вокруг Земли по круговой орбите, т. е. стать искусственным спутником Земли.

На рисунке R – радиус Земли, H – высота спутника над поверхностью Земли, r – высота орбиты спутника:

$$r = R + H.$$

$$v_1 = \sqrt{g \cdot (R + H)}, \text{ если } H = 0, \text{ то } v_1 = \sqrt{g R},$$

$$v_1 = 7,9 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R+H}}, \text{ где } M \text{ – масса Земли.}$$

$M = \rho V$, где ρ – плотность Земли, V – объем Земли.

$$V = \frac{4}{3} \pi \cdot R^3.$$

Период обращения искусственного спутника Земли можно рассчитать по формуле:

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

Вторая космическая скорость – это наименьшая скорость, которую надо сообщить телу, чтобы его орбита в поле тяготения Земли стала параболической, т. е. чтобы тело могло стать искусственным спутником Солнца:

$$v_2 = 11,2 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

Третья космическая скорость – это скорость, которую необходимо сообщить телу на Земле, чтобы оно покинуло пределы Солнечной системы:

$$v_3 = 16,7 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

Важно!

При решении задач следует помнить, что в законе всемирного тяготения расстояние берется от центра тела, а не от его поверхности.

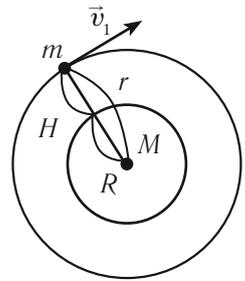
1.2.9. Сила тяжести

◆ *Сила тяжести* – это сила, с которой Земля притягивает к себе тела.

Сила тяжести равна произведению массы тела на ускорение свободного падения:

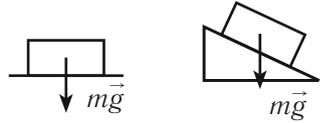
$$F_T = mg.$$

Точка приложения силы тяжести – центр тела.



Сила тяжести всегда направлена вертикально вниз.

Сила тяжести является частным случаем силы всемирного тяготения, поэтому



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

где M – масса Земли, m – масса тела, R – радиус Земли.

$$g = G \frac{M}{R^2}.$$

Ускорение свободного падения не зависит от массы тела, зависит от массы Земли и от расстояния от центра Земли до тела.

Важно!

У поверхности Земли ускорение свободного падения не везде одинаково. Оно зависит от географической широты: на полюсах больше, чем на экваторе. Дело в том, что земной шар немного сплюснут у полюсов. Экваториальный радиус Земли больше полярного на 21 километр.

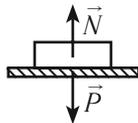
$$g_{\text{полюс}} = 9,83 \frac{\mathcal{M}}{c^2}, \quad g_{\text{экватор}} = 9,78 \frac{\mathcal{M}}{c^2}.$$

Вес и невесомость

- ♦ **Вес** – это сила, с которой тело вследствие притяжения к Земле действует на опору или подвес.

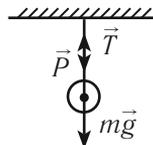
Обозначение – P , единица измерения – H .

Точка приложения веса – точка соприкосновения тела с опорой или подвесом. Вес тела всегда направлен против силы реакции опоры или силы натяжения. Модуль веса находится по третьему закону Ньютона.



$$\vec{P} = -\vec{N}$$

$$P = N$$



$$\vec{P} = -\vec{T}$$

$$P = T$$

Вес тела может изменяться:

- если тело покоится или движется прямолинейно и равномерно, то вес равен силе тяжести:

$$P = mg;$$

- если тело движется с ускорением, направленным вертикально вниз (движение вниз с ускорением или вверх с замедлением), то его вес меньше силы тяжести:

$$P = m(g-a);$$

если тело движется вниз с ускорением, равным ускорению свободного падения, то тело находится в состоянии невесомости.

Невесомость — это исчезновение веса при движении опоры вниз с ускорением свободного падения:

$$a = g, P = 0;$$

- если тело движется с ускорением, направленным вертикально вверх (движение вверх с ускорением или вниз с замедлением), то его вес больше силы тяжести:

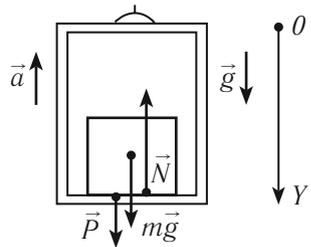
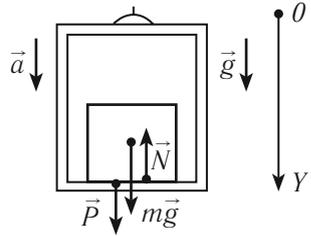
$$P = m(g+a).$$

При таком движении тело испытывает перегрузку.

Перегрузка — это величина, которая показывает, во сколько раз вес тела, поднимающегося с ускорением или опускающегося с замедлением, больше его веса в состоянии покоя.

Обозначение — n , единиц измерения нет:

$$n = \frac{m(g+a)}{mg}.$$



1.2.10. Сила упругости. Закон Гука

- ◆ **Сила упругости** — это сила, возникающая при деформации тела.

Деформация — это изменение формы и объема тела в результате неодинакового смещения различных его частей под действием силы.

Виды деформаций:

- упругие — это деформации, при которых после прекращения действия внешних сил тело принимает первоначальные размеры и форму (растяжение, сжатие, изгиб, кручение, сдвиг);
- пластические — это деформации, которые сохраняются в теле после прекращения действия внешних сил.

Основные величины, характеризующие деформацию

- *Абсолютное удлинение* — изменение размеров тела под действием силы.

Обозначение — x или Δl , единицы измерения — $м$.

$$x = \Delta l = l - l_0,$$

где l_0 — длина тела до действия силы (начальная длина),

l — длина тела во время действия силы.

- *Относительное удлинение* — это количественная мера степени деформации тела.

Обозначение — ε , единиц измерения нет.

Относительное удлинение равно отношению абсолютного удлинения к длине тела до действия силы (начальной длине тела):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}.$$

- *Механическое напряжение* — это сила, действующая на единицу площади поперечного сечения.

Обозначение — σ , единицы измерения — $Па$ (*Паскаль*):

$$\sigma = \frac{F}{S}.$$

Закон Гука

Сила упругости, возникающая при деформации тела, прямо пропорциональна удлинению тела и направлена в сторону, противоположную деформации:

$$F_{упр} = -k\Delta l, \text{ где } k \text{ — жесткость пружины.}$$

Знак « $-$ » в законе Гука говорит о том, что сила упругости всегда направлена противоположно смещению частиц тела при деформации. При решении задач им можно пренебречь.

Виды силы упругости

Сила реакции опоры — это сила, действующая на тело со стороны опоры.

Обозначение — N , единицы измерения — $Н$.

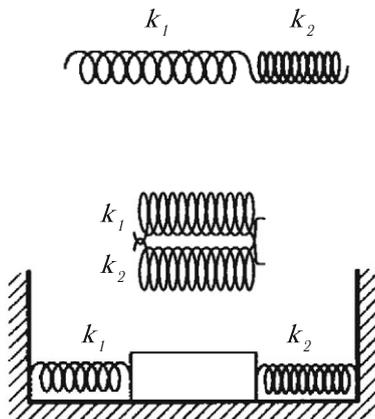
Сила натяжения — это сила, действующая на тело со стороны подвеса.

Обозначение — T , единицы измерения — $Н$.

Важно!

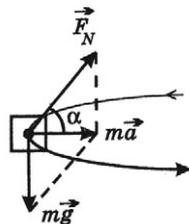
Соединения пружин:

- последовательное
 $F = F_1 = F_2, \quad x = x_1 + x_2,$
 $\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$ или $k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$;
- параллельное
 $x = x_1 = x_2, \quad F = F_1 + F_2,$
 $k = k_1 + k_2.$



Важно!

Если тело движется по окружности и нет силы трения между соприкасающимися поверхностями, то оно вынуждено наклоняться под углом к поверхности, по которой движется, иначе его центростремительное ускорение станет равным нулю и оно поедет по касательной к окружности согласно первому закону Ньютона. Чтобы удержаться на круге (сохранить равновесие), оно наклоняется к центру. В этом случае



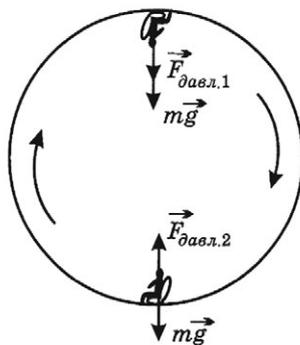
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{mg}{ma} \quad \text{или} \quad \sin \alpha = \frac{mg}{F_N}.$$

Если тело совершает мертвую петлю, то в верхней точке петли и сила тяжести, и сила нормального давления будут направлены вниз, поэтому

$$ma_u = mg + F_N.$$

В нижней точке мертвой петли сила нормального давления направлена вверх и больше силы тяжести. В этом случае

$$ma_u = F_N - mg.$$



1.2.11. Сила трения

Сила трения — это сила, возникающая при движении тел или при попытке сдвинуть их с места вследствие неровностей поверхностей соприкасающихся тел.

Сила трения действует на поверхности тел и затрудняет их перемещение относительно друг друга.

Сила трения всегда направлена противоположно относительному перемещению тела, т. е. против направления вектора скорости.

Виды трения

◆ **Внешнее трение (сухое)** — это трение, возникающее в плоскости касания двух соприкасающихся тел при их относительном перемещении.

- **Сила трения покоя** — это сила, которая возникает между соприкасающимися и покоящимися относительно друг друга поверхностями, а также при попытке сдвинуть тело с места.

Сила трения покоя саморегулирующаяся, т. е. в зависимости от внешних воздействий она может меняться от 0 до максимального значения.

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

где μ — коэффициент трения, N — сила реакции опоры.

Если в условии задачи не говорится, что сила трения покоя максимальна, то ее надо находить через другие силы по второму закону Ньютона.

- **Сила трения скольжения** — это сила, которая возникает между соприкасающимися и движущимися относительно друг друга телами.

$$F_{\text{тр. скольжения}} = \mu N.$$

- **Сила трения качения** — это сила, которая возникает между соприкасающимися и катящимися относительно друг друга телами.

◆ **Внутреннее трение (жидкое или вязкое)** — между слоями жидкости или газа, скорости которых меняются от одного слоя к другому.

Если движение происходит по гладкой поверхности, то сила трения равна нулю.

Способы уменьшения трения:

- выравнивание соприкасающихся поверхностей;
- смазка;
- установка шариковых и роликовых подшипников.

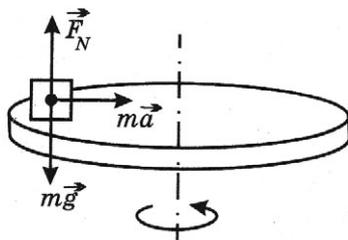
Важно!

Сила трения не зависит от площади соприкосновения трущихся поверхностей. Она зависит от относительной скорости тел. В этом ее главное отличие от сил тяготения и упругости, зависящих только от координат.

Важно!

Если тело удерживается на горизонтальном вращающемся диске силой трения, то

$$mg = F_N, \text{ а } ma_c = F_{тр}.$$



1.2.12. Давление

- ◆ **Давление** — это скалярная физическая величина, равная отношению модуля силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности.

Обозначение — p , единицы измерения — $Па$ (*Паскаль*):

$$p = \frac{F}{S}.$$

1 $Па$ — это давление, которое производит сила 1 $Н$ на перпендикулярную к ней поверхность площадью 1 $м^2$.

$$1 Па = 1 \frac{Н}{м^2}.$$

1 $мм рт. ст.$ (миллиметр ртутного столба) = 133,3 $Па$.

1 $атм$ (атмосфера) = 100 $кПа$.

Давление возрастает, если увеличивается сила давления или уменьшается площадь, на которую оказывается давление.

Давление уменьшается, если уменьшается сила давления или увеличивается площадь, на которую оказывается давление.

Основные формулы по теме «Динамика»

$\Sigma \vec{F} = 0, \vec{v} = const$	– первый закон Ньютона
$\rho = \frac{m}{V}$	– плотность вещества
$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N$	– принцип суперпозиции сил
$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N = m\vec{a}$	– второй закон Ньютона
$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$	– третий закон Ньютона
$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$	– закон всемирного тяготения
$v_1 = \sqrt{gR}$	– первая космическая скорость
$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R+H}}$	– первая космическая скорость
$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{(R+H)^3}{GM}}$	– период обращения искусственного спутника Земли
$F_r = mg$	– сила тяжести
$g = G \frac{M}{R^2}$	– ускорение свободного падения
$P = mg$	– вес тела
$P = m \cdot (g - a)$	– вес тела, движущегося с ускорением, направленным вертикально вниз
$P = m \cdot (g + a)$	– вес тела, движущегося с ускорением, направленным вертикально вверх
$n = \frac{m \cdot (g + a)}{mg}$	– перегрузка
$x = \Delta l = l - l_0$	– абсолютное удлинение
$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$	– относительное удлинение
$\sigma = \frac{F}{S}$	– механическое напряжение
$F_{упр} = -k\Delta l$	– закон Гука

$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$ — жесткость системы из двух пружин, соединенных последовательно

$k = k_1 + k_2$ — жесткость системы из двух пружин, соединенных параллельно

$(F_{\text{тр. покоя}})_{\text{max}} = \mu N$ — максимальная сила трения покоя

$F_{\text{тр. скольжения}} = \mu N$ — сила трения скольжения

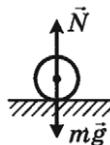
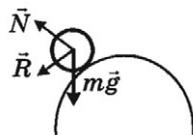
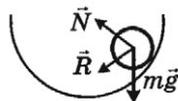
$p = \frac{F}{S}$ — давление

1.3. СТАТИКА

◆ **Статика** — это раздел механики, изучающий условия равновесия тел.

Виды равновесия тел

- *Устойчивое равновесие* — это равновесие, при котором тело, выведенное из положения равновесия и предоставленное самому себе, возвращается в прежнее положение.
- *Неустойчивое равновесие* — это равновесие, при котором тело, выведенное из положения равновесия и предоставленное самому себе, будет еще больше отклоняться от положения равновесия.
- *Безразличное равновесие* — это равновесие, при котором тело, выведенное из положения равновесия и предоставленное самому себе, не меняет своего положения.



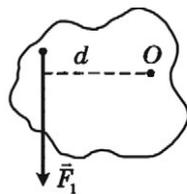
1.3.1. Момент силы

◆ **Момент силы** — это физическая величина, равная произведению модуля силы на ее плечо.

Обозначение — M , единицы измерения — $H \cdot м$.

$$M = Fd, \text{ где } d \text{ — плечо силы } F.$$

Плечо силы — это кратчайшее расстояние (перпендикуляр) от оси вращения до прямой, вдоль которой действует сила.

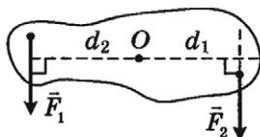


Обозначение — d или l , единицы измерения — $м$.

Знак момента силы

Если сила, приложенная к телу, вращает его по часовой стрелке, то момент силы положителен ($M > 0$):

$$M_2 > 0.$$



Если сила, приложенная к телу, вращает его против часовой стрелки, то момент силы отрицателен ($M < 0$):

$$M_1 < 0.$$

Момент силы равен нулю, если плечо силы, приложенной к телу, равно нулю.

1.3.2. Условия равновесия тел

Тело находится в равновесии, если

- 1) векторная сумма всех сил, действующих на тело, равна нулю;
- 2) алгебраическая сумма всех моментов сил, вращающих тело по часовой стрелке, равна алгебраической сумме моментов сил, вращающих его против часовой стрелки:

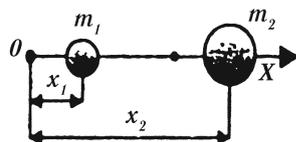
$$\Sigma \vec{F} = 0, \quad \Sigma M_{\text{по час. стр.}} = \Sigma M_{\text{против час. стр.}}$$

Центр тяжести — это точка внутри тела или вне его, относительно которой сумма моментов сил тяжести, действующих на отдельные его части, равна нулю.

Центр масс — геометрическая точка, положение которой характеризует распределение масс в теле:

$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^N m_i x_i}{\sum_{i=1}^N m_i},$$

$$X_c = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2}.$$



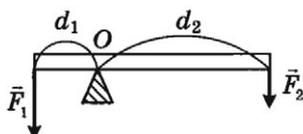
Важно!

Для твердого тела центр тяжести совпадает с центром масс.

Простые механизмы

◆ **Простые механизмы** — это приспособления, служащие для преобразования силы.

Рычаг — это простейшее механическое устройство, представляющее собой твердое тело (перекладину), вращающееся вокруг точки опоры.



Рычаг дает выигрыш в силе:

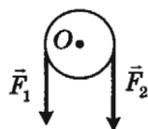
$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{d_2}{d_1}.$$

Блок — простое механическое устройство, представляющее собой колесо с желобом по окружности, вращающееся вокруг своей оси. Желоб предназначен для каната, цепи, ремня и т. п.

Блок бывает подвижный и неподвижный.

Неподвижный блок — это блок, ось которого закреплена.

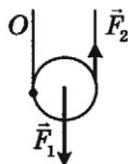
Неподвижный блок не дает выигрыша в силе, он используется для изменения направления действия силы.



Подвижный блок — это блок, имеющий свободную ось.

Подвижный блок дает выигрыш в силе в 2 раза:

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



«Золотое правило» механики

При использовании простых механизмов во сколько раз выигрываем в силе, во столько же раз проигрываем в расстоянии, т. е. простые механизмы выигрыша в работе не дают.

1.3.3. Давление жидкости

- ◆ **Давление жидкости** — это величина, равная произведению плотности жидкости на модуль ускорения свободного падения и на высоту столба жидкости.

$$p = \rho gh, \quad \text{где } \rho \text{ — плотность жидкости,} \\ h \text{ — высота столба жидкости.}$$

Сила давления жидкости — это сила, равная произведению давления жидкости на площадь поверхности:

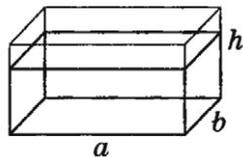
$$F = pS,$$

- на дно сосуда:

$$F_{\text{дно}} = \rho_{\text{ж}} g h a b,$$

- на боковую стенку:

$$F_{\text{бок}} = \rho_{\text{ж}} g h b h.$$



Сообщающиеся сосуды

Сообщающиеся сосуды — это сосуды, соединенные между собой ниже уровня жидкости.

Закон сообщающихся сосудов:

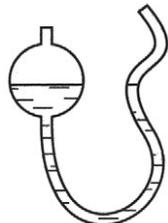
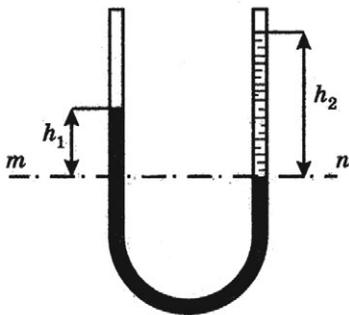
в неподвижных и открытых сообщающихся сосудах любой формы давление жидкости на любом горизонтальном уровне одинаково.

Следствия из закона сообщающихся сосудов:

- в неподвижных и открытых сообщающихся сосудах высоты столбов жидкостей, отсчитываемых от уровня, ниже которого жидкость однородна (уровня mn), обратно пропорциональны плотностям этих жидкостей:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1},$$

- в неподвижных и открытых сообщающихся сосудах однородная жидкость всегда устанавливается на одинаковом уровне независимо от формы сосудов.



Важно!

Давление, которое создает жидкость, находящаяся в равновесии при действии на нее силы тяжести, называют *гидростатическим*. Гидростатическое давление определяется формулой $p = \rho gh$.

Давление внутри жидкости на любой глубине складывается из атмосферного давления, или внешнего давления на жидкость, и гидростатического давления:

$$p = p_0 + \rho gh, \quad \text{где } p_0 \text{ — атмосферное давление.}$$

1.3.4. Закон Паскаля

Закон Паскаля

Давление, производимое на жидкость или газ, передается по всем направлениям одинаково.

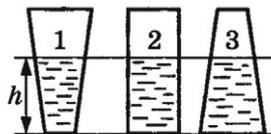
Следствие из закона Паскаля — гидростатический парадокс:

давление, производимое на дно сосуда, зависит только от высоты столба жидкости:

$$p_1 = p_2 = p_3.$$

Сила давления жидкости на дно разная, т.к. она зависит от площади дна:

$$S_1 < S_2 < S_3, \quad F_1 < F_2 < F_3.$$



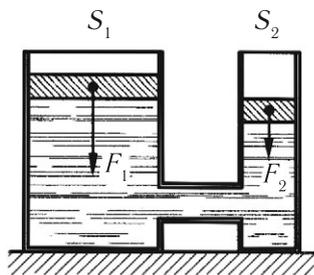
Гидравлический пресс — два сообщающихся сосуда, заполненные жидкостью и закрытые поршнями различной площади.

Гидравлический пресс дает выигрыш в силе, но проигрыш в длине пути поршня:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{h_2}{h_1}.$$

Силы, действующие на поршни гидравлического пресса, пропорциональны площадям этих поршней:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1}{S_2}.$$



Атмосферное давление — это давление, которое оказывает атмосфера на все находящиеся в ней предметы.

Атмосферное давление уменьшается с увеличением высоты подъема над Землей.

Нормальное атмосферное давление: $p_0 = 10^5 \text{ Па}$.

Приборы для измерения давления:

- барометры — приборы, предназначенные для измерения атмосферного давления (ртутный барометр, барометр-анероид);
- манометры — приборы, предназначенные для измерения давлений жидкостей и газов.

1.3.5. Закон Архимеда

- ◆ **Архимедова сила** — это выталкивающая сила, действующая на тело, погруженное в жидкость или газ.

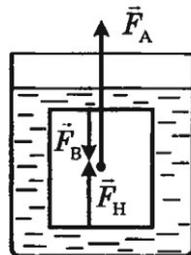
Причина возникновения выталкивающей силы — разница давлений жидкости или газа на верхнюю и нижнюю грани.

Архимедова сила всегда направлена перпендикулярно поверхности жидкости.

Архимедова сила равна разности веса тела в воздухе и веса тела в жидкости или газе:

$$F_a = P_1 - P_2, \quad \text{где } P_1 \text{ — вес тела в воздухе,}$$

$$P_2 \text{ — вес тела в жидкости или газе.}$$



Закон Архимеда

На тело, погруженное в жидкость или газ, действует выталкивающая сила, равная весу жидкости или газа, вытесненных телом:

$$F_a = P_{ж}.$$

Если тело полностью погружено в жидкость, то

$$F_a = \rho_{ж} g V_m, \quad \text{где } V_m \text{ — объем тела,}$$

погруженного в жидкость.



Если тело не полностью погружено в жидкость, то

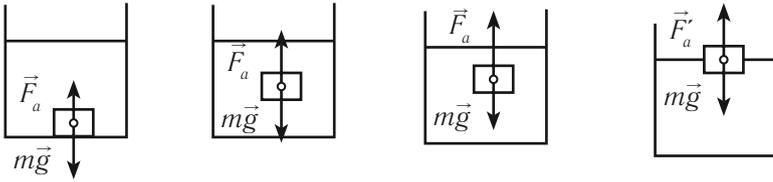
$$F_a = \rho_{ж} g V_{чт}, \quad \text{где } V_{чт} \text{ — объем части тела,}$$

погруженной в жидкость.



1.3.6. Условия плавания тел

На любое тело, погруженное в жидкость или газ, действуют две силы, направленные в противоположные стороны, — это сила тяжести и архимедова сила. Направление движения тела зависит от того, какая из этих сил больше по модулю.



Условия плавания тел

- Тело тонет:

$$mg > F_a, \quad \rho_{\text{т}} gV > \rho_{\text{ж}} gV, \quad \rho_{\text{т}} > \rho_{\text{ж}}.$$

- Тело плавает внутри жидкости:

$$F_{\text{тяги}} = F_a, \quad \rho_{\text{т}} gV = \rho_{\text{ж}} gV, \quad \rho_{\text{т}} = \rho_{\text{ж}}.$$

- Тело всплывает:

$$F_{\text{тяги}} < F_a, \quad \rho_{\text{т}} gV < \rho_{\text{ж}} gV, \quad \rho_{\text{т}} < \rho_{\text{ж}}.$$

- Тело плавает на поверхности жидкости:

$$F_{\text{тяги}} = F'_a, \quad \rho_{\text{т}} gV = \rho_{\text{ж}} gV_1, \quad \rho_{\text{т}} < \rho_{\text{ж}},$$

где V_1 — объем части тела, погруженной в жидкость.

Важно!

Выталкивающая сила действует на тела в жидкостях и газах, потому что сжаты силой притяжения к Земле. В состоянии невесомости эта сила не действует.

Основные формулы по теме «Статика»

$$M = Fd \quad \text{— момент силы}$$

$$\vec{\Sigma F} = 0, \quad \Sigma M_{\text{по час. стр.}} = \Sigma M_{\text{против час. стр.}} \quad \text{— условия равновесия тел}$$

$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^N m_i x_i}{\sum_{i=1}^N m_i} \quad \text{— центр масс}$$

$$p = \rho gh \quad \text{— давление жидкости}$$

$$F = pS \quad \text{— сила давления жидкости}$$

$$F_a = P_1 - P_2 \quad \text{— архимедова сила}$$

$$F_a = P_{\text{ж}}, \quad F_a = \rho_{\text{ж}} gV_m \quad \text{— закон Архимеда}$$

$$\rho_m > \rho_{\text{ж}} \quad \text{— тело тонет, } \rho_m = \rho_{\text{ж}} \quad \text{— тело плавает внутри жидкости,}$$

$$\rho_m < \rho_{\text{ж}} \quad \text{— тело всплывает.}$$

1.4. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

1.4.1. Импульс тела

- ◆ **Импульс тела** — это векторная физическая величина, равная произведению массы тела на его скорость:

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

Обозначение — p , единицы измерения — $\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$.

Импульс тела — это количественная мера движения тела.

Направление импульса тела всегда совпадает с направлением скорости его движения.

Изменение импульса тела равно разности конечного и начального значений импульса тела:

$$\Delta\vec{p} = \vec{p} - \vec{p}_0, \text{ где } \vec{p}_0 - \text{начальный импульс тела,} \\ \vec{p} - \text{конечный импульс тела.}$$

Если на тело действует нескомпенсированная сила, то его импульс изменяется. При этом изменение импульса тела равно импульсу подействовавшей на него силы.

Импульс силы — это количественная мера изменения импульса тела, на которое подействовала эта сила.

Обозначение — $F\Delta t$, единицы измерения — $\text{Н} \cdot \text{с}$.

Импульс силы равен изменению импульса тела:

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

Направление импульса силы совпадает по направлению с изменением импульса тела.

Второй закон Ньютона (силовая форма):

$$\vec{F} = m\vec{a}, \quad \vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}, \\ \vec{F} = m \cdot \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}, \quad \vec{F}\Delta t = m\vec{v} - m\vec{v}_0, \\ \vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}.$$

Важно!

Следует всегда помнить, что совпадают направления векторов:

- силы и ускорения: $\vec{F} \uparrow \uparrow \vec{a}$;

- импульса тела и скорости: $\vec{p} \uparrow \uparrow \vec{v}$;
- изменения импульса тела и силы: $\Delta \vec{p} \uparrow \uparrow \vec{F}$;
- изменения импульса тела и ускорения: $\Delta \vec{p} \uparrow \uparrow \vec{a}$.

1.4.2. Импульс системы тел

◆ **Импульс системы тел** равен векторной сумме импульсов тел, составляющих эту систему:

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^N \vec{p}_i.$$

При рассмотрении любой механической задачи мы интересуемся движением определенного числа тел. Совокупность тел, движение которых мы изучаем, называется *механической системой* или просто *системой*.

Рассмотрим систему, состоящую из трех тел. На тела системы действуют внешние силы, а между телами действуют внутренние силы.

F_1, F_2, F_3 — внешние силы, действующие на тела;

$F_{12}, F_{23}, F_{31}, F_{13}, F_{21}, F_{32}$ — внутренние силы, действующие между телами.

Вследствие действия сил на тела системы их импульсы изменяются. Если за малый промежуток времени сила заметно не меняется, то для каждого тела системы можно записать изменение импульса в виде уравнения:

$$\Delta(m_1 \vec{v}_1) = (\vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_1) \Delta t,$$

$$\Delta(m_2 \vec{v}_2) = (\vec{F}_{21} + \vec{F}_{23} + \vec{F}_2) \Delta t,$$

$$\Delta(m_3 \vec{v}_3) = (\vec{F}_{31} + \vec{F}_{32} + \vec{F}_3) \Delta t.$$

В левой части каждого уравнения стоит изменение импульса тела за малое время Δt .

Обозначим: v_0 — начальные скорости тел, а v' — конечные скорости тел.

Сложим левые и правые части уравнений.

$$\begin{aligned} \Delta(m_1 \vec{v}_1) + \Delta(m_2 \vec{v}_2) + \Delta(m_3 \vec{v}_3) &= m_1 \vec{v}'_1 - m_1 \vec{v}_{10} + m_2 \vec{v}'_2 - m_2 \vec{v}_{20} + m_3 \vec{v}'_3 - m_3 \vec{v}_{30} = \\ &= (m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2 + m_3 \vec{v}'_3) - (m_1 \vec{v}_{10} + m_2 \vec{v}_{20} + m_3 \vec{v}_{30}) = \vec{p}' - \vec{p}_0 = \Delta \vec{p}. \end{aligned}$$

$$\Delta \vec{p} = (\vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{21} + \vec{F}_{23} + \vec{F}_{31} + \vec{F}_{32} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3) \Delta t.$$

Но силы взаимодействия любой пары тел в сумме дают нуль.

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}, \quad \vec{F}_{13} = -\vec{F}_{31}, \quad \vec{F}_{23} = -\vec{F}_{32}.$$
$$\Delta\vec{p} = (\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3)\Delta t.$$

Важно!

Импульс системы тел могут изменить только внешние силы, причем изменение импульса системы пропорционально сумме внешних сил и совпадает с ней по направлению. Внутренние силы, изменяя импульсы отдельных тел системы, не изменяют суммарный импульс системы.

1.4.3. Закон сохранения импульса

Закон сохранения импульса

Векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, остается постоянной при любых взаимодействиях тел этой системы между собой:

$$\vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} + \dots = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots$$

Замкнутая система — это система, на которую не действуют внешние силы.

Абсолютно упругий удар — столкновение двух тел, в результате которого в обоих взаимодействующих телах не остается никаких деформаций.

При абсолютно упругом ударе взаимодействующие тела до и после взаимодействия движутся отдельно.

Закон сохранения импульса для абсолютно упругого удара:

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

Абсолютно неупругий удар — столкновение двух тел, в результате которого тела объединяются, двигаясь дальше как единое целое.

Закон сохранения импульса для абсолютно неупругого удара:

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

Реактивное движение — это движение, которое происходит за счет отделения от тела с некоторой скоростью какой-то его части.

Принцип реактивного движения основан на том, что истекающие из реактивного двигателя газы получают импульс. Такой же по модулю импульс приобретает ракета.

Для осуществления реактивного движения не требуется взаимодействия тела с окружающей средой, поэтому реактивное движение позволяет телу двигаться в безвоздушном пространстве.

Реактивные двигатели

Широкое применение реактивные двигатели в настоящее время получили в связи с освоением космического пространства. Используются они также для метеорологических и военных ракет различного радиуса действия. Кроме того, все современные скоростные самолеты оснащены воздушно-ракетными двигателями.

Реактивные двигатели делятся на два класса:

- ракетные;
- воздушно-реактивные.

В ракетных двигателях топливо и необходимый для его горения окислитель находятся непосредственно внутри двигателя или в его топливных баках.

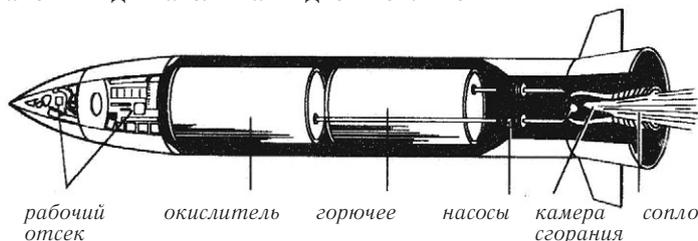
Ракетный двигатель на твердом топливе

При горении топлива образуются газы, имеющие очень высокую температуру и оказывающие давление на стенки камеры. Сила давления на переднюю стенку камеры больше, чем на заднюю, где находится сопло. Выходящие через сопло газы не встречают на своем пути стенку, на которую могли бы оказать давление. В результате появляется сила, толкающая ракету вперед.



Сопло — суженная часть камеры, служит для увеличения скорости истечения продуктов сгорания, что, в свою очередь, повышает реактивную силу. Сужение струи газа вызывает увеличение его скорости, так как при этом через меньшее поперечное сечение в единицу времени должна пройти такая же масса газа, что и при большем поперечном сечении.

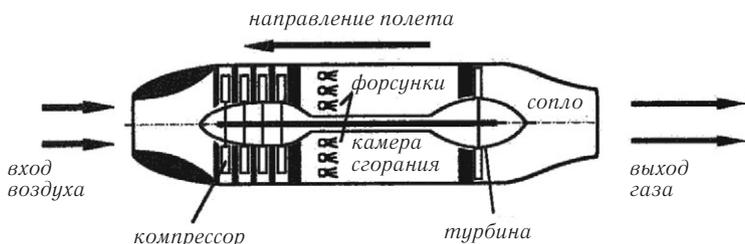
Ракетный двигатель на жидком топливе



В ракетных двигателях на жидком топливе в качестве горючего используют керосин, бензин, спирт, жидкий водород и др., а в качестве окислителя — азотную кислоту, жидкий кислород, перекись водорода и пр.

Горючее и окислитель хранятся отдельно в специальных баках и с помощью насосов подаются в камеру сгорания, где температура достигает $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давление до 50 атм. В остальном работает так же, как и двигатель на твердом топливе.

Воздушно-реактивный двигатель



В носовой части находится компрессор, засасывающий и сжимающий воздух, который затем поступает в камеру сгорания. Жидкое горючее (керосин) попадает в камеру сгорания с помощью специальных форсунок. Раскаленные газы выходят через сопло, вращают газовую турбину, приводящую в движение компрессор.

Основное отличие воздушно-реактивных двигателей от ракетных двигателей состоит в том, что окислителем для горения топлива служит кислород воздуха, поступающего внутрь двигателя из атмосферы.

Алгоритм применения закона сохранения импульса к решению задач:

1. Запишите краткое условие задачи.
2. Определите характер движения и взаимодействия тел.
3. Сделайте рисунок, на котором укажите направление векторов скоростей тел до и после взаимодействия.
4. Выберите инерциальную систему отсчета с удобным для нахождения проекций векторов направлением координатных осей.
5. Запишите закон сохранения импульса в векторной форме.
6. Спроецируйте его на выбранные координатные оси (сколько осей, столько и уравнений в системе).
7. Решите полученную систему уравнений относительно неизвестных величин.
8. Выполните действия единицами измерения величин.
9. Запишите ответ.

1.4.4. Работа силы

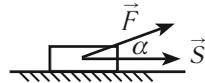
◆ **Механическая работа** – это скалярная векторная величина, равная произведению модулей вектора силы, действующей на тело, вектора перемещения и косинуса угла между этими векторами.

Обозначение – A , единицы измерения – *Дж* (*Джоуль*).

$$A = FS \cos \alpha.$$

1 *Дж* – это работа, которую совершает сила в 1 *Н* на пути в 1 *м*:

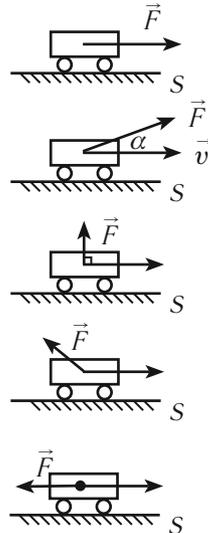
$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2}.$$



Механическая работа совершается, если под действием некоторой силы, направленной не перпендикулярно, тело перемещается на некоторое расстояние.

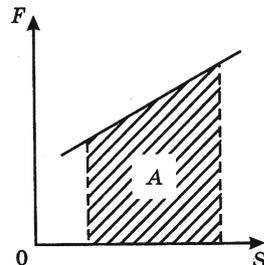
Зависимость механической работы от угла α

- $\alpha = 0^\circ$, $\cos \alpha = 1$, $A = FS$, $A > 0$;
- $0^\circ < \alpha < 90^\circ$, $A = FS \cos \alpha$, $A > 0$;
- $\alpha = 90^\circ$, $\cos \alpha = 0$, $A = 0$;
- $90^\circ < \alpha < 180^\circ$, $A = FS \cos \alpha$, $A < 0$;
- $\alpha = 180^\circ$, $\cos \alpha = -1$, $A = -FS$, $A < 0$.



Геометрический смысл механической работы

На графике зависимости $F = F(S)$ работа силы численно равна площади фигуры, ограниченной графиком, осью перемещения и прямыми, параллельными оси силы.



Формулы для вычисления работы различных сил

Работа силы тяжести:

$$A = mgh.$$

Работа силы упругости:

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

Коэффициент полезного действия механизма (КПД) — это физическая величина, равная отношению полезной работы, совершенной механизмом, ко всей затраченной при этом работе.

Обозначение — η , единицы измерения — %.

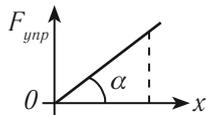
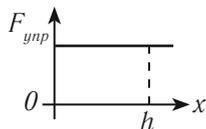
$$\eta = \frac{A_{\text{пол.}}}{A_{\text{зат.}}} \cdot 100\%.$$

$A_{\text{пол.}}$ — *полезная работа* — это та работа, которую нужно сделать;
 $A_{\text{зат.}}$ — *затраченная работа* — это та работа, что приходится делать на самом деле.

$$A_{\text{зат.}} > A_{\text{пол.}}$$

Важно!

КПД любого механизма не может быть больше 100%.



1.4.5. Мощность

◆ **Мощность** — это количественная мера быстроты совершения работы.

Обозначение — N , единицы измерения — $Вт$ (*Ватт*).

Мощность равна отношению работы к времени, за которое она была совершена:

$$N = \frac{A}{t}.$$

1 $Вт$ — это мощность, при которой за 1 $с$ совершается работа в 1 $Дж$:

$$1Вт = 1 \frac{Дж}{с} = 1 \frac{Н \cdot м}{с} = 1 \frac{кг \cdot м^2}{с^3}.$$

1 л. с. (*лошадиная сила*) = 735 $Вт$.

Связь между мощностью и скоростью равномерного движения:

$$N = \frac{A}{t} = \frac{FS \cos \alpha}{t}, \quad v = \frac{S}{t},$$
$$N = Fv \cos \alpha.$$

Таким образом, мощность равна произведению модуля вектора силы на модуль вектора скорости и на косинус угла между направлениями этих векторов.

Важно!

Если интервал времени стремится к нулю, то выражение представляет собой мгновенную мощность, определяемую через мгновенную скорость.

1.4.6. Работа как мера изменения энергии

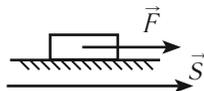
Если система тел может совершать работу, то она обладает энергией.

Работа и изменение кинетической энергии (теорема о кинетической энергии)

$$A = FS \cos \alpha, \quad \alpha = 0^0, \quad \cos 0^0 = 1, \quad A = FS;$$

$$F = ma, \quad S = \frac{v^2 - v_0^2}{2a};$$

$$A = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}, \quad A = \Delta W_k.$$



Если под действием силы тело совершило перемещение и вследствие этого его скорость изменилась, то работа силы равна изменению кинетической энергии.

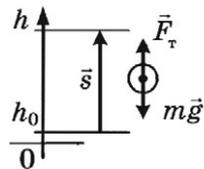
Силы, работа которых не зависит от формы траектории, называются *консервативными*.

Работа и изменение потенциальной энергии тела, поднятого над землей

$$A = FS \cos \alpha, \quad \alpha = 0^0, \quad \cos 0^0 = 1, \quad A = FS;$$

$$F = -mg, \quad S = h - h_0;$$

$$A = -(mgh - mgh_0), \quad A = -\Delta W_p.$$

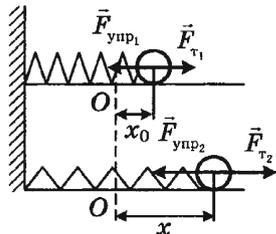


Работа силы тяжести равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком.

Работа и изменение потенциальной энергии упруго деформированного тела

$$A = F_{упр} S \cos \alpha, \quad \alpha = 180^0,$$

$$\cos 180^0 = -1, \quad A = -F_{упр} S;$$



$$F_{\text{упр}} = \frac{kx_0 + kx}{2}, \quad S = x - x_0;$$

$$A = -\left(\frac{kx^2}{2} - \frac{kx_0^2}{2}\right), \quad A = -\Delta W_p.$$

Работа силы упругости равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком.

1.4.7. Кинетическая энергия

- ◆ **Кинетическая энергия** — это энергия, которой обладает тело вследствие своего движения.

Обозначение — $W_k (E_k)$, единицы измерения — Дж.

Кинетическая энергия равна половине произведения массы тела на квадрат его скорости:

$$W_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Важно!

Так как кинетическая энергия отдельного тела определяется его массой и скоростью, то она не зависит от того, взаимодействует ли это тело с другими телами или нет. Значение кинетической энергии зависит от выбора системы отсчета, как и значение скорости. Кинетическая энергия системы тел равна сумме кинетических энергий отдельных тел, входящих в эту систему.

1.4.8. Потенциальная энергия

- ◆ **Потенциальная энергия** — это энергия взаимодействия тел или частей одного и того же тела.

Обозначение — $W_p (E_p)$, единицы измерения — Дж.

Потенциальная энергия тела, поднятого на некоторую высоту над землей, равна произведению массы тела, ускорения свободного падения и высоты, на которой он находится:

$$W_p = mgh.$$

Потенциальная энергия упруго деформированного тела равна половине произведения жесткости на квадрат удлинения:

$$W_p = \frac{kx^2}{2}.$$

Важно!

Величина потенциальной энергии зависит от выбора нулевого уровня. Нулевым называется уровень, на котором потенциальная энергия равна нулю. Нулевой уровень выбирается произвольно, исходя из удобства решения задачи.

1.4.9. Закон сохранения механической энергии

- ◆ **Полная механическая энергия** — это энергия, равная сумме кинетической и потенциальной энергий.

Обозначение — W (E), единицы измерения — Дж.

$$W = W_k + W_p.$$

Закон сохранения механической энергии

В замкнутой системе тел, между которыми действуют только консервативные силы, механическая энергия сохраняется, т. е. не изменяется с течением времени:

$$W_k + W_p = \text{const}.$$

$$W_{1k} + W_{1p} = W_{2k} + W_{2p}.$$

Если между телами системы действуют кроме сил тяготения и упругости другие силы, например сила трения или сопротивления, действие которых приводит к превращению механической энергии в тепловую, то в такой системе тел закон сохранения механической энергии не выполняется.

Важно!

В случае, если кроме консервативных сил (тяжести, упругости, тяготения) существуют еще и неконсервативные силы, например сила трения, а также внешние силы, то

$$A = A_{\text{конс}} + A_{\text{неконс}} + A_{\text{внеш}} = \Delta W_k.$$

Теорема о кинетической энергии справедлива для сил любой природы:

$$A_{\text{конс}} = -\Delta W_p, \text{ тогда}$$

$$A_{\text{неконс}} + A_{\text{внеш}} = \Delta W_k + \Delta W_p = \Delta W.$$

Если на систему тел действуют неконсервативные и внешние силы, то изменение полной энергии равно сумме работ неконсервативных и внешних сил.

Закон сохранения и превращения энергии

Энергия никогда не исчезает и не появляется вновь, она лишь превращается из одного вида в другой или передается от одного тела к другому.

Основные формулы по теме «Законы сохранения в механике»

$\vec{p} = m\vec{v}$	– импульс тела
$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}$	– импульс силы
$\vec{p} = \sum_{i=1}^N \vec{p}_i$	– импульс системы тел
$\vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} + \dots = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots$	– закон сохранения импульса
$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2$	– закон сохранения импульса для абсолютно упругого удара
$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{v}'$	– закон сохранения импульса для абсолютно неупругого удара
$A = FS\cos\alpha$	– механическая работа
$A = mgh$	– работа силы тяжести
$A = \frac{kx^2}{2}$	– работа силы упругости
$\eta = \frac{A_{\text{пол.}}}{A_{\text{зат.}}} \cdot 100\%$	– коэффициент полезного действия механизма (КПД)
$N = \frac{A}{t}$	– мощность
$N = Fv\cos\alpha$	– мощность тела, движущегося равномерно
$A = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$	– работа и изменение кинетической энергии (теорема о кинетической энергии)
$A = -(mgh - mgh_0)$	– работа и изменение потенциальной энергии тела, поднятого над землей
$A = -\left(\frac{kx^2}{2} - \frac{kx_0^2}{2}\right)$	– работа и изменение потенциальной энергии упруго деформированного тела
$W_k = \frac{mv^2}{2}$	– кинетическая энергия
$W_p = mgh, \quad W_p = \frac{kx^2}{2}$	– потенциальная энергия
$W_{1k} + W_{1p} = W_{2k} + W_{2p}$	– закон сохранения механической энергии для замкнутой системы
$W_k + W_{1p} = W_{2k} + W_{2p} + Q$	– закон сохранения механической энергии для незамкнутой системы

1.5. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

- ◆ **Механические колебания** — периодически повторяющееся перемещение материальной точки, при котором она движется по какой-либо траектории поочередно в двух противоположных направлениях относительно положения устойчивого равновесия.

Отличительными признаками колебательного движения являются:

- повторяемость движения;
- возвратность движения.

Для существования механических колебаний необходимо:

- наличие возвращающей силы — силы, стремящейся вернуть тело в положение равновесия (при малых смещениях от положения равновесия);
- наличие малого трения в системе.

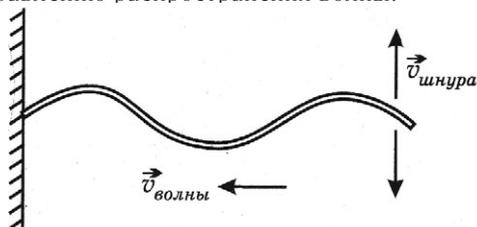
Механические волны — это процесс распространения колебаний в упругой среде.

Виды волн

- **Поперечная** — это волна, в которой колебание частиц среды происходит перпендикулярно направлению распространения волны.

Поперечная волна представляет собой чередование горбов и впадин.

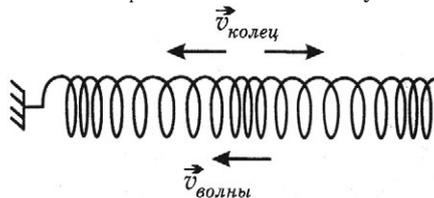
Поперечные волны возникают вследствие сдвига слоев среды относительно друг друга, поэтому они распространяются в твердых телах.



- **Продольная** — это волна, в которой колебание частиц среды происходит в направлении распространения волны.

Продольная волна представляет собой чередование областей уплотнения и разрежения.

Продольные волны возникают из-за сжатия и разрежения среды, поэтому они могут возникать в жидких, твердых и газообразных средах.



Важно!

Механические волны не переносят вещество среды. Они переносят энергию, которая складывается из кинетической энергии движения частиц среды и потенциальной энергии ее упругой деформации.

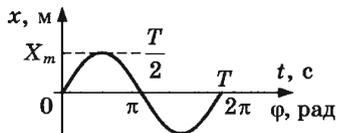
1.5.1. Гармонические колебания

- ◆ **Гармонические колебания** – простейшие периодические колебания, при которых координата тела меняется по закону синуса или косинуса:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad \text{или} \quad x = A \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где x – координата тела – смещение тела от положения равновесия в данный момент времени; A – амплитуда колебаний; $\omega t + \varphi_0$ – фаза колебаний; ω – циклическая частота; φ_0 – начальная фаза.

Если в начальный момент времени тело проходит положение равновесия, то колебания являются синусоидальными.



Если в начальный момент времени смещение тела совпадает с максимальным отклонением от положения равновесия, то колебания являются косинусоидальными.

Скорость гармонических колебаний

Скорость гармонических колебаний есть первая производная координаты по времени:

$$v = x',$$
$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0), \quad v = -A\omega \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где v – мгновенное значение скорости, т. е. скорость в данный момент времени.

Амплитуда скорости – максимальное значение скорости колебаний, это величина, стоящая перед знаком синуса или косинуса:

$$v_{\max} = A\omega.$$

Ускорение гармонических колебаний

Ускорение гармонических колебаний есть первая производная скорости по времени:

$$a = v',$$
$$v = -A\omega \sin(\omega t + \varphi_0), \quad a = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где a – мгновенное значение ускорения, т. е. ускорение в данный момент времени.

Амплитуда ускорения – максимальное значение ускорения, это величина, стоящая перед знаком синуса или косинуса:

$$a_{\max} = A\omega^2.$$

Если тело совершает гармонические колебания, то сила, действующая на тело, тоже изменяется по гармоническому закону:

$$F = ma,$$
$$F = -mA\omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где F — мгновенное значение силы, действующей на тело, т. е. сила в данный момент времени.

Амплитуда силы — максимальное значение силы, величина, стоящая перед знаком синуса или косинуса:

$$F_{\max} = mA\omega^2.$$

Тело, совершающее гармонические колебания, обладает кинетической или потенциальной энергией:

$$W_k = \frac{mv^2}{2},$$
$$W_k = \frac{m}{2} A^2 \omega^2 \sin^2(\omega t + \varphi_0),$$

где W_k — мгновенное значение кинетической энергии, т. е. кинетическая энергия в данный момент времени.

Амплитуда кинетической энергии — максимальное значение кинетической энергии, величина, стоящая перед знаком синуса или косинуса:

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

При гармонических колебаниях каждую четверть периода происходит переход потенциальной энергии в кинетическую и обратно.

В положении равновесия:

- потенциальная энергия равна нулю;
- кинетическая энергия максимальна.

При максимальном отклонении от положения равновесия:

- кинетическая энергия равна нулю;
- потенциальная энергия максимальна.

Полная механическая энергия гармонических колебаний

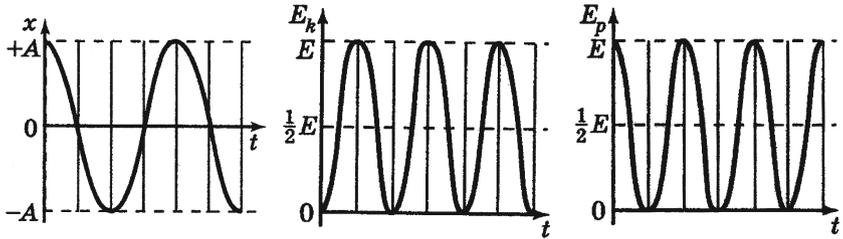
При гармонических колебаниях полная механическая энергия равна сумме кинетической и потенциальной энергий в данный момент времени:

$$W_{\text{полн}} = W_{k\max} = W_{p\max} = W_k + W_p,$$
$$W_p = W_{\text{полн}} - W_k.$$

Важно!

Следует помнить, что период колебаний кинетической и потенциальной энергий в 2 раза меньше, чем период колебаний координаты,

скорости, ускорения и силы. А частота колебаний кинетической и потенциальной энергий в 2 раза больше, чем частота колебаний координаты, скорости, ускорения и силы.



Графики зависимости кинетической, потенциальной и полной энергий всегда лежат выше оси времени.

Если сила сопротивления отсутствует, то полная энергия сохраняется. График зависимости полной энергии от времени есть прямая, параллельная оси времени (в отсутствие сил трения).

1.5.2. Амплитуда и фаза колебаний

- ◆ **Амплитуда колебаний** — модуль наибольшего смещения тела от положения равновесия.

Обозначение — A (X_{max}), единицы измерения — m .

- ◆ **Фаза колебаний** — это величина, которая определяет состояние колебательной системы в любой момент времени.

Обозначение — φ , единицы измерения — rad (радиан).

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

Фаза колебаний — это величина, стоящая под знаком синуса или косинуса. Она показывает, какая часть периода прошла от начала колебаний.

Фаза гармонических колебаний в процессе колебаний изменяется.

φ_0 — начальная фаза колебаний.

Начальная фаза колебаний — величина, которая определяет положение тела в начальный момент времени.

Важно!

Путь, пройденный телом за одно полное колебание, равен четырём амплитудам.

1.5.3. Период колебаний

- ◆ **Период колебаний** — это время одного полного колебания.
Обозначение — T , единицы измерения — c .

$$T = \frac{t}{N}.$$

Период гармонических колебаний — постоянная величина.

1.5.4. Частота колебаний

- ◆ **Частота колебаний** — это число полных колебаний в единицу времени.
Обозначение — ν , единицы времени — c^{-1} или $\Gamma\text{ц}$ (*Герц*).

$$\nu = \frac{N}{t}.$$

$1 \Gamma\text{ц}$ — это частота такого колебательного движения, при котором за каждую секунду совершается одно полное колебание:

$$1 \Gamma\text{ц} = 1 \frac{1}{c} = 1 c^{-1}.$$

Период и частота колебаний — взаимно обратные величины:

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

- ◆ **Циклическая частота** — это число колебаний за 2π секунд.
Обозначение — ω , единицы измерения — $\frac{\text{рад}}{c}$.

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

1.5.5. Свободные колебания (математический и пружинный маятники)

- ◆ **Свободные колебания** — колебания, которые совершает тело под действием внутренних сил системы за счет начального запаса энергии после того как его вывели из положения устойчивого равновесия.

Условия возникновения свободных колебаний:

- при выведении тела из положения равновесия должна возникнуть сила, стремящаяся вернуть его в положение равновесия;
- силы трения в системе должны быть достаточно малы.

При наличии сил трения свободные колебания будут затухающими.

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

◆ **Математический маятник** — это материальная точка, подвешенная на невесомой нерастяжимой нити.

Период колебаний математического маятника:

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

Частота колебаний математического маятника:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Циклическая частота колебаний математического маятника:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Максимальное значение скорости колебаний математического маятника:

$$v_{\max} = A \cdot \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Максимальное значение ускорения колебаний математического маятника:

$$a_{\max} = A \cdot \frac{g}{l}.$$

Период свободных колебаний математического маятника, движущегося вверх с ускорением или вниз с замедлением:

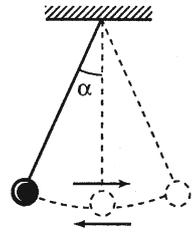
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g+a}}.$$

Период свободных колебаний математического маятника, движущегося вниз с ускорением или вверх с замедлением:

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

Период свободных колебаний математического маятника, горизонтально с ускорением или замедлением:

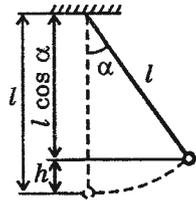
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g^2 + a^2}}.$$



Мгновенное значение потенциальной энергии математического маятника, поднявшегося в процессе колебаний на высоту h , определяется по формуле:

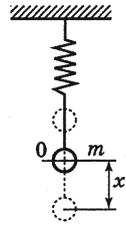
$$W_p = mgh,$$

$$h = l - l \cos \alpha = l(1 - \cos \alpha),$$



где l — длина нити, α — угол отклонения от вертикали.

- ◆ **Пружинный маятник** — это тело, подвешенное на пружине и совершающее колебания вдоль вертикальной или горизонтальной оси под действием силы упругости пружины.



Период колебаний пружинного маятника:

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

Частота колебаний пружинного маятника:

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

Циклическая частота колебаний пружинного маятника:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Максимальное значение скорости колебаний пружинного маятника:

$$v_{\max} = A \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Максимальное значение ускорения колебаний пружинного маятника:

$$a_{\max} = A \cdot \frac{k}{m}.$$

Мгновенную потенциальную энергию пружинного маятника можно найти по формуле:

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

$$W_p = \frac{k}{2} A^2 \cos^2(\omega t + \varphi_0).$$

Амплитуда потенциальной энергии — максимальное значение потенциальной энергии, величина, стоящая перед знаком синуса или косинуса:

$$W_{P_{\max}} = \frac{k}{2} A^2.$$

Важно!

Если маятник не является ни пружинным, ни математическим (физический маятник), то его циклическую частоту, период и частоту колебаний по формулам, применимым к математическому и пружинному маятнику, рассчитать нельзя. В данном случае эти величины рассчитываются из формулы силы, действующей на маятник, или из формул энергий.

1.5.6. Вынужденные колебания

- ◆ **Вынужденные колебания** — это колебания, происходящие под действием внешней периодически изменяющейся силы.

Вынужденные колебания, происходящие под действием гармонически изменяющейся внешней силы, тоже являются гармоническими и незатухающими. Их частота равна частоте внешней силы и называется частотой вынужденных колебаний.

1.5.7. Резонанс

- ◆ **Резонанс** — явление резкого возрастания амплитуды колебаний, которое происходит при совпадении частоты вынуждающей силы и собственной частоты колебаний тела.

Условие резонанса:

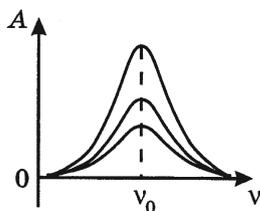
$$\omega_0 = \omega_{\text{вн.}} = \omega_{\text{рез.}} \Rightarrow A \text{ увеличивается.}$$

ν_0 — собственная частота колебаний маятника.

На рисунке изображены резонансные кривые для сред с разным трением. Чем меньше трение, тем выше и острее резонансная кривая.

Явление резонанса учитывается при периодически изменяющихся нагрузках в машинах и различных сооружениях.

Также резонанс используется в акустике, радиотехнике и т. д.



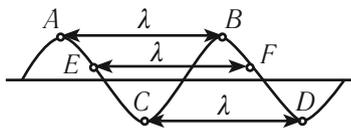
1.5.8. Длина волны

- ◆ **Длина волны** — это расстояние, на которое волна распространяется за один период, т. е. это кратчайшее расстояние между двумя точками среды, колеблющимися в одинаковых фазах.

Обозначение — λ , единицы измерения — м.

$$\lambda = vT, \quad \lambda = \frac{v}{\nu}, \quad \lambda = \frac{2\pi \cdot v}{\omega}.$$

Расстояние между соседними гребнями или впадинами в поперечной волне и между соседними сгущениями или разрежениями в продольной волне равно длине волны.



Скорость распространения волны — это скорость перемещения горбов и впадин в поперечной волне и сгущений или разрежений в продольной волне.

1.5.9. Звук

- ◆ **Звук** — это колебания упругой среды, воспринимаемые органом слуха.

Условия, необходимые для возникновения и ощущения звука:

- наличие источника звука;
 - наличие упругой среды между источником и приемником звука;
 - наличие приемника звука;
 - частота колебаний должна лежать в звуковом диапазоне;
 - мощность звука должна быть достаточной для восприятия.
- ◆ **Звуковые волны** — это упругие волны, вызывающие у человека ощущение звука, представляющие собой зоны сжатия и разрежения, передающиеся на расстояние с течением времени.

Классификация звуковых волн:

- инфразвук ($\nu < 16$ Гц);
- звуковой диапазон (16 Гц $< \nu < 20\,000$ Гц);
- ультразвук ($\nu > 20\,000$ Гц).

Скорость звука — это скорость распространения фазы колебания, т. е. области сжатия и разрежения среды.

$$v = \frac{\lambda}{T}, \quad v = \lambda\nu.$$

Скорость звука зависит

- от упругих свойств среды:
в воздухе — $331 \frac{M}{c}$, в воде — $1400 \frac{M}{c}$, в металле — $5000 \frac{M}{c}$;
- от температуры среды:
в воздухе при температуре $0^{\circ}C$ — $331 \frac{M}{c}$,
в воздухе при температуре $+15^{\circ}C$ — $340 \frac{M}{c}$.

Характеристики звуковой волны

- *Громкость* — это величина, характеризующая слуховые ощущения человека, зависящая от амплитуды колебаний в звуковой волне. Единицы измерения — *дБ (децибел)*.
- *Высота тона* — это величина, характеризующая слуховые ощущения человека, зависящая от частоты колебаний в звуковой волне. Чем больше частота, тем выше звук. Чем меньше частота, тем ниже звук.
- *Тембр* — это окраска звука.

Музыкальный звук — это звук, издаваемый гармонически колеблющимся телом. Каждому музыкальному тону соответствует определенная длина и частота звуковой волны.

Шум — хаотическая смесь тонов.

Основные формулы по теме

«Механические колебания и волны»

$x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$ — уравнение гармонических колебаний

$v = x'$, $v = -A\omega \sin(\omega t + \varphi_0)$ — скорость гармонических колебаний

$v_{\max} = A\omega$ — амплитуда скорости

$a = v'$, $a = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0)$ — ускорение гармонических колебаний

$a_{\max} = A\omega^2$ — амплитуда ускорения

$W_{\text{полн}} = W_{k\max} = W_{p\max} = W_k + W_p$ — полная механическая энергия гармонических колебаний

$\varphi = \omega t + \varphi_0$ — фаза колебаний

$T = \frac{t}{N}$, $T = \frac{1}{\nu}$ — период колебаний

$\nu = \frac{N}{t}, \nu = \frac{1}{T}$ — частота колебаний
 $\omega = 2\pi\nu, \omega = \frac{2\pi}{T}$ — циклическая частота
 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ — период колебаний математического маятника
 $\nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}$ — частота колебаний математического маятника
 $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$ — циклическая частота колебаний математического маятника
 $v_{\max} = A \cdot \sqrt{\frac{g}{l}}$ — максимальное значение скорости колебаний математического маятника
 $a_{\max} = A \cdot \frac{g}{l}$ — максимальное значение ускорения колебаний математического маятника
 $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ — период колебаний пружинного маятника
 $\nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$ — частота колебаний пружинного маятника
 $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ — циклическая частота колебаний пружинного маятника
 $v_{\max} = A \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}$ — максимальное значение скорости колебаний пружинного маятника
 $a_{\max} = A \cdot \frac{k}{m}$ — максимальное значение ускорения колебаний пружинного маятника
 $\lambda = \nu T, \lambda = \frac{v}{\nu}, \lambda = \frac{2\pi \cdot v}{\omega}$ — длина волны

2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

2.1. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

◆ *Молекулярная физика* — раздел физики, в котором свойства вещества изучаются на основе его молекулярного (микроскопического) строения.

Молекулярно-кинетической теорией (МКТ) называется теория, объясняющая строение и свойства тел движением и взаимодействием частиц, из которых состоят тела.

В основе МКТ лежат следующие основные положения:

- все тела состоят из частиц, разделенных промежутками;
- частицы вещества находятся в непрерывном хаотическом движении;
- частицы взаимодействуют между собой.

Атомом называется мельчайшая частица химического элемента. Атом электрически нейтрален. Размеры атома порядка 10^{-10} м. Атомы одного и того же химического элемента одинаковы. Атом состоит из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов. В состав атомного ядра входят протоны и нейтроны. Атомы соединяются в молекулы.

Молекула — наименьшая устойчивая частица данного вещества, обладающая его химическими свойствами. Размеры молекул 10^{-10} – 10^{-7} м. Молекулы одного вещества одинаковы. Молекулы электрически нейтральны.

Макроскопическое тело — тело, состоящее из очень большого числа частиц.

Макроскопические параметры — величины, характеризующие состояние макроскопических тел без учета их молекулярного строения.

Микроскопические параметры — величины, являющиеся характеристиками частицы (молекулы) вещества.

Тепловое (термодинамическое) равновесие — состояние тела или системы тел, при котором его термодинамические параметры (p , V , t и др.) остаются неизменными сколь угодно долго.

2.1.1. Модели строения газов, жидкостей и твердых тел

Все вещества могут существовать в трех агрегатных состояниях — *твердом, жидком и газообразном*. Четвертым агрегатным состоянием вещества считают плазму. Агрегатное состояние зависит от физических условий, в которых находится вещество. Существование у вещества нескольких агрегатных состояний обусловлено различиями в тепловом движении его молекул (атомов) и в их взаимодействии при разных условиях. Переходы между агрегатными состояниями сопровождаются скачкообразным изменением ряда физических свойств (плотности, теплопроводности и др.). Рассмотрим особенности строения газов, жидкостей и твердых тел.

В *газах* силы притяжения между молекулами очень малы. Частицы газа находятся на больших расстояниях друг от друга: расстояния между частицами гораздо больше размеров самих частиц. Частицы газа движутся беспорядочно. Кинетическая энергия молекул газа гораздо больше потенциальной энергии их взаимодействия. Порядок в расположении частиц отсутствует. Это объясняет следующие *свойства газа*: газы занимают весь объем сосуда, не имеют формы, легко сжимаемы.

Молекулы *жидкости* сильно взаимодействуют друг с другом и расположены очень близко друг к другу. Однако такое расположение частиц не является строго упорядоченным по всему объему. Говорят, что в жидкостях наблюдается *ближний порядок* — упорядоченное относительное расположение соседних частиц жидкости. Потенциальная энергия взаимодействия молекул жидкости сравнима с их кинетической энергией. Молекулы жидкости совершают хаотические колебания около положений равновесия. Эти колебания происходят внутри свободного объема, предоставляемого молекулам ее соседями. Через некоторое время положение равновесия смещается, и частица жидкости совершает скачок. Свойства жидкостей одинаковы по всем направлениям. *Основные свойства жидкостей*: жидкости имеют определенный объем, но не сохраняют форму, текучи и мало сжимаемы.

В *твердых телах* силы взаимного притяжения частиц очень велики. Частицы твердых тел не могут уйти со своих мест на большое расстояние. Потенциальная энергия взаимодействия молекул твердого тела больше их кинетической энергии. Движение частиц представляет собой колебания относительно их положений равновесия — узлов кристаллической решетки.

Твердые тела делятся на *кристаллические и аморфные*. *Кристаллические твердые тела* имеют упорядоченное, периодически повторяющееся в пространстве расположение частиц — кристаллическую

решетку. Одиночные кристаллы, имеющие форму правильных многогранников, называются монокристаллами. Для таких тел характерна *анизотропия* — зависимость физических свойств от направления. Большинство твердых тел представляют собой сросшиеся монокристаллы — поликристаллы. Поликристаллы изотропны — их физические свойства одинаковы по всем направлениям. В кристаллических твердых телах имеется *дальний порядок* в расположении частиц: упорядоченное расположение частиц повторяется по всему объему кристалла. В аморфных телах атомы колеблются около хаотически расположенных точек. *Свойства аморфных тел*: они изотропны, не имеют постоянной температуры плавления, обладают текучестью. Примерами аморфных тел являются смола, янтарь, стекло. *Свойства твердых тел*: они сохраняют форму и объем, мало сжимаемы, имеют определенную температуру плавления.

2.1.2. Тепловое движение атомов и молекул вещества

Молекулы (атомы) вещества всегда находятся в постоянном беспорядочном движении независимо от того, имеем ли мы дело с твердым, жидким или газообразным состоянием вещества. Это движение обуславливает собой наличие в любом веществе внутренней кинетической энергии, связанной с температурой вещества.

Тепловое движение — это беспорядочное хаотическое движение частиц, из которых состоит вещество.

Тепловым движением объясняется, например, давление газа на стенки сосуда, теплопроводность, т. е. перенос тепла от более нагретого к менее нагретому телу.

Хаотичность является важнейшей чертой теплового движения. Невозможно точно определить координаты молекулы и ее скорость (импульс), поэтому используют усредненные или вероятностные значения координат и импульса. При механическом движении координаты и импульс объекта определяются строго из законов динамики Ньютона и кинематических уравнений.

Температура тела зависит от средней кинетической энергии молекул. Скорость теплового движения частиц увеличивается с ростом температуры. Эксперименты показывают, что при любой температуре в веществе есть молекулы, двигающиеся довольно медленно, и молекулы, скорость которых высока. Если количество молекул вещества, имеющих высокую скорость, увеличивается, т. е. увеличивается средняя скорость молекул, то это значит, что температура вещества также увеличивается.

Важно!

В тепловом движении молекул и атомов участвуют абсолютно все молекулы тела, именно поэтому с изменением теплового движения меняется и состояние самого тела, его различные свойства.

2.1.3. Броуновское движение

Броуновским движением называют тепловое движение взвешенных в жидкости или газе частиц. Это движение в 1827 г. впервые наблюдал английский ботаник Р. Броун, рассматривая в микроскоп взвешенные в воде споры плауна. Интенсивность броуновского движения не зависит от времени, но возрастает с ростом температуры среды, с уменьшением вязкости и размеров частиц.

Причиной броуновского движения частицы являются беспорядочные нескомпенсированные удары молекул жидкости (газа) о взвешенную частицу. Молекулы среды движутся хаотически, и взвешенная частица в любой момент времени подвергается неуравновешенным воздействиям, сила которых непрерывно изменяется по величине и направлению. Если бы частица была большой, то молекулы равномерно толкали бы ее со всех сторон, и она оставалась бы на месте. Но небольшая частица имеет маленькую поверхность, и удары молекул не уравновешивают друг друга. Результирующая сила не равна нулю, и в течение времени меняется по величине и направлению. Так как молекулы среды движутся беспорядочно, число ударов о броуновскую частицу быстро изменяется, и скорость ее меняется по величине и направлению. В результате частица перемещается по сложной траектории.

Теория броуновского движения была создана в 1905 г. А. Эйнштейном и М. Смолуховским. Эйнштейн доказал, что при движении броуновской частицы средний квадрат смещения молекулы пропорционален времени ее движения.

В 1908 г. Ж. Перрен изучал движение нерастворимых в жидкости частиц в горизонтальной кювете в воде и их распределение в поле силы тяжести в узкой вертикальной кювете. Выявленные закономерности полностью подтвердили теорию Эйнштейна. На основе экспериментов Перрена удалось найти с достаточной точностью число Авогадро.

Броуновское движение в метрологии является основной причиной, по которой точность чувствительных измерительных приборов ограничена, потому что тепловое движение атомов деталей приборов и окружающей среды вызывает дрожание стрелок измерительных приборов.

2.1.4. Диффузия

Диффузия — явление взаимного проникновения молекул соприкасающихся веществ в межмолекулярные промежутки друг друга. Так как молекулы вещества хаотически движутся, то они проникают в межмолекулярные промежутки соприкасающегося с ним тела и распределяются между ними. Диффузия приводит к выравниванию концентраций соприкасающихся веществ.

Это явление наблюдается в газах, жидкостях и твердых телах. Скорость диффузии наибольшая в газах, а самая маленькая в твердых телах. Скорость диффузии увеличивается при повышении температуры.

Диффузия играет существенную роль в природе. Диффузия газов обеспечивает однородность атмосферы вблизи поверхности Земли. Диффузия способствует нормальному питанию растений, животных.

2.1.5. Экспериментальные доказательства атомистической теории. Взаимодействие частиц вещества

Атомистическая гипотеза была выдвинута Демокритом около 2500 лет назад. Такие ученые как Декарт, Ломоносов, Ньютон считали, что материя состоит из мельчайших неделимых частиц. Однако в их работах не было приведено доказательства их существования. Количественное обоснование теории было дано в работах Дальтона, Гей-Люссака, Авогадро.

МКТ подтверждена многочисленными опытами и наблюдениями.

Первое положение МКТ — все тела состоят из частиц (атомов, молекул, ионов и др.), разделенных промежутками.

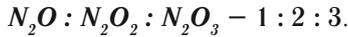
Его подтверждают явления испарения жидкостей и твердых тел, делимости веществ, диффузии, броуновского движения, растворения веществ, окрашивания воды крупинкой краски, сжимаемости веществ. Экспериментальным подтверждением существования отдельных, разделенных промежутками частиц могут служить проницаемость, сжимаемость, растворимость веществ.

Косвенными доказательствами являются фотографии молекул и групп атомов, полученные с помощью электронного микроскопа, измерения масс и размеров молекул — например, образование пленки олеиновой кислоты на поверхности воды. Полагая, что эта пленка имеет толщину в одну молекулу, получаем диаметр молекулы d .

$$d = \frac{V}{S},$$

где V — объем капли олеиновой кислоты, S — площадь пленки на поверхности воды.

Существование молекул доказывает закон кратных соотношений (закон Дальтона): при образовании из двух элементов различных веществ массы одного из элементов в разных соединениях находятся в кратных отношениях. Например:



Существование промежутков доказывает тот факт, что при смешивании различных жидкостей объем смеси меньше суммы объемов отдельных жидкостей; диффузия; деформация.

Массы атомов и молекул определяют по формуле:

$$m_0 = \frac{M}{N_A},$$

где M — молярная масса, N_A — постоянная Авогадро.

Постоянная Авогадро — число атомов, молекул (структурных элементов) в одном моле любого вещества:

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

Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде массой 0,012 кг. *Моль* — основная единица Международной системы (СИ).

Важно!

В одном моле любого вещества содержится одинаковое число частиц — $6 \cdot 10^{23}$ частиц.

Так как массы молекул очень малы, удобно использовать в расчетах не абсолютные значения масс, а относительные. По международному соглашению массы всех атомов и молекул сравнивают с $\frac{1}{12}$ массы атома углерода (углеродная шкала атомных масс).

Относительной молекулярной (или атомной) массой вещества M_r называют отношение массы молекулы (или атома) m_0 данного вещества к $\frac{1}{12}$ массы атома углерода m_{0C} :

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}}.$$

Относительные атомные массы всех химических элементов точно определены. Складывая относительные атомные массы, можно вычислить относительную молекулярную массу.

Чем больше атомов и молекул содержится в макроскопическом теле, тем больше вещества содержится в нем. Число молекул в макроскопических телах огромно, поэтому удобно указывать не абсолютное число атомов или молекул, а относительное. Принято сравнивать число молекул или атомов в данном теле с числом атомов, содержащихся в углероде массой 12 г.

Относительное число атомов или молекул в теле характеризует особая физическая величина: количество вещества.

Обозначение — ν , единица измерения в СИ — *моль*.

Количеством вещества ν называют отношение числа молекул N в данном теле к числу атомов в 0,012 кг углерода:

$$\nu = \frac{N}{N_A}.$$

Молярной массой M вещества называют массу вещества, взятого в количестве 1 *моля*:

$$M = \frac{m}{\nu}, \text{ где } m \text{ — масса вещества.}$$

Важно!

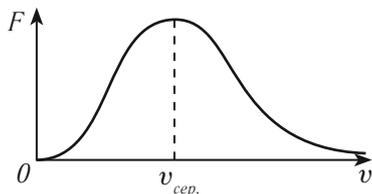
В СИ единица измерения молярной массы — $\frac{\text{кг}}{\text{моль}}$.

Второе положение МКТ — движение частиц.

Это положение доказывают диффузия, броуновское движение, существование давления газа на стенки сосуда.

В 1860 году Максвелл пришел к выводу о том, что молекулы газа движутся с различными скоростями. Он вывел закон распределения молекул газа по скоростям. Значительное число молекул движется со скоростью, названной наиболее вероятной. Она зависит от температуры — чем выше температура, тем больше эта скорость. Число молекул, движущихся со скоростями больше или меньше наиболее вероятной скорости, мало. Эта скорость по теоретическим расчетам составляет несколько сотен метров в секунду при нуле градусов Цельсия.

На графике по оси абсцисс отложены значения модуля скорости частиц, по оси ординат — относительное число молекул, скорости которых лежат в интервале от ν до $\nu + \Delta\nu$ (это отношение обозначено F).

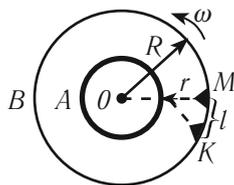


Экспериментально скорость движения молекул была определена в опыте Штерна в 1920 году.

Экспериментальная установка представляла собой два цилиндра разных радиусов, обладающих общей осью вращения, которые приводились во вращение с большой скоростью. На оси внутреннего цилиндра

располагалась платиновая проволока, покрытая серебром. При пропускании по ней тока проволока нагревалась, и атомы серебра испарялись с нее. На внутреннем цилиндре была сделана прорезь. Установка помещалась в вакуум.

Если цилиндры были неподвижны, то атомы серебра осаждались на внешнем цилиндре напротив щели. При вращении цилиндров полоска смещалась относительно прорези и была неоднородна по толщине. Это доказывало, что скорость атомов серебра разная и что число частиц, движущихся с различными скоростями, неодинаково. Толщина слоя определяется числом частиц, движущихся с определенной скоростью.



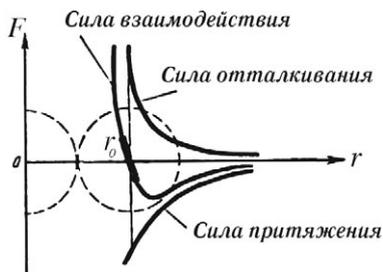
Третье положение МКТ — частицы вещества взаимодействуют друг с другом силами притяжения и отталкивания.

Эти силы зависят от расстояния: с увеличением расстояния преобладают силы притяжения, при уменьшении — силы отталкивания. Взаимодействие частиц доказывает деформация, существование различных агрегатных состояний вещества, сохранение формы и объема твердого тела, смачивание и капиллярность (существование сил поверхностного натяжения жидкости), опыт с двумя свинцовыми цилиндрами, которые, будучи притерты друг к другу свежими срезами, выдерживают значительную нагрузку.

Силы межмолекулярного взаимодействия имеют электромагнитную природу, хотя в целом молекула электрически нейтральна (суммы положительных и отрицательных зарядов составляющих ее частиц равны). Электрическое поле молекулы на расстоянии, большем 2–3 ее диаметров, можно считать равным нулю. Принято считать силы притяжения отрицательными, а силы отталкивания положительными. При сближении молекул возникает взаимодействие электрических зарядов ядер и электронных оболочек молекул: разноименные заряды притягиваются, одноименные отталкиваются; между молекулами возникают силы притяжения. Расстояния между центрами молекул при этом порядка $10^{-9} м$. Когда молекулы «соприкоснутся» своими электронными оболочками, дальнейшее сближение станет невозможным, и возникнут большие силы отталкивания. Расстояния между центрами молекул при этом порядка $10^{-10} м$.

При растяжении тела увеличиваются расстояния между частицами и возникают силы притяжения, а при сжатии расстояние между частицами становится меньше и начинают действовать силы отталкивания. В обоих случаях возникает сила упругости, стремящаяся вернуть тело в исходное состояние.

Зависимость силы взаимодействия между молекулами от расстояния показана на рисунке. F — проекция силы взаимодействия, которая отрицательна в случае притяжения и положительна при отталкивании частиц, r — расстояние между частицами. При сближении сила взаимодействия сначала растет по модулю, затем убывает (область притяжения частиц). При переходе через $r = r_0$ сила взаимодействия изменяет знак и очень быстро увеличивается по модулю при уменьшении расстояния (область отталкивания частиц). Расстояние r_0 соответствует устойчивому равновесию двух частиц. При отклонении от него в любую сторону возникает сила, возвращающая молекулы в состояние равновесия. Этому расстоянию соответствует минимальная потенциальная энергия.



2.1.6. Модель идеального газа

В молекулярно-кинетической теории используется идеализированная модель — идеальный газ.

◆ **Идеальный газ** — газ, молекулы которого не взаимодействуют между собой.

Эта модель удовлетворяет следующим условиям:

- молекулы газа можно считать материальными точками, так как расстояния между ними намного больше, чем их размеры;
- молекулы газа представляют собой упругие шарики конечных малых размеров. Соударения молекул идеального газа между собой и стенками сосуда абсолютно упругие;
- движение каждой частицы подчиняется законам динамики.

По своим свойствам близки к идеальному газу разреженные газы (при малом давлении и не слишком низких температурах).

2.1.7. Связь между давлением и средней кинетической энергией теплового движения молекул идеального газа

Большое число молекул газа и хаотичность их движения приводит к тому, что все направления их движения встречаются одинаково часто.

Соударения между частицами приводят к непрерывному изменению их скоростей. Поэтому для описания движения одной частицы можно использовать законы Ньютона, а для описания движения большого числа частиц эти законы использовать нельзя. Для описания поведения большого числа частиц используют теорию вероятностей, с помощью которой находят средние значения физических величин — среднее значение скорости частицы v , среднее значение кинетической энергии частицы E .

Основное уравнение МКТ устанавливает связь между макропараметром — давлением и микропараметрами, характеризующими частицу. Давление идеального газа пропорционально произведению массы молекулы на концентрацию молекул и средний квадрат их скорости:

$$p = \frac{1}{3} m_0 \cdot n \cdot \overline{v^2},$$

где m_0 — масса частицы, n — концентрация частиц, $\overline{v^2}$ — среднее значение квадрата скорости.

Среднее значение квадрата скорости находится по формуле:

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2},$$

где $\overline{v_x^2}$, $\overline{v_y^2}$, $\overline{v_z^2}$ — средние значения квадрата проекции скорости на оси ОХ, ОУ и ОZ соответственно.

Среднее значение квадрата проекции скорости на оси ОХ вычисляется по формуле:

$$\overline{v_x^2} = \frac{\overline{v_{1x}^2} + \overline{v_{2x}^2} + \dots + \overline{v_{Nx}^2}}{N}.$$

Аналогично вычисляются средние значения квадрата проекции скорости на оси ОУ и ОZ.

Так как все направления движения из-за хаотичности движения молекул равновероятны, то:

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}.$$

Множитель $\frac{1}{3}$ появляется вследствие существования трех проекций у любого вектора скорости.

Важно!

При решении задач не путать среднее значение квадрата скорости и среднюю квадратичную скорость $v_{\text{ск}} = \sqrt{\overline{v^2}}$ ($\frac{M}{C}$). Единица измерения в СИ среднего значения квадрата скорости — $\frac{M^2}{C^2}$.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы:

$$E = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}, \text{ тогда можно записать: } p = \frac{2}{3} n \cdot E.$$

Давление идеального газа пропорционально концентрации молекул и средней кинетической энергии их поступательного движения.

2.1.8. Абсолютная температура

- ◆ **Термодинамическое (тепловое) равновесие** — состояние тела или системы тел, при котором все макроскопические параметры (давление, объем, температура, масса) остаются неизменными сколь угодно долго.

Температура — термодинамический параметр, который одинаков во всех частях термодинамической системы.

- ◆ **Температура** — скалярная физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия системы и являющаяся мерой кинетической энергии поступательного движения молекул (атомов) тела.

Основой измерения температуры является зависимость какого-либо свойства тела (например объема или электрического сопротивления) от температуры. На практике чаще всего встречаются термометры, в которых используется зависимость объема жидкости (спирт, ртуть) от температуры. Для измерения температуры необходимо привести тело в тепловой контакт с термометром. Показания термометра следует отсчитывать только после наступления теплового равновесия с термометром. Масса термометра должна быть намного меньше массы тела, температуру которого измеряют.

На практике распространена температурная шкала Цельсия. Она строится по двум опорным (реперным) точкам: температуре таяния льда и температуре кипения воды, которым приписаны температуры $t_{пл.} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_{к.в.} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Недостаток этой шкалы, как и остальных температурных шкал, — произвольный выбор опорных точек и их зависимость от внешних условий.

От этого недостатка свободна абсолютная шкала температур. Принцип создания этой шкалы заключается в следующем. Кинетическая энергия молекул может быть больше или равна нулю. Температура, при которой прекращается хаотическое поступательное движение молекул, называется *абсолютным нулем*. Этому значению соответствует температура $-273,15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Шкала температур, на которой температура отсчитывается от абсолютного нуля, а деления равны градусам шкалы Цельсия, называется *абсолютной температурной шкалой, или шкалой Кельвина*. На такой шкале не существует отрицательных температур.

Обозначение — T , единица измерения в СИ — *кельвин* (K).

Кельвин является одной из основных единиц Международной системы единиц. Перевод температуры t из градусов Цельсия в температуру T в кельвинах:

$$T = t + 273 K.$$

Перевод температуры T из кельвинов в температуру t в градусах Цельсия:

$$t = T - 273 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Важно!

При решении задач нужно помнить, что температура всегда переводится в кельвины. Один градус по шкале Цельсия и один кельвин равны. Поэтому любое значение абсолютной температуры будет на 273 градуса выше соответствующей температуры в градусах Цельсия. Но изменение абсолютной температуры равно изменению температуры в градусах Цельсия: $\Delta T = \Delta t$.

2.1.9. Связь температуры газа со средней кинетической энергией его частиц

Температура — характеристика внутреннего состояния макроскопической системы — состояния теплового равновесия.

Важно!

Температура — термодинамический параметр, одинаковый во всех частях термодинамической системы, находящейся в тепловом равновесии. Температуры тел, находящихся в тепловом контакте, выравниваются.

Опытным путем было установлено, что при тепловом равновесии отношение давления к концентрации для всех газов одинаково. То есть отношение $\frac{p}{n} = \frac{p \cdot V}{N} = \Theta$ обладает свойствами температуры. Но здесь возникает неудобство, связанное с тем, что единица измерения Θ — джоуль, а температуру традиционно измеряют в градусах. Поэтому отношение давления к концентрации считают пропорциональным абсолютной температуре:

$$\frac{p}{n} = \frac{p \cdot V}{N} = kT.$$

Коэффициент пропорциональности называется постоянной Больцмана. Эта постоянная связывает температуру в энергетических единицах (джоулях) с температурой в кельвинах:

$$\Theta = kT.$$

Числовое значение постоянной Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$. Тогда основное уравнение МКТ можно записать так:

$$p = nkT.$$

Из этого уравнения следует, что давление газа пропорционально концентрации молекул и абсолютной температуре. Используя запись этого уравнения, через среднюю кинетическую энергию частицы E можно получить соотношение между средней кинетической энергией и температурой:

$$E = \frac{\overline{m_0 v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT.$$

Абсолютная температура является величиной, прямо пропорциональной средней кинетической энергии теплового движения частиц.

Для скорости частицы можно записать формулу:

$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}},$$

где m_0 — масса частицы, M — молярная масса, R — универсальная газовая постоянная.

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}.$$

2.1.10. Уравнение $p = nkT$

Основное уравнение МКТ, используя понятие абсолютной температуры, можно записать так:

$$p = nkT.$$

Из этой формулы следует, что при одинаковых давлениях и температурах концентрация молекул у всех газов одинакова. В равных объемах газов при одинаковых температурах и давлениях содержится одинаковое число частиц (закон Авогадро).

2.1.11. Уравнение Менделеева – Клапейрона

Уравнение, устанавливающее связь между макропараметрами газа массой m , давлением p , объемом V и температурой T , называется *уравнением состояния идеального газа*.

Клапейрон установил, что при постоянной массе газа отношение произведения давления газа на объем к его абсолютной температуре остается постоянным:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad \text{или} \quad \frac{pV}{T} = \text{const}.$$

Это одна из форм записи уравнения состояния идеального газа. Если газ взят в количестве одного моля при нормальном атмосферном давлении и температуре 273 K , то его объем равен $0,0224 \text{ м}^3$.

Тогда отношение
$$\frac{pV}{T} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}.$$

Эту величину обозначают R и называют универсальной газовой постоянной:

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

Тогда уравнение Клапейрона для 1 моль идеального газа запишется так:

$$pV = RT.$$

Для количества вещества, равного любому числу моль:

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

В такой форме уравнение состояния идеального газа впервые было записано Д. И. Менделеевым. Эту формулу называют *уравнением Менделеева – Клапейрона*.

2.1.12. Изопроцессы: изотермический, изохорный, изобарный, адиабатный процессы

- ◆ **Изопроцесс** — это процесс, протекающий при постоянной массе газа и постоянном значении одного из параметров состояния системы.
- ◆ **Изотермический процесс** — термодинамический процесс, проходящий при постоянной температуре и неизменной массе газа.

Изотермический процесс подчиняется *закону Бойля – Мариотта*: для данной массы газа при неизменной температуре произведение числовых значений давления и объема постоянно:

$$pV = \text{const},$$

$$p_1 V_1 = p_2 V_2.$$

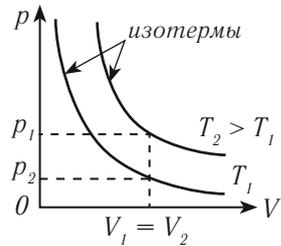
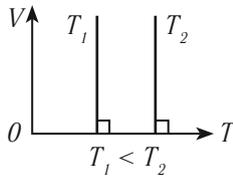
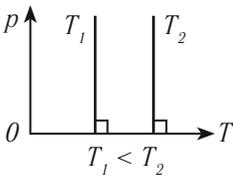
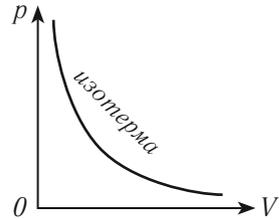
Важно!

Процесс можно считать изотермическим, если он протекает медленно. Например, подъем воздушного пузырька со дна пруда к поверхности.

На графике изотермический процесс изображается кривой, которую называют *изотерма*.

Разным температурам соответствуют разные изотермы. При одинаковых объемах газ с более высокой температурой производит большее давление. Значит, чем выше температура, тем выше расположена изотерма в осях (p, V) .

В координатных осях $p(T)$ и $V(T)$ график изотермического процесса выглядит так:



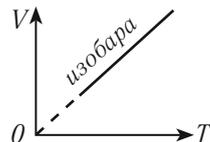
◆ **Изобарный процесс** — термодинамический процесс, проходящий при неизменной массе газа и постоянном давлении.

Изобарный процесс подчиняется *закону Гей-Люссака*: при неизменном давлении объем данной массы газа прямо пропорционален его абсолютной температуре:

$$\frac{V}{T} = \text{const},$$

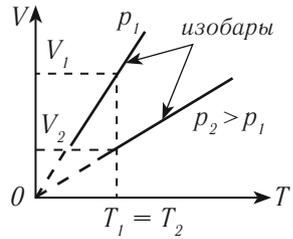
$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}.$$

На графике зависимости объема от температуры этот процесс изображается прямой, которую называют *изобара*. Изобара всегда выходит из начала координат в осях (V, T) .

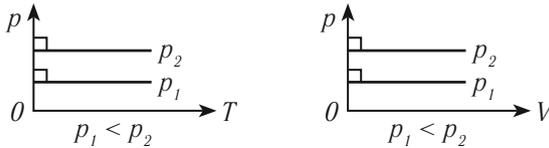


Так как абсолютный нуль недостижим, то из начала координат изобару проводят пунктиром.

Разным давлениям соответствуют разные изобары. При одинаковой температуре чем меньше объем газа, тем большее давление он производит. Это значит, что, чем выше давление, тем ниже расположена изобара в осях (V, T) .



В координатных осях $p(T)$ и $p(V)$ график изобарного процесса выглядит так:



Важно!

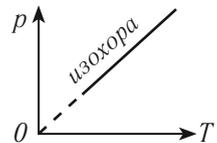
Процесс можно считать изобарным, если не меняется внешнее давление.

◆ **Изохорный процесс** – это термодинамический процесс, проходящий при неизменной массе газа и постоянном объеме.

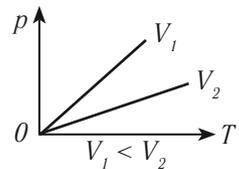
Изохорный процесс подчиняется *закону Шарля*: при неизменном объеме давление данной массы газа прямо пропорционально его абсолютной температуре:

$$\frac{p}{T} = const, \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$

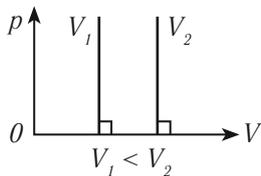
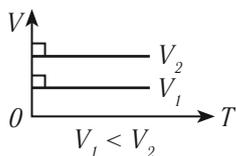
На графике зависимости давления от температуры этот процесс изображается прямой, которую называют *изохора*. Изохора всегда выходит из начала координат в осях (p, T) . Так как абсолютный нуль недостижим, то из начала координат изохору проводят пунктиром.



Разным объемам соответствуют разные изохоры. При одинаковой температуре чем меньше объем газа, тем большее давление он производит. Поэтому при одинаковой температуре чем больше объем, тем ниже расположена изохора (в осях p, V).



В координатных осях $V(T)$ и $p(V)$ график изобарного процесса выглядит так:

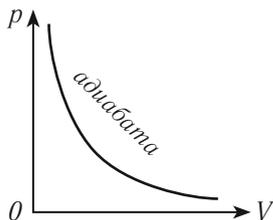


Важно!

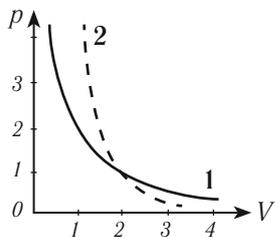
Процесс можно считать изохорным, если он происходит в закрытом сосуде.

◆ **Адиабатный процесс** — термодинамический процесс, проходящий без теплообмена с окружающей средой.

Адиабатный процесс возможен при хорошей теплоизоляции системы. К адиабатным можно отнести быстро протекающие процессы сжатия или расширения газа. При быстром сжатии газа затрачивается работа, приводящая к увеличению внутренней энергии и повышению температуры. Тело, температура которого повышена, должно некоторое количество теплоты передать окружающей среде, но процесс теплопередачи требует некоторого времени, поэтому при быстром сжатии (или расширении) теплота не успевает распространиться из данного объема ($Q=0$), и процесс можно рассматривать как адиабатный.



Зависимость давления от объема газа при адиабатном процессе на графике изображается кривой, называемой *адиабата*. При адиабатном сжатии давление газа с уменьшением объема растет быстрее из-за повышения температуры. Различие в изображении адиабаты и изотермы дает рисунок, на котором адиабата обозначена цифрой 2, а изотерма — цифрой 1.



Примером адиабатного процесса в природе является образование облаков.

При решении задач на «Уравнение Менделеева – Клапейрона» и газовые законы выделяют следующие группы задач:

- Переход идеального газ из одного состояния в другое без изменения массы.
- Состояние газа не меняется, а масса изменяется.

- Изменяется и масса и состояние газа.

Алгоритм решения задач первой группы:

- установить, какой газ участвует в том или ином процессе;
- определить параметры p , V и T , характеризующие каждое состояние газа;
- записать уравнение объединенного газового закона Клапейрона для данных состояний; если один из трех параметров остается неизменным, уравнение Клапейрона автоматически переходит в одно из трех уравнений газовых законов;
- записать математически все вспомогательные условия;
- решить полученную систему уравнений относительно неизвестной величины;
- решение проверить.

Алгоритм решения задач второй группы:

- установить, какие газы участвуют в рассматриваемых процессах;
- определить параметры p , V и T , характеризующие каждое состояние газа;
- для каждого состояния каждого газа (если их несколько) составить уравнение Менделеева — Клапейрона. Если дана смесь газов, то это уравнение записывается для каждого компонента. Связь между значениями давлений отдельных газов и результирующим давлением смеси устанавливается законом Дальтона;
- записать математически дополнительные условия задачи;
- решить полученную систему уравнений относительно неизвестной величины;
- решение проверить.

Алгоритм решения задач третьей группы:

- внимательно проанализировать условие задачи и исходные данные;
- установить, какие параметры газа изменяются, а какие остаются постоянными;
- обратить внимание на параметры, заданные неявно;
- записать для каждого состояния газа уравнение Менделеева — Клапейрона;
- записать математически дополнительные условия задачи;
- решить полученную систему уравнений относительно неизвестной величины;
- решение проверить.

2.1.13. Насыщенные и ненасыщенные пары

При испарении жидкости в закрытом сосуде через некоторое время количество жидкости перестает уменьшаться, хотя молекулы продолжают переходить в пар. В этом случае наряду с процессом парообразования происходит процесс превращения пара в жидкость — конденсация. Это означает, что жидкость и ее пар находятся в состоянии *динамического равновесия*, когда число молекул, вылетающих из жидкости, равно числу молекул, возвращающихся в жидкость из пара. В состоянии динамического равновесия скорости процессов испарения и конденсации одинаковы. С этого момента количество жидкости и ее пара не меняется. Пар, находящийся в равновесии со своей жидкостью, называют *насыщенным*.

При повышении температуры давление насыщенного пара и его плотность возрастают, а плотность жидкости уменьшается из-за теплового расширения. Температура, при которой исчезают физические различия между жидкостью и ее паром, называется *критической* $T_{кр.}$. При температуре, равной критической температуре $T_{кр.}$ для данного вещества, плотности пара и жидкости становятся одинаковыми. При $T \geq T_{кр.}$ исчезают физические различия между жидкостью и ее насыщенным паром.

Свойства насыщенного пара

Давление насыщенного пара данной жидкости при постоянной температуре — постоянная величина, и она не зависит от объема пространства над испаряющейся жидкостью. Значит, при постоянной температуре плотность насыщенного пара постоянна.

- Давление и плотность насыщенных паров у различных жидкостей при одной и той же температуре различны. У летучих жидкостей они больше.
- Давление насыщенных паров — наибольшее возможное давление паров данной жидкости при данной температуре.
- Наличие других газов над испаряющейся жидкостью не влияет на давление и плотность насыщенного пара данной жидкости, а только замедляет процесс испарения.
- Давление насыщенного пара $p_{нас.}$ данного вещества зависит только от его температуры и не зависит от объема.

Число молекул, вылетающих с единицы площади поверхности жидкости за одну секунду, зависит от температуры жидкости. Число молекул, возвращающихся из пара в жидкость, зависит от концентрации молекул пара и от средней скорости их теплового движения, которая

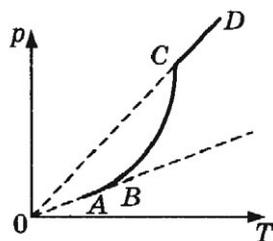
определяется температурой пара. Отсюда следует, что для данного вещества концентрация молекул пара при равновесии жидкости и ее пара определяется их температурой. Установление динамического равновесия между процессами испарения и конденсации при повышении температуры происходит при более высоких концентрациях молекул пара.

Так как давление газа (пара) определяется его концентрацией и температурой, то можно сделать вывод: *давление насыщенного пара $p_{\text{нас}}$ данного вещества зависит только от его температуры и не зависит от объема.*

Если изотермически сжимать ненасыщенный пар ($T < T_{\text{кр.}}$) то его давление будет возрастать, пока не станет равным давлению насыщенного пара. При дальнейшем уменьшении объема на дне сосуда образуется жидкость и устанавливается динамическое равновесие между жидкостью и ее насыщенным паром. С уменьшением объема все большая часть пара конденсируется, а его давление остается неизменным. Когда весь пар превращается в жидкость, давление резко возрастает при дальнейшем уменьшении объема вследствие малой сжимаемости жидкости.

Давление насыщенного пара не зависит от объема при данной температуре. Если объем изменяется, то конденсация будет преобладать над испарением или наоборот, пока не установится динамическое равновесие.

Давление $p_{\text{нас}}$ насыщенного пара очень быстро возрастает с ростом температуры T . Зависимость $p_{\text{нас}}(T)$ нельзя получить из законов идеального газа. Давление газа при постоянной концентрации молекул растет прямо пропорционально температуре. В насыщенном паре при повышении температуры возрастает не только средняя кинетическая энергия движения молекул, но и их концентрация. Поэтому давление насыщенного пара при повышении температуры возрастает быстрее, чем давление идеального газа при постоянной концентрации молекул. На рисунке показана зависимость давления насыщенного пара от температуры. На участке АВ (в сосуде пар и жидкость) давление увеличивается за счет роста температуры и, соответственно, скорости частиц. На участке ВС (в сосуде пар и жидкость) давление увеличивается как за счет роста температуры, так и за счет увеличения концентрации молекул пара. Участок CD (в сосуде только пар) соответствует состоянию, когда давление растет за счет увеличения скоростей молекул пара.



Зависимость между массой, объемом, давлением и температурой для насыщенного пара не такая, как для идеального газа, так как если пар в каком-либо процессе остается насыщенным, то его масса меняется. При изотермическом сжатии насыщенный пар частично конденсируется, так что его давление остается постоянным. При изохорном охлаждении насыщенный пар частично конденсируется, его давление уменьшается и становится равным давлению насыщенного пара при более низкой температуре.

Ненасыщенный пар можно теоретически описывать с помощью уравнения состояния идеального газа при обычных для реальных газов ограничениях: давление пара должно быть не слишком велико (практически $p \leq (10^6 - 10^7) \text{ Па}$), а его температура выше некоторого определенного для каждого вещества значения. К насыщенному пару также можно приближенно применять законы идеального газа.

2.1.14. Влажность воздуха

- ◆ **Влажность воздуха** — физическая величина, характеризующая содержание водяного пара в воздухе. Различают абсолютную и относительную влажность.

Абсолютная влажность — физическая величина, равная массе водяных паров, содержащихся в 1 м^3 воздуха при данных условиях. Обычно ее вычисляют не в единицах СИ, а в $\text{г}/\text{м}^3$. В метеорологии абсолютную влажность оценивают по давлению водяного пара, выраженному в миллиметрах ртутного столба.

Относительной влажностью называют отношение абсолютной влажности к тому количеству водяного пара, которое необходимо для насыщения 1 м^3 воздуха при данной температуре.

Обозначение — φ , единица измерения — %.

Относительная влажность показывает, насколько водяной пар, содержащийся в воздухе, близок к насыщению. Формула для вычисления относительной влажности:

$$\varphi = \frac{P_{\text{пар}}}{P_{\text{нас}}} \cdot 100\% .$$

где $P_{\text{пар}}$ — парциальное давление водяного пара воздуха при данной температуре, $P_{\text{нас}}$ — давление насыщенного пара при той же температуре.

От относительной влажности зависит интенсивность испарения и потеря влаги живыми организмами. Комфортной для человека является влажность 40–60%.

Точкой росы называется температура, при которой водяной пар, содержащийся в воздухе, становится насыщенным.

Для измерения влажности используют:

- психрометр, основанный на зависимости влажности от скорости испарения воды;
- гигрометр, основанный на использовании температуры выпадения росы при охлаждении воздуха (определение точки росы);
- волосяной гигрометр, основанный на удлинении волоса при изменении влажности;
- электронный измеритель влажности, основанный на изменении сопротивления полупроводника при изменении влажности.

Психрометр состоит из двух термометров — сухого, который показывает температуру воздуха, и влажного, резервуар которого обмотан влажной тканью. По психрометрической таблице выбирают строку, соответствующую показаниям сухого термометра, и столбец, соответствующий значению разности температур сухого и влажного термометров. На пересечении строки и столбца — значение относительной влажности воздуха.

$t_{\text{сух. терм.}}$	Разность показаний сухого и влажного термометров									
	°С	0	1	2	3	4	5	6	7	8
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	

Гигрометр дает определение влажности по точке росы. Определив точку росы и зная температуру воздуха, по таблице зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры вычисляют абсолютную влажность воздуха.

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

Любое вещество при определенных условиях может находиться в различных агрегатных состояниях — твердом, жидком и газообразном. Переход из одного состояния в другое называется фазовым переходом.

◆ **Парообразование** — это процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное.

◆ **Испарением** называется парообразование, происходящее с поверхности жидкости при любой температуре.

Молекулы, вылетевшие из жидкости при парообразовании, называются паром данной жидкости. Поверхность жидкости покидают молекулы с наибольшей скоростью (соответственно и кинетической энергией), поэтому в результате испарения температура жидкости уменьшается. Скорость испарения зависит от рода жидкости, температуры, площади поверхности жидкости и отвода вылетевших молекул.

◆ **Конденсация** — это процесс, обратный процессу испарения. При конденсации молекулы пара возвращаются в жидкость.

◆ **Кипением** называется процесс интенсивного парообразования, происходящий по всему объему жидкости.

В жидкости всегда имеются мельчайшие пузырьки пара. Пар внутри пузырька является насыщенным. При повышении температуры жидкости давление пара в пузырьке возрастает и его объем увеличивается. Под действием архимедовой силы пузырек всплывает на поверхность. Если давление насыщенного пара внутри пузырька равно внешнему давлению, то жидкость кипит.

Важно!

Кипение жидкости начинается при такой температуре, при которой давление ее насыщенных паров становится равным внешнему давлению.

◆ **Температурой кипения** называется температура жидкости, при которой давление ее насыщенного пара равно внешнему давлению.

Температура кипения повышается с ростом внешнего давления и понижается при его уменьшении. При нормальном атмосферном давлении вода кипит при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это значит, что при такой температуре давление насыщенных паров воды равно 1 атм или 10^5 Па . При подъеме в горы атмосферное давление уменьшается, и поэтому температура кипения воды понижается (приблизительно на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ на каждые 300 м высоты). На высоте 7 км давление составляет примерно $0,4\text{ атм}$ и температура кипения понижается до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Важно!

В герметически закрытом сосуде жидкость кипеть не может, т. к. при каждом значении температуры устанавливается равновесие между жидкостью и ее насыщенным паром.

В процессе кипения температура жидкости остается постоянной (если не изменяется внешнее давление). На графике можно увидеть, что

участок 1–2 — это нагревание жидкости, участок 2–3 — кипение. Подводимое к жидкости тепло расходуется на парообразование.

Количество теплоты, необходимое для превращения жидкости, нагретой до температуры кипения, в пар, вычисляется по формуле:

$$Q = L \cdot m,$$

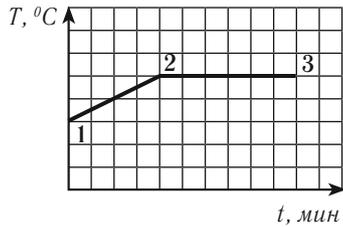
где L — удельная теплота парообразования вещества,
 m — масса вещества.

- ◆ **Удельная теплота парообразования вещества** — это физическая величина, равная количеству теплоты, необходимому для превращения 1 кг жидкости при постоянной температуре в пар.

Единица измерения удельной теплоты парообразования в СИ — Дж/кг.

При конденсации пара выделяется такое же количество теплоты:

$$Q = -L \cdot m.$$



2.1.16. Изменение агрегатных состояний вещества: плавление и кристаллизация

- ◆ **Плавление** — процесс перехода вещества из твердого состояния в жидкое.

Чтобы происходило плавление твердого тела, к нему необходимо подводить тепло. Плавление твердого тела происходит при определенной температуре, называемой *температурой плавления*. Температура плавления зависит от внешнего давления.

При плавлении амплитуда колебаний частиц, находящихся в узлах кристаллической решетки, увеличивается и становится сравнимой с расстоянием между частицами. Притяжение частиц вещества становится слабее. В результате в процессе плавления происходит разрушение кристаллической решетки. В процессе плавления твердое тело существует одновременно в твердом и жидком состояниях. При плавлении температура тела не меняется и равна температуре плавления.

Для того чтобы расплавить вещество, к нему необходимо подводить тепло. Количество теплоты, необходимое для плавления, вычисляется по формуле:

$$Q = \lambda \cdot m,$$

где λ — удельная теплота плавления вещества, m — масса вещества.

◆ **Удельная теплота плавления вещества** — это физическая величина, равная количеству теплоты, необходимому для превращения 1 кг кристаллического вещества при температуре плавления в жидкость той же температуры.

Единица измерения в СИ — Дж/кг.

◆ **Кристаллизация (отвердевание)** — переход вещества из жидкого состояния в твердое.

Кристаллизация происходит при постоянной температуре, равной температуре плавления. Кристаллизация начинается вблизи центров кристаллизации — примесей, пылинок. Около них начинается упорядочение структуры в расположении частиц и образование кристаллической решетки. Кристаллизация сопровождается выделением тепла:

$$Q = -\lambda \cdot m.$$

2.1.17. Изменение энергии в фазовых переходах

Все вещества могут находиться в трех агрегатных состояниях (фазах): газообразном, жидком и твердом. Возможен переход вещества из одного агрегатного состояния (фазы) в другое. Такие переходы называют фазовыми переходами.

◆ **Фазовый переход** — это переход вещества из одной фазы в другую при изменении внешних условий (температуры, давления), сопровождающийся скачкообразным изменением его физических свойств.

Выделяют следующие фазовые переходы: *плавление и кристаллизация, парообразование и конденсация.*

Важно!

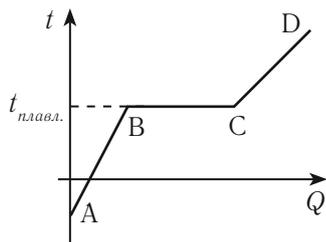
Переход вещества из одной фазы в другую при постоянном давлении происходит при строго определенной температуре. Внутренняя энергия при фазовых переходах изменяется.

Для *плавления* требуется сообщить телу некоторое количество теплоты. При нагревании вещества до температуры плавления подводимая энергия идет на увеличение скорости движения частиц. Это значит, что при нагревании до температуры плавления растут температура вещества и его внутренняя энергия. Подводимая к телу энергия в процессе плавления идет на работу по преодолению сил межмолекулярного притяжения. Это связано с увеличением средних расстояний между частицами вещества при переходе из твердого состояния в жидкое. Скорость движения частиц при этом не изменяется, поэтому остается постоянной и температура вещества.

Внутренняя энергия увеличивается за счет увеличения потенциальной энергии взаимодействия частиц, а кинетическая энергия частиц не меняется. Вещество в жидком состоянии обладает большей внутренней энергией, чем в твердом.

График зависимости температуры кристаллического тела от полученного количества теплоты выглядит следующим образом.

На этом графике участок АВ соответствует нагреванию кристаллического тела, участок ВС — плавлению, участок CD — нагреванию жидкости.



При понижении температуры вещества до температуры плавления происходит кристаллизация — переход вещества из жидкой фазы в твердую фазу. При кристаллизации выделяется количество теплоты, равное поглощаемому при плавлении. В процессе кристаллизации температура остается постоянной. Происходит восстановление межмолекулярных связей и кристаллической решетки.

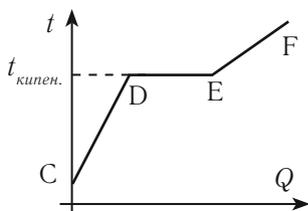
Внутренняя энергия при кристаллизации уменьшается. Если тело отдает количество теплоты, то участок графика DC соответствует охлаждению жидкости, участок CB — кристаллизации, участок BA — охлаждению кристаллического тела.

Для осуществления процесса кипения к жидкости нужно подводить тепло. При нагревании до температуры кипения растет температура жидкости и ее внутренняя энергия за счет увеличения скорости молекул жидкости.

При кипении температура жидкости не изменяется, а внутренняя энергия растет за счет увеличения потенциальной энергии взаимодействия частиц (расстояния между частицами увеличиваются). Кинетическая энергия частиц остается постоянной. При конденсации внутренняя энергия молекул пара уменьшается, так как потенциальная энергия уменьшается (кинетическая энергия частиц не меняется).

График зависимости температуры жидкости от полученного или отданного количества теплоты выглядит следующим образом.

На графике участок CD соответствует нагреванию жидкости, участок DE — кипению, участок EF — нагреванию пара.



Если тело отдает количество теплоты, то участок FE соответствует охлаждению пара, участок ED — конденсации, участок DC — охлаждению жидкости.

Основные формулы по теме «Молекулярная физика»

$m_0 = \frac{M}{N_A}$	— масса атома (молекулы)
$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}}$	— относительная молекулярная (или атомная) масса
$\nu = \frac{N}{N_A}$	— количество вещества
$M = \frac{m}{\nu}$	— молярная масса
$E = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT$	— соотношение между средней кинетической энергией и температурой
$p = \frac{1}{3} m_0 \cdot n \cdot \overline{v^2}, p = \frac{1}{3} \rho \overline{v^2}$	— основное уравнение МКТ
$p = \frac{2}{3} n \cdot E, p = nkT$	
$v = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$	— средняя квадратичная скорость движения молекулы
$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}, pV = \frac{m}{M} RT$	— уравнение Менделеева—Клапейрона
$p_1 V_1 = p_2 V_2$	— закон Бойля—Мариотта
$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	— закон Гей—Люссака
$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$	— закон Шарля
$\varphi = \frac{P_{нар.}}{P_{нас.}} \cdot 100\%$	— относительная влажность воздуха

2.2. ТЕРМОДИНАМИКА

- ◆ **Термодинамика** — это раздел физики, изучающий тепловые свойства макроскопических тел и систем тел, находящихся в состоянии теплового равновесия, на основе закона сохранения энергии, без учета внутреннего строения тел, составляющих систему.

Термодинамика не рассматривает микроскопические величины — размеры атомов и молекул, их массы и количество.

Законы термодинамики устанавливают связи между непосредственно наблюдаемыми физическими величинами, характеризующими состояние системы, такими как давление p , объем V , температура T .

2.2.1. Внутренняя энергия

- ◆ **Внутренняя энергия** — это физическая величина, равная сумме кинетической энергии теплового движения частиц тела и потенциальной энергии их взаимодействия друг с другом.

Обозначение — U , в СИ единица измерения — *Джоуль (Дж)*.

В термодинамике внутренняя энергия зависит от температуры и объема тела.

Внутренняя энергия тел зависит от их температуры, массы и агрегатного состояния. С ростом температуры внутренняя энергия увеличивается. Наибольшая внутренняя энергия у вещества в газообразном состоянии, наименьшая — в твердом.

Внутренняя энергия идеального газа представляет собой только кинетическую энергию теплового движения его частиц; потенциальная энергия взаимодействия частиц равна нулю.

Внутренняя энергия идеального газа прямо пропорциональна его температуре, а от объема не зависит (молекулы идеального газа не взаимодействуют друг с другом):

$$U = \frac{i}{2} \nu \cdot R \cdot T,$$

где i — коэффициент, равный числу степеней свободы молекулы, ν — количество вещества, R — универсальная газовая постоянная, T — абсолютная температура.

Число степеней свободы равно числу возможных движений частицы.

Важно!

Для одноатомных газов коэффициент $i = 3$, для двухатомных газов $i = 5$.

На практике часто важно уметь находить изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \nu \cdot R \cdot \Delta T.$$
$$\Delta T = T_2 - T_1.$$

При решении задач можно записать формулу для вычисления внутренней энергии, используя уравнение Менделеева–Клапейрона:

$$U = \frac{i}{2} pV.$$

где p — давление, V — объем газа.

Внутренняя энергия реальных газов зависит как от температуры, так и от объема.

Изменить внутреннюю энергию можно за счет изменения температуры (при теплопередаче) и за счет изменения давления и объема (при совершении работы).

2.2.2. Тепловое равновесие

◆ **Тепловое равновесие** — это состояние системы, при котором все ее макроскопические параметры остаются неизменными сколь угодно долго.

Величины, характеризующие состояние макроскопических тел без учета их молекулярного строения, называются макроскопическими параметрами. К ним относятся давление и температура, объем, масса, концентрация отдельных компонентов смеси газа и др. В состоянии теплового равновесия отсутствует теплообмен с окружающими телами, отсутствуют переходы вещества из одного агрегатного состояния в другое, не меняются температура, давление, объем.

Любая термодинамическая система переходит самопроизвольно в состояние теплового равновесия. Каждому состоянию теплового равновесия, в которых может находиться термодинамическая система, соответствует определенная температура.

Важно!

В состоянии теплового равновесия объем, давление могут быть различными в разных частях термодинамической системы, и только *температура во всех частях термодинамической системы, находящейся в состоянии теплового равновесия, является одинаковой*. Микроскопические процессы внутри тела не прекращаются и при тепловом равновесии: меняются положения молекул, их скорости при столкновениях.

2.2.3. Теплопередача

Теплопередача — процесс изменения внутренней энергии тела без совершения работы.

Существуют три вида теплопередачи: *теплопроводность, конвекция и излучение (лучистый теплообмен)*. Теплопередача происходит между телами, имеющими разную температуру. Тепло передается от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой.

Теплопроводность — это процесс переноса энергии от более нагретых тел (частей тела) к менее нагретым в результате движения и взаимодействия частиц тела. Высокую теплопроводность имеют металлы — так, лучшие проводники тепла — медь, золото, серебро. Теплопроводность жидкостей меньше, а газы являются плохими проводниками тепла. Пористые тела плохо проводят тепло, так как в порах содержится воздух. Вещества с низкой теплопроводностью используют в качестве теплоизоляторов. Теплопроводность невозможна в вакууме. При теплопроводности не происходит переноса вещества.

Явление теплопроводности газов аналогично явлению диффузии. Быстрые молекулы из слоя с более высокой температурой перемещаются в более холодный слой, а молекулы из холодного слоя перемещаются в более нагретый. За счет этого средняя кинетическая энергия молекул более теплого слоя уменьшается, и его температура становится ниже.

В жидкостях и твердых телах при повышении температуры какого-либо участка твердого тела или жидкости его частицы начинают колебаться сильнее. Соударяясь с соседними частицами, где температура ниже, эти частицы передают им часть своей энергии, и температура этого участка возрастает.

Конвекция — перенос энергии потоками жидкости или газа.

Объяснить механизм конвекции можно на основе теплового расширения тел и закона Архимеда. При нагревании объем жидкости увеличивается, а плотность уменьшается. Нагретый слой под действием силы Архимеда поднимается вверх, а холодный опускается вниз. Это *естественная конвекция*. Она возникает при неравномерном нагревании жидкости или газа снизу в поле тяготения.

При *вынужденной конвекции* перемещение вещества происходит под действием насосов, лопастей вентилятора. Такая конвекция применяется в состоянии невесомости. Интенсивность конвекции зависит от разности температур слоев среды и агрегатного состояния вещества. Конвекционные потоки поднимаются вверх. При конвекции происходит перенос вещества.

В твердых телах конвекция невозможна, так как частицы не могут из-за сильного взаимодействия покидать свои места. В вакууме конвекция также невозможна.

Примером конвективных потоков в природе являются ветры (бризы дневной и ночной, муссоны).

Излучение (лучистый теплообмен) — перенос энергии электромагнитными волнами. Перенос тепла излучением возможен в вакууме. Источником излучения является любое тело, температура которого отлична от нуля K . При поглощении энергия теплового излучения переходит во внутреннюю энергию. Темные тела быстрее нагреваются излучением, чем тела с блестящей поверхностью, но и остывают быстрее. Мощность излучения зависит от температуры тела. С увеличением температуры тела энергия излучения увеличивается. Чем больше площадь поверхности тела, тем интенсивнее излучение.

2.2.4. Количество теплоты. Удельная теплоемкость вещества

- ◆ **Количество теплоты** — это скалярная физическая величина, равная энергии, которую тело получило или отдало при теплопередаче.

Обозначение — Q , в СИ единица измерения — *Дж*.

- ◆ **Удельная теплоемкость** — это скалярная физическая величина, численно равная количеству теплоты, которое тело массой 1 кг получает или отдает при изменении его температуры на 1 K .

Обозначение — c , в СИ единица измерения — *Дж/кг K*.

Удельная теплоемкость определяется не только свойствами вещества, но и тем, в каком процессе осуществляется теплопередача. Поэтому выделяют удельную теплоемкость газа при постоянном давлении — c_p и удельную теплоемкость газа при постоянном объеме — c_v . Для нагревания газа на 1 K при постоянном давлении требуется большее количество теплоты, чем при постоянном объеме — $c_p > c_v$.

Формула для вычисления количества теплоты, которое получает тело при нагревании или отдает при охлаждении:

$$Q = c \cdot m (T_2 - T_1),$$

где m — масса тела, c — удельная теплоемкость, T_2 — конечная температура тела, T_1 — начальная температура тела.

Важно!

При решении задач на расчет количества теплоты при нагревании или охлаждении можно не переводить температуру в кельвины. Так как $1\text{K}=1^{\circ}\text{C}$, то $\Delta T=\Delta t$.

2.2.5. Работа в термодинамике

Работа в термодинамике равна изменению внутренней энергии тела.

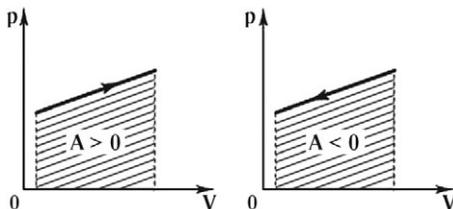
Обозначение работы газа – A' , единица измерения в СИ – *джоуль* (*Дж*). Обозначение работы внешних сил над газом – A .

Работа газа $A' = -A$.

Работой расширения идеального газа называют работу, которую газ совершает против внешнего давления.

Работа газа положительна при расширении и отрицательна при его сжатии. Если объем газа не изменяется (изохорный процесс), то работы газ не совершает.

Графически работа газа может быть вычислена как площадь фигуры под графиком зависимости давления от объема в координатных осях (p, V), ограниченная графиком, осью V и перпендикулярами, проведенными из точек начального и конечного значений объема.



Формула для вычисления работы газа:

в изобарном процессе $A' = p \cdot \Delta V$,

в изотермическом процессе $A' = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$.

2.2.6. Уравнение теплового баланса

Если система тел является теплоизолированной, то ее внутренняя энергия не будет изменяться несмотря на изменения, происходящие внутри системы. Если $A = 0$, $Q = 0$, то и $\Delta U = 0$.

При любых процессах, происходящих в теплоизолированной системе, ее внутренняя энергия не изменяется (закон сохранения внутренней энергии).

Рассмотрим теплоизолированную систему из двух тел с разными температурами. При контакте между ними будет проходить теплообмен. Тело с большей температурой будет отдавать некоторое количество теплоты, а тело с меньшей температурой — получать, пока температуры тел не станут равными. Так как суммарная внутренняя энергия не должна изменяться, то, на сколько уменьшится внутренняя энергия более нагретого тела, на столько должна увеличиться внутренняя энергия второго тела. Так как работа не совершается, то изменение внутренней энергии равно количеству теплоты.

Количество теплоты, отданное при теплообмене телом с большей температурой, равно по модулю количеству теплоты, полученному телом с меньшей температурой:

$$Q_{\text{пол}} = |Q_{\text{отд}}|.$$

Другая формулировка: *если тела образуют замкнутую систему и между ними происходит только теплообмен, то алгебраическая сумма отданных $Q_{\text{отд}}$ и полученных $Q_{\text{пол}}$ количеств теплоты равна нулю:*

$$\begin{aligned} Q_{\text{отд}} + Q_{\text{пол}} &= 0, \\ Q_{\text{отд}} < 0, \quad Q_{\text{пол}} > 0. \end{aligned}$$

2.2.7. Первый закон термодинамики

Закон сохранения и превращения энергии, распространенный на тепловые явления, называется первым законом (началом) термодинамики.

Можно дать формулировку этого закона исходя из способов изменения внутренней энергии.

Изменение внутренней энергии системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе:

$$\Delta U = A + Q.$$

Если рассматривать работу самой системы над внешними телами, то закон может быть сформулирован так:

количество теплоты, переданное системе, идет на изменение ее внутренней энергии и совершение системой работы над внешними телами:

$$Q = \Delta U + A'.$$

Если система изолирована и над ней не совершается работа и нет теплообмена с внешними телами, то в этом случае внутренняя энергия не изменяется. Если к системе не поступает теплота, то работа системой может совершаться только за счет уменьшения внутренней энергии. Это значит, что невозможно создать вечный двигатель – устройство, способное совершать работу без каких-либо затрат топлива.

Первый закон термодинамики для изопроцессов

Изотермический процесс: $Q = A' (T = \text{const}, \Delta U = 0)$.

Физический смысл: все переданное газу тепло идет на совершение работы.

Изобарный процесс: $Q = \Delta U + A'$.

Физический смысл: подводимое к газу тепло идет на увеличение его внутренней энергии и на совершение газом работы.

Изохорный процесс: $Q = \Delta U (V = \text{const}, A' = 0)$.

Физический смысл: внутренняя энергия газа увеличивается за счет подводимого тепла.

Адиабатный процесс: $\Delta U = -A'$ или $A = \Delta U (Q = 0)$.

Физический смысл: внутренняя энергия газа уменьшается за счет совершения газом работы. Температура газа при этом понижается.

Задачи об изменении внутренней энергии тел

Такие задачи можно разделить на группы:

- При взаимодействии тел изменяется их внутренняя энергия без совершения работы над внешней средой.
- Рассматриваются явления, связанные с превращением одного вида энергии в другой при взаимодействии двух тел. В результате происходит изменение внутренней энергии одного тела вследствие совершенной им или над ним работы.

При решении задач первой группы:

- установить, у каких тел внутренняя энергия уменьшается, а у каких – возрастает;
- составить уравнение теплового баланса ($\Delta U = 0$), при записи которого в выражении $Q = cm(t_2 - t_1)$ для изменения внутренней энергии нужно вычитать из конечной температуры тела начальную и суммировать члены с учетом получающегося знака;
- решить полученное уравнение относительно искомой величины;
- проверить решение.

При решении задач второй группы:

- убедиться, что в процессе взаимодействия тел теплота извне к ним не подводится, т.е. действительно ли $Q = 0$;
- установить, у какого из двух взаимодействующих тел изменяется внутренняя энергия и что является причиной этого изменения — работа, совершенная самим телом, или работа, совершенная над телом;
- записать уравнение $Q = \Delta U + A$ для тела, у которого изменяется внутренняя энергия, учитывая знак перед работой и КПД рассматриваемого процесса;
- если работа совершается за счет уменьшения внутренней энергии одного из тел, то $A = -\Delta U$, а если внутренняя энергия тела увеличивается за счет работы, совершенной над телом, то $A = \Delta U$;
- найти выражения для ΔU и A ;
- подставить в исходное уравнение вместо ΔU и A выражения для них, получить окончательное соотношение для определения искомой величины;
- решить полученное уравнение относительно искомой величины;
- проверить решение.

2.2.8. Второй закон термодинамики

Все процессы в природе протекают только в одном направлении. В обратном направлении самопроизвольно они протекать не могут. *Необратимым* называется процесс, обратный которому может протекать только как составляющая более сложного процесса.

Примеры необратимых процессов:

- переход тепла от более нагретого тела к менее нагретому телу;
- переход механической энергии во внутреннюю энергию.

Первый закон термодинамики ничего не говорит о направлении процессов в природе.

Второй закон термодинамики выражает необратимость процессов, происходящих в природе. Существует несколько его формулировок.

Второй закон термодинамики (формулировка Клаузиуса):

невозможно перевести тепло от более холодной системы к более горячей при отсутствии одновременных изменений в обеих системах или окружающих телах.

Второй закон термодинамики (формулировка Кельвина):

невозможно осуществить такой периодический процесс, единственным результатом которого было бы получение работы за счет теплоты, взятой от одного источника.

Эта формулировка говорит также и о том, что невозможно построить вечный двигатель второго рода, то есть двигатель, совершающий работу за счет охлаждения какого-либо одного тела.

Важно!

В формулировке второго закона термодинамики большое значение имеют слова «единственным результатом». Если процессы, о которых идет речь, не являются единственными, то запреты снимаются. Например, в холодильнике происходит передача тепла от более холодного тела к нагретому и при этом осуществляется компенсирующий процесс превращения механической энергии окружающих тел во внутреннюю энергию.

Второй закон термодинамики выполняется для систем с огромным числом частиц. В системах с малым количеством частиц возможны флуктуации — отклонения от равновесия.

2.2.9. КПД тепловой машины

- ◆ **Коэффициентом полезного действия (КПД) тепловой машины (двигателя)** называется отношение работы A , совершаемой двигателем за цикл, к количеству теплоты Q_1 , полученному за цикл от нагревателя:

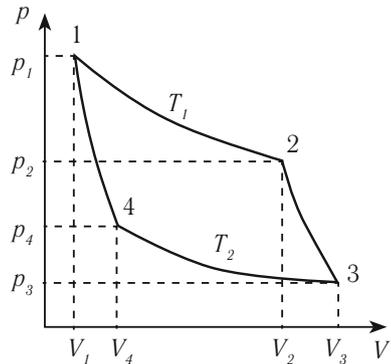
$$\eta = \frac{A}{Q_1} 100\% = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} 100\% = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} 100\%.$$

Тепловая машина с максимальным КПД была создана Карно. В машине осуществляется круговой процесс (*цикл Карно*), при котором после ряда преобразований система возвращается в начальное состояние.

Цикл Карно состоит из четырех стадий:

1. Изотермическое расширение (на рисунке — процесс 1–2). В начале процесса рабочее тело имеет температуру T_1 , то есть температуру нагревателя. Затем тело приводится в контакт с нагревателем, который изотермически (при постоянной температуре) передает ему количество теплоты Q_1 . При этом объем рабочего тела увеличивается.
2. Адиабатное расширение (на рисунке — процесс 2–3). Рабочее тело отсоединяется от нагревателя и продолжает расширяться без теплообмена с окружающей средой. При этом его температура уменьшается до температуры холодильника T_2 .

3. Изотермическое сжатие (на рисунке — процесс 3–4). Рабочее тело, имеющее к тому времени температуру T_2 , приводится в контакт с холодильником и начинает изотермически сжиматься, отдавая холодильнику количество теплоты Q_2 .
4. Адиабатное сжатие (на рисунке — процесс 4–1). Рабочее тело отсоединяется от холодильника. При этом его температура увеличивается до температуры нагревателя T_1 .



КПД цикла Карно:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} 100\% .$$

Отсюда видно, что КПД цикла Карно с идеальным газом зависит только от температуры нагревателя (T_1) и холодильника (T_2).

Из уравнения следуют выводы:

- для повышения КПД тепловой машины нужно увеличить температуру нагревателя и уменьшить температуру холодильника;
- КПД тепловой машины всегда меньше 1.

Цикл Карно обратим, так как все его составные части являются равновесными процессами.

КПД тепловых двигателей: двигатель внутреннего сгорания — 30%, дизельный двигатель — 40%, паровая турбина — 40%, газовая турбина — 25–30%.

2.2.10. Принципы действия тепловых машин

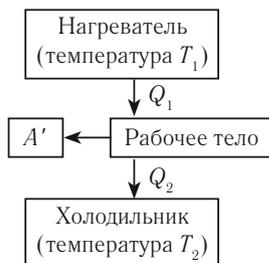
- ◆ **Тепловым двигателем** называют устройство, преобразующее внутреннюю энергию топлива в механическую энергию.

Основные части теплового двигателя:

- *Нагреватель* — тело с постоянной температурой, преобразующее внутреннюю энергию топлива в энергию газа. В каждом цикле работы двигателя нагреватель передает рабочему телу некоторое количество теплоты.
- *Рабочее тело* — это газ, совершающий работу при расширении.

- Холодильник — тело с постоянной температурой, которому рабочее тело передает часть тепла.

Любая тепловая машина получает от нагревателя некоторое количество теплоты Q_1 и передает холодильнику количество теплоты Q_2 . Так как $Q_1 > Q_2$, то совершается работа $A' = Q_1 - Q_2$.



Тепловой двигатель должен работать циклически, поэтому расширение рабочего тела должно сменяться его сжатием. Работа расширения газа должна быть больше работы сжатия, совершаемой внешними силами (условие совершения полезной работы). Температура газа при расширении должна быть выше, чем температура при сжатии. Тогда давление газа во всех промежуточных состояниях при сжатии будет меньше, чем при расширении.

В реальных тепловых машинах нагревателем является камера сгорания. В них рабочее тело нагревается за счет тепла, выделяющегося при сгорании топлива. Количество теплоты, выделяющееся при сгорании топлива, вычисляется по формуле:

$$Q = q \cdot m,$$

где q — удельная теплота сгорания топлива, m — масса топлива. Холодильником чаще всего у реальных двигателей служит атмосфера.

Виды тепловых двигателей:

- паровой двигатель;
- турбина (паровая, газовая);
- двигатель внутреннего сгорания (карбюраторный, дизельный);
- реактивный двигатель.

Тепловые двигатели широко используются на всех видах транспорта: на автомобилях — двигатели внутреннего сгорания; на железнодорожном транспорте — дизельные двигатели (на тепловозах); на водном транспорте — турбины; в авиации — турбореактивные и реактивные двигатели. На тепловых и атомных электростанциях тепловые двигатели приводят в движение роторы генераторов переменного тока.

2.2.11. Проблемы энергетики и охрана окружающей среды

Тепловые двигатели широко применяются на транспорте и в энергетике (тепловые и атомные электростанции). Использование тепловых

двигателей сильно влияет на состояние биосферы Земли. Можно выделить следующие вредные факторы:

- при сжигании топлива используется кислород из атмосферы, что приводит к снижению содержания кислорода в воздухе;
- при сгорании топлива в атмосферу выделяется углекислый газ. Концентрация углекислого газа в атмосфере повышается. Это изменяет прозрачность атмосферы, так как молекулы углекислого газа поглощают инфракрасное излучение, что ведет к повышению температуры (парниковый эффект);
- при сжигании угля в атмосферу поступают азотные, серные соединения и соединения свинца, вредные для здоровья человека.

Решение проблемы охраны окружающей среды от вредного воздействия предприятий тепловой энергетики требует комплексного подхода. Массовыми загрязнителями при работе тепловых электростанций являются летучая зола, диоксид серы и оксиды азота. Методы сокращения выбросов зависят от свойств топлива и условия его сжигания. Предотвращение загрязнения летучей золой достигается очисткой всего объема продуктов сгорания твердого топлива в высокоэффективных золоуловителях. Сокращение выбросов оксидов азота с продуктами сгорания топлива на тепловых электростанциях, а также в парогазовых и газотурбинных установках обеспечивается, главным образом, технологией сжигания топлива. Уменьшение выброса диоксида серы может быть достигнуто различными методами облагораживания и переработки топлива вне тепловых электростанций либо непосредственно на тепловых электростанциях, а также очисткой дымовых газов.

Контроль за выбросом вредных веществ электростанций осуществляется специальными приборами.

В ряде случаев достаточно эффективным решением вопросов очистки выбросов в атмосферу остается сооружение фильтров-уловителей и дымовых труб. У дымовой трубы два назначения: первое — создавать тягу и тем самым заставлять воздух — обязательный участник процесса горения — в нужном количестве и с должной скоростью входить в топку; второе — отводить продукты горения (вредные газы и имеющиеся в дыме твердые частицы) в верхние слои атмосферы. Благодаря непрерывному турбулентному движению вредные газы и твердые частицы уносятся далеко от источника их возникновения и рассеиваются.

Для рассеивания сернистого ангидрида, содержащегося в дымовых трубах тепловых электростанций, сооружаются дымовые трубы высотой 180, 250 и 320 м. Тепловые электростанции России, работающие на твердом топливе, за год выбрасывают в отвалы около 100 млн т золы и шлаков. Зола и шлаки занимают большие площади земель, неблагоприятно влияют на окружающую среду.

Более половины всех загрязнений создает транспорт. Один из путей решения проблемы защиты окружающей среды заключается в переходе на дизельные двигатели, электродвигатели, повышение КПД.

Алгоритм решения задач раздела «Термодинамика»:

- выделить систему тел и определить ее тип (замкнутая, адиабатически замкнутая, замкнутая в механическом смысле, незамкнутая);
- выяснить, как изменяются параметры состояния (p, V, T) и внутренняя энергия каждого тела системы при переходе из одного состояния в другое;
- записать уравнения, связывающие параметры двух состояний системы, формулы для расчета изменения внутренней энергии каждого тела системы при переходе из одного состояния в другое;
- определить изменение механической энергии системы и работу внешних сил по изменению ее объема;
- записать формулу первого закона термодинамики или закона сохранения и превращения энергии;
- решить систему уравнений относительно искомой величины;
- проверить решение.

Основные формулы раздела «Термодинамика»

Внутренняя энергия:

$$U = \frac{3}{2} \nu \cdot R \cdot T, \quad U = \frac{3}{2} pV \quad \text{— одноатомный идеальный газ}$$

$$U = \frac{5}{2} \nu \cdot R \cdot T \quad \text{— двухатомный идеальный газ}$$

Работа газа:

$$A' = p \cdot \Delta V \quad \text{— в изобарном процессе}$$

$$A' = \frac{m}{M} R T \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \text{— в изотермическом процессе}$$

$$A' = -\frac{3}{2} \nu R \Delta T \quad \text{— в адиабатном процессе (одноатомный газ)}$$

$$Q = c \cdot m (T_2 - T_1) \quad \text{— количество теплоты, необходимое для нагревания}$$

- $Q = \lambda \cdot m$ — количество теплоты, необходимое для плавления
- $Q = L \cdot m$ — количество теплоты, необходимое для парообразования
- $Q = q \cdot m$ — количество теплоты, выделяющееся при сгорании топлива
- $\Delta U = A + Q$ или $Q = \Delta U + A'$ — первый закон термодинамики
- $Q = A' (T = const, \Delta U = 0)$ — изотермический процесс
- $Q = \Delta U + A'$ — изобарный процесс
- $Q = \Delta U (V = const, A' = 0)$ — изохорный процесс
- $\Delta U = -A'$ или $A = \Delta U (Q = 0)$ — адиабатный процесс
- $\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$ — коэффициент полезного действия теплового двигателя
- $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ — КПД цикла Карно

3. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

- ◆ **Электродинамика** — раздел физики, изучающий свойства и взаимодействия электрических зарядов, осуществляемые посредством электромагнитного поля.

3.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

- ◆ **Электростатикой** называется раздел электродинамики, в котором рассматриваются свойства и взаимодействия неподвижных электрически заряженных тел или частиц.
- ◆ **Электромагнитное взаимодействие** — это взаимодействие между электрически заряженными частицами или макротелами.
- ◆ **Точечный заряд** — заряженное тело, размер которого мал по сравнению с расстоянием, на котором оценивается его действие.

3.1.1. Электризация тел

- ◆ **Электризация** — процесс сообщения телу электрического заряда, т. е. нарушение его электрической нейтральности. Процесс электризации представляет собой перенесение с одного тела на другое электронов или ионов. В результате электризации тело получает возможность участвовать в электромагнитном взаимодействии.

Способы электризации:

- трением, — например, электризация эбонитовой палочки при трении о мех. При тесном соприкосновении двух тел часть электронов переходит с одного тела на другое; в результате этого на поверхности у одного из тел создается недостаток электронов и тело получает положительный заряд, а у другого — избыток, и тело заряжается отрицательно. Величины зарядов тел одинаковы;
- через влияние (электростатическая индукция) — тело остается электрически нейтральным, электрические заряды внутри него перераспределяются так, что разные части тела приобретают разные по знаку заряды;
- при соприкосновении заряженного и незаряженного тела — заряд при этом распределяется между этими телами пропорцио-

нально их размерам. Если размеры тел одинаковы, то заряд распределяется между ними поровну;

- при ударе;
- под действием излучения — под действием света с поверхности проводника могут вырываться электроны, при этом проводник приобретает положительный заряд.

3.1.2. Взаимодействие зарядов. Два вида зарядов

- ◆ **Электрический заряд** — скалярная физическая величина, характеризующая способность тела участвовать в электромагнитных взаимодействиях.

Обозначение — q , единица измерения в СИ — *кулон* ($Kл$).

Существуют два вида электрических зарядов: положительный и отрицательный. Наименьший отрицательный заряд имеет электрон ($-1,6 \cdot 10^{-19} Kл$), наименьший положительный заряд ($1,6 \cdot 10^{-19} Kл$) — протон. Минимальный заряд, который может быть сообщен телу, равен заряду электрона (элементарный заряд). Если тело имеет избыточные (лишние) электроны, то тело заряжено отрицательно, если у тела недостаток электронов, то тело заряжено положительно.

Величина заряда тела будет равна

$$q = N \cdot e,$$

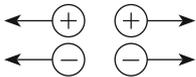
где N — число избыточных или недостающих электронов;

e — элементарный заряд, равный $1,6 \cdot 10^{-19} Kл$.

Важно!

Частица может не иметь заряда, но заряд без частицы не существует.

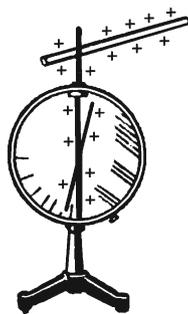
Электрические заряды взаимодействуют:

- *заряды одного знака отталкиваются:*

- *заряды противоположных знаков притягиваются:*


Прибор для обнаружения электрического заряда называется *электроскоп*. Основная часть прибора — металлический стержень, на котором закреплены два листочка металлической фольги, помещенные в стеклянный сосуд. При соприкосновении заряженного тела со стержнем электроскопа заряды распределяются между листочками фольги. Так как заряд листочков одинаков по знаку, они отталкиваются.



Для измерения зарядов можно использовать и *электромтр*. Основные части его — металлический стержень и стрелка, которая может вращаться вокруг горизонтальной оси. Стержень со стрелкой закреплен в пластмассовой втулке и помещен в металлический корпус, закрытый стеклянными крышками. При соприкосновении заряженного тела со стержнем стержень и стрелка получают электрические заряды одного знака. Стрелка поворачивается на некоторый угол.



3.1.3. Закон сохранения электрического заряда

Систему называют *замкнутой (электрически изолированной)*, если в ней не происходит обмена зарядами с окружающей средой.

В любой замкнутой (электрически изолированной) системе сумма электрических зарядов остается постоянной при любых взаимодействиях внутри нее.

Полный электрический заряд (q) системы равен алгебраической сумме ее положительных и отрицательных зарядов ($q_1, q_2 \dots q_N$):

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_N,$$

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

Важно!

В природе не возникают и не исчезают заряды одного знака: положительный и отрицательный заряды могут взаимно нейтрализовать друг друга, если они равны по модулю.

3.1.4. Закон Кулона

Закон Кулона был открыт экспериментально: в опытах с использованием крутильных весов измерялись силы взаимодействия заряженных шаров.

Закон Кулона формулируется так:

сила взаимодействия F двух точечных неподвижных электрических зарядов в вакууме прямо пропорциональна их модулям q_1 и q_2 и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними r :

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

где $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{H \cdot M^2}{Kл^2}$ – коэффициент пропорциональности,

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{Kл^2}{H \cdot M^2}$ – электрическая постоянная.

Коэффициент k численно равен силе, с которой два точечных заряда величиной 1 Кл каждый взаимодействуют в вакууме на расстоянии 1 м.

Сила Кулона направлена вдоль прямой, соединяющей взаимодействующие заряды. Заряды взаимодействуют друг с другом с силами, равными по величине и противоположными по направлению.



Значение силы Кулона зависит от среды, в которой они находятся. В этом случае формула закона:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon \cdot r^2},$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость среды.

Закон Кулона применим к взаимодействию

- неподвижных точечных зарядов;
- равномерно заряженных тел сферической формы.

В этом случае r – расстояние между центрами сферических поверхностей.

Важно!

Если заряженное тело протяженное, то его необходимо разбить на точечные заряды, рассчитать силы их попарного взаимодействия и найти равнодействующую этих сил (принцип суперпозиции).

3.1.5. Действие электрического поля на электрические заряды

- ◆ **Электрическое поле** – это особая форма материи, существующая вокруг электрически заряженных тел.

Впервые понятие электрического поля было введено Фарадеем. Он объяснял взаимодействие зарядов следующим образом: каждый заряд создает вокруг себя электрическое поле, которое с некоторой силой действует на другой заряд.

Свойства электрического поля заключаются в том, что оно:

- материально;
- создается зарядом;
- обнаруживается по действию на заряд;
- непрерывно распределено в пространстве;
- ослабевает с увеличением расстояния от заряда.

Действие заряженного тела на окружающие тела проявляется в виде сил притяжения и отталкивания, стремящихся поворачивать и перемещать эти тела по отношению к заряженному телу.

Силу, с которой электрическое поле действует на заряд, можно рассчитать по формуле:

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

где \vec{E} — напряженность электрического поля, q — заряд.

Решение задач о точечных зарядах и системах, сводящихся к ним, основано на применении законов механики с учетом закона Кулона и вытекающих из него следствий.

Алгоритм решения задач о точечных зарядах и системах, сводящихся к ним:

- сделать рисунок; указать силы, действующие на точечный заряд, помещенный в электрическое поле;
- записать для заряда условие равновесия или основное уравнение динамики материальной точки;
- выразить силы электрического взаимодействия через заряды и поля и подставить эти выражения в исходное уравнение;
- если при взаимодействии заряженных тел между ними происходит перераспределение зарядов, к составленному уравнению добавить уравнение закона сохранения зарядов;
- записать математически все вспомогательные условия;
- решить полученную систему уравнений относительно неизвестной величины;
- проверить решение

3.1.6. Напряженность электрического поля

- ◆ **Напряженность электрического поля** \vec{E} – векторная физическая величина, равная отношению силы F , действующей на пробный точечный заряд, к величине этого заряда q :

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

Обозначение – \vec{E} , единица измерения в СИ – Н/Кл или В/м .

Напряженность поля точечного заряда в вакууме вычисляется по формуле:

$$E = \frac{k \cdot q_0}{r^2},$$

где $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$, q_0 – заряд, создающий поле,

r – расстояние от заряда, создающего поле, до данной точки.

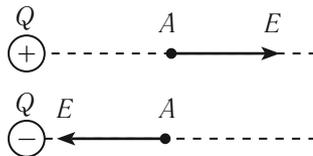
Напряженность поля точечного заряда в среде вычисляется по формуле:

$$E = \frac{k \cdot q_0}{\epsilon \cdot r^2}, \text{ где } \epsilon \text{ – диэлектрическая проницаемость среды.}$$

Важно!

Напряженность электрического поля не зависит от величины пробного заряда, она определяется величиной заряда, создающего поле.

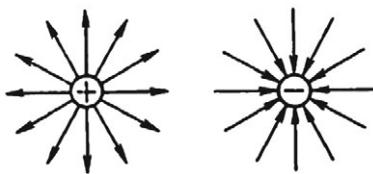
Направление вектора напряженности в данной точке совпадает с направлением силы, с которой поле действует на положительный пробный заряд, помещенный в эту точку.



Линией напряженности электрического поля называется линия, касательная к которой в каждой точке направлена вдоль вектора напряженности \vec{E} .

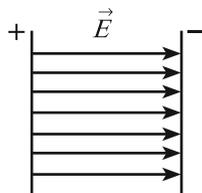
Линии напряженности электростатического поля начинаются на положительных электрических зарядах и заканчиваются на отрицательных электрических зарядах или уходят в бесконечность от положительного заряда и приходят из бесконечности к отрицательному заряду.

Распределение линий напряженности вокруг положительного и отрицательного точечных зарядов показано на рисунке.



Определяя направление вектора \vec{E} в различных точках пространства, можно представить картину распределения линий напряженности электрического поля.

Поле, в котором напряженность одинакова по модулю и направлению в любой точке, называется *однородным электрическим полем*. Однородным можно считать электрическое поле между двумя разноименно заряженными металлическими пластинами. Линии напряженности в однородном электрическом поле параллельны друг другу.



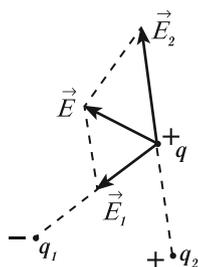
3.1.7. Принцип суперпозиции электрических полей

Каждый электрический заряд создает в пространстве электрическое поле независимо от наличия других электрических зарядов.

Принцип суперпозиции электрических полей: напряженность электрического поля системы N зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых каждым из них в отдельности:

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

Электрические поля от разных источников существуют в одной точке пространства и действуют на заряд независимо друг от друга.



3.1.8. Потенциальность электростатического поля

Электрическое поле с напряженностью \vec{E} при перемещении заряда q совершает работу. Работа A электростатического поля вычисляется по формуле:

$$A = qEd \cos \alpha,$$

где d — расстояние, на которое перемещается заряд,

α — угол между векторами напряженности электрического поля и перемещения заряда.

Важно!

Эта формула применима для нахождения работы только в однородном электростатическом поле.

Работа сил электростатического поля при перемещении заряда из одной точки поля в другую не зависит от формы траектории, а определяется только начальным и конечным положением заряда.

Потенциальным называется поле, работа сил которого по перемещению заряда по замкнутой траектории равна нулю.

Важно!

Работа сил электростатического поля при перемещении заряда по любой замкнутой траектории равна нулю. Электростатическое поле является потенциальным.

Работа электростатического поля по перемещению заряда равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком. В электродинамике энергию принято обозначать буквой W , так как буквой E обозначают напряженность поля:

$$A = -\Delta W.$$

Потенциальная энергия заряда q , помещенного в электростатическое поле, пропорциональна величине этого заряда. Потенциальная энергия взаимодействия зарядов вычисляется относительно нулевого уровня (аналогично потенциальной энергии поля силы тяжести). Выбор нулевого уровня потенциальной энергии определяется исходя из соображений удобства при решении задачи.

3.1.9. Потенциал электрического поля.

Разность потенциалов

- ◆ **Потенциал** — скалярная физическая величина, равная отношению потенциальной энергии электрического заряда в электростатическом поле к величине этого заряда.

Обозначение — φ , единица измерения в СИ — *вольт (В)*.

$$\varphi = \frac{W}{q}.$$

Потенциал φ является энергетической характеристикой электростатического поля.

- ◆ **Разность потенциалов** численно равна работе, которую совершает электрическая сила при перемещении единичного положительного заряда между двумя точками поля:

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

Обозначение — $\Delta\varphi$, единица измерения в СИ — *вольт (В)*.

Иногда разность потенциалов обозначают буквой U и называют **напряжением**.

Важно!

Разность потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, а не изменение потенциала $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$. Тогда работа электростатического поля равна:

$$A = \Delta\varphi \cdot q = qU.$$

Важно!

Эта формула позволяет вычислить работу электростатических сил в любом поле.

В электростатике часто вычисляют потенциал относительно бесконечно удаленной точки. В этом случае потенциал поля в данной точке равен работе, которую совершают электрические силы при удалении единичного положительного заряда из данной точки в бесконечность.

Потенциал поля точечного заряда q в точке, удаленной от него на расстояние r , вычисляется по формуле:

$$\varphi = \frac{kq}{r}.$$

Для наглядного представления электрического поля используют *эквипотенциальные поверхности*.

Важно!

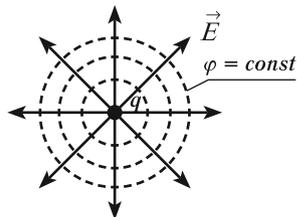
Внутри проводящего шара потенциал всех точек внутри шара равен потенциалу поверхности шара и вычисляется по формуле потенциала точечного заряда ($r = R$, где R — радиус шара). Напряженность поля внутри шара равна нулю.

Эквипотенциальной поверхностью, или поверхностью равного потенциала, называется поверхность, во всех точках которой потенциал имеет одинаковое значение.

Свойства эквипотенциальных поверхностей

- Вектор напряженности перпендикулярен эквипотенциальным поверхностям и направлен в сторону убывания потенциала.
- Работа по перемещению заряда по эквипотенциальной поверхности равна нулю.

В случае однородного поля эквипотенциальные поверхности представляют собой систему параллельных плоскостей. Для точечного заряда эквипотенциальные поверхности представляют собой концентрические окружности.



Разность потенциалов и напряженность связаны формулой:

$$\Delta\varphi = U = E \cdot d.$$

Из принципа суперпозиции полей следует принцип суперпозиции потенциалов:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots$$

Потенциал результирующего поля равен сумме потенциалов полей отдельных зарядов.

Важно!

Потенциалы складываются алгебраически, а напряженности — по правилу сложения векторов.

Решение задач о точечных зарядах и системах, сводящихся к ним, основано на применении законов сохранения, теоремы об изменении кинетической энергии заряда с учетом работы электростатических сил.

Алгоритм решения таких задач:

- установить характер и особенности электростатических взаимодействий объектов системы;
- ввести характеристики (силовые и энергетические) этих взаимодействий, сделать рисунок;
- записать законы сохранения и движения для объектов;
- выразить энергию электростатического взаимодействия через заряды, потенциалы, напряженности;
- составить систему уравнений и решить ее относительно искомой величины;
- проверить решение.

3.1.10. Проводники в электрическом поле

◆ **Проводниками** называют вещества, в которых может происходить упорядоченное перемещение электрических зарядов, т. е. протекать электрический ток.

Проводниками являются металлы, водные растворы солей, кислот, ионизованные газы. *В проводниках есть свободные электрические заряды.* В металлах валентные электроны взаимодействующих друг с другом атомов становятся свободными.

Если металлический проводник поместить в электрическое поле, то под его действием свободные электроны проводника начнут перемещаться в направлении, противоположном направлению напряженности поля. В результате на одной поверхности проводника появится избы-

точный отрицательный заряд, а на противоположной — избыточный положительный заряд.

Эти заряды создают внутри проводника внутреннее электрическое поле, вектор напряженности которого направлен противоположно вектору напряженности внешнего поля. Под действием внешнего электростатического поля электроны проводимости в металлическом проводнике перераспределяются так, что напряженность результирующего поля в любой точке внутри проводника равна нулю. Электрические заряды расположены на поверхности проводника.

Важно!

Если внутри проводника есть полость, то напряженность в ней будет равна нулю независимо от того, какое поле имеется вне проводника и как заряжен проводник. Внутренняя полость в проводнике экранирована (защищена) от внешних электростатических полей. На этом основана электростатическая защита.

Явление перераспределения зарядов во внешнем электростатическом поле называется **электростатической индукцией**.

Заряды, разделенные электростатическим полем, взаимно компенсируют друг друга, если проводник удалить из поля. Если такой проводник разрезать, не вынося из поля, то его части будут иметь заряды разных знаков.

Важно!

Во всех точках поверхности проводника вектор напряженности направлен перпендикулярно к его поверхности. Поверхность проводника является эквипотенциальной (потенциалы всех точек поверхности проводника равны).

3.1.11. Диэлектрики в электрическом поле

- ◆ **Диэлектриками** называют вещества, не проводящие электрический ток. Диэлектриками являются стекло, фарфор, резина, дистиллированная вода, газы.

В диэлектриках нет свободных зарядов, все заряды связаны. В молекуле диэлектрика суммарный отрицательный заряд электронов равен положительному заряду ядра. Различают полярные и неполярные диэлектрики.

В молекулах **полярных диэлектриков** ядра и электроны расположены так, что центры масс положительных и отрицательных зарядов не

совпадают и находятся на некотором расстоянии друг от друга. То есть молекулы представляют собой диполи независимо от наличия внешнего электрического поля. В отсутствие внешнего электрического поля из-за теплового движения молекул диполи расположены хаотично, поэтому суммарная напряженность поля всех диполей диэлектрика равна нулю.

Если в отсутствие внешнего электрического поля центры масс положительных и отрицательных зарядов в молекуле диэлектрика совпадают, то он называется *неполярным*. Пример такого диэлектрика — молекула водорода. Если такой диэлектрик поместить во внешнее электрическое поле, то направления векторов сил, действующих на положительные и отрицательные заряды, будут противоположными. В результате молекула деформируется и превращается в диполь. При внесении диэлектрика в электрическое поле происходит его поляризация.

◆ **Поляризация диэлектрика** — процесс смещения в противоположные стороны разноименных связанных зарядов, входящих в состав атомов и молекул вещества в электрическом поле.

Если диэлектрик неполярный, то в его молекулах происходит смещение положительных и отрицательных зарядов. На поверхности диэлектрика появятся поверхностные связанные заряды. Связанными эти заряды называют потому, что они не могут свободно перемещаться отдельно друг от друга.

Внутри диэлектрика суммарный заряд равен нулю, а на поверхностях заряды не скомпенсированы и создают внутри диэлектрика поле, вектор напряженности которого направлен противоположно вектору напряженности внешнего поля. Это значит, что внутри диэлектрика поле имеет меньшую напряженность, чем в вакууме.

Физическая величина, равная отношению модуля напряженности электрического поля в вакууме к модулю напряженности электрического поля в однородном диэлектрике, называется **диэлектрической проницаемостью вещества**:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}.$$

В полярном диэлектрике во внешнем электрическом поле происходит поворот диполей, и они выстраиваются вдоль линий напряженности.

Если внесенный в электрическое поле диэлектрик разрезать, то его части будут электрически нейтральны.

3.1.12. Электрическая емкость. Конденсатор

- ◆ **Электрическая емкость (электроемкость)** — скалярная физическая величина, характеризующая способность уединенного проводника удерживать электрический заряд.

Обозначение — C , единица измерения в СИ — *фарад* (Φ).

Уединенный проводник — это проводник, удаленный от других проводников и заряженных тел.

Фарад — электроемкость такого уединенного проводника, потенциал которого изменяется на $1 В$ при сообщении ему заряда $1 Кл$:

$$1\Phi = \frac{1Кл}{1В}.$$

Формула для вычисления электроемкости:

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

где q — заряд проводника, φ — его потенциал.

Электроемкость зависит от его линейных размеров и геометрической формы. Электроемкость не зависит от материала проводника и его агрегатного состояния. Электроемкость проводника прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости среды, в которой он находится.

- ◆ **Конденсатор** — это система из двух проводников, разделенных слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников.

Проводники называют обкладками конденсатора. Заряды обкладок конденсатора равны по величине и противоположны по знаку заряда. Электрическое поле сосредоточено между обкладками конденсатора. Конденсаторы используют для накопления электрических зарядов.

Электроемкость конденсатора рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{q}{U},$$

где q — модуль заряда одной из обкладок,

U — разность потенциалов между обкладками.

Электроемкость конденсатора зависит от линейных размеров и геометрической формы и расстояния между проводниками. Электроемкость конденсатора прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости вещества между проводниками.

Плоский конденсатор представляет две параллельные пластины площадью S , находящиеся на расстоянии d друг от друга.

Емкость плоского конденсатора:

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

где ϵ — диэлектрическая проницаемость вещества между обкладками,
 ϵ_0 — электрическая постоянная.

На электрической схеме конденсатор обозначается: 

Виды конденсаторов:

- по типу диэлектрика — воздушный, бумажный и т.д.;
- по форме — плоский, цилиндрический, сферический;
- по емкости — постоянной и переменной емкости.

Конденсаторы можно соединять между собой.

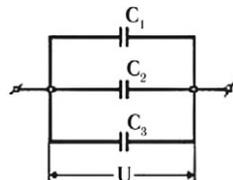
Параллельное соединение конденсаторов

При параллельном соединении конденсаторы соединяются одновременно заряженными обкладками. Напряжения конденсаторов равны:

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n,$$
$$q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n.$$

Общая емкость:

$$C = C_1 + C_2 + \dots$$



Последовательное соединение конденсаторов

При последовательном соединении конденсаторов соединяют их разноименно заряженные обкладки.

Заряды конденсаторов при таком соединении равны:

$$q = q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_n.$$

Общее напряжение:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n.$$

Величина, обратная общей емкости:

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

При таком соединении общая емкость всегда меньше емкостей отдельных конденсаторов.

Важно!

Если конденсатор подключен к источнику тока, то разность потенциалов между его обкладками не изменяется при изменении электро-

емкости и равна напряжению источника. Если конденсатор заряжен до некоторой разности потенциалов и отключен от источника тока, то его заряд не изменяется при изменении электроемкости.

Применение конденсаторов

Конденсаторы используются в радиоэлектронных приборах как накопители заряда, для сглаживания пульсаций в выпрямителях переменного тока.

3.1.13. Энергия электрического поля конденсатора

Энергия заряженного конденсатора равна работе внешних сил, которую необходимо затратить, чтобы зарядить конденсатор.

Электрическая энергия конденсатора сосредоточена в пространстве между обкладками конденсатора, то есть в электрическом поле, поэтому ее называют **энергией электрического поля**. Формулы для вычисления энергии электрического поля:

$$W = \frac{q \cdot U}{2} = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{q^2}{2C}.$$

Так как напряженность электрического поля прямо пропорциональна напряжению, то энергия электрического поля конденсатора пропорциональна квадрату напряженности.

Плотность энергии электрического поля:

$$w = \frac{W_C}{V} = \frac{\epsilon_0 E^2}{2},$$

где V – объем пространства между обкладками конденсатора.

Плотность энергии не зависит от параметров конденсатора, а определяется только напряженностью электрического поля.

Основные формулы раздела «Электрическое поле»

$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const}$ – закон сохранения заряда

Закон Кулона:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \quad \text{– в вакууме}$$

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon \cdot r^2} \quad \text{– в среде}$$

$$\vec{F} = E \vec{q} \quad - \text{ электрическая сила}$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad - \text{ напряженность}$$

Напряженность поля точечного заряда:

$$E = \frac{k \cdot q_0}{r^2} \quad - \text{ в вакууме}$$

$$E = \frac{k \cdot q_0}{\varepsilon \cdot r^2} \quad - \text{ в среде}$$

$$\varphi = \frac{W}{q} \quad - \text{ потенциал}$$

$$A = qEd \cos \alpha \quad - \text{ работа электростатического поля}$$

$$A = \Delta\varphi \cdot q = qU$$

$$\varphi = \frac{kq}{r} \quad - \text{ потенциал поля точечного заряда}$$

$$\Delta\varphi = U = E \cdot d \quad - \text{ связь между напряженностью и напряжением}$$

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E} \quad - \text{ диэлектрическая проницаемость вещества}$$

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad - \text{ емкость}$$

$$C = \frac{q}{U} \quad - \text{ емкость конденсатора}$$

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \quad - \text{ емкость плоского конденсатора}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad - \text{ последовательное соединение конденсаторов}$$

$$q = q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_n$$

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

$$C = C_1 + C_2 + \dots \quad - \text{ параллельное соединение конденсаторов}$$

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n$$

$$W = \frac{q \cdot U}{2} = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{q^2}{2C} \quad - \text{ энергия электрического поля}$$

$$w = \frac{W_C}{V} = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} \quad - \text{ плотность энергии электрического поля}$$

3.2. ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

3.2.1. Постоянный электрический ток. Сила тока

- ◆ **Электрический ток** — это упорядоченное движение заряженных частиц.

Условия существования электрического тока в проводнике:

- наличие свободных заряженных частиц;
- наличие электрического поля.

Напряженность электрического поля должна быть постоянной.

Цепь постоянного тока должна быть замкнутой.

Важно!

Тепловое движение заряженных частиц нельзя назвать электрическим током, так как оно беспорядочное.

Электрический ток можно обнаружить по его действиям:

- тепловому — при протекании тока проводник нагревается;
- химическому — изменяется состав вещества при прохождении электрического тока (электролиз);
- магнитному — электрический ток создает магнитное поле.

За направление тока принимают направление движения положительно заряженной частицы.

- ◆ **Сила тока** — это скалярная физическая величина, равная отношению заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника, ко времени, за которое этот заряд переносится.

Обозначение — I , единица измерения в СИ — *ампер* (A) (является основной).

Вычисляется по формуле:

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

Если за одинаковые промежутки времени через поперечное сечение проводника проходит одинаковый заряд, то ток постоянный.

Для измерения силы тока используют *амперметр*.

Условное обозначение на схемах: \textcircled{A} .

- ◆ **Амперметр** — измерительный прибор для определения силы тока в электрической цепи.

При измерении силы тока амперметр включают в цепь последовательно с тем прибором, силу тока в котором измеряют, и с соблюдением полярности. Клемму амперметра со знаком «+» нужно обя-

зательно соединять с проводом, идущим от положительного полюса источника тока.

Для того чтобы включение амперметра не влияло на величину измеряемого тока, его сопротивление по сравнению с сопротивлением нагрузки должно быть как можно меньшим. Каждый амперметр рассчитывается на некоторое определенное максимальное значение измеряемой величины. Но возникают ситуации, когда необходимо выполнить измерение силы тока больше предельно допустимого значения силы тока.

Для этого параллельно амперметру присоединяют проводник (шунт), по которому проходит часть измеряемого тока. Значение сопротивления этого проводника рассчитывается так, чтобы сила тока, проходящего через амперметр, не превышала его максимально допустимого значения.

Сопротивление шунта рассчитывается по формуле:

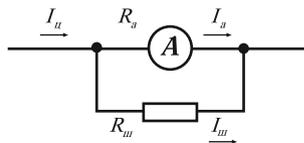
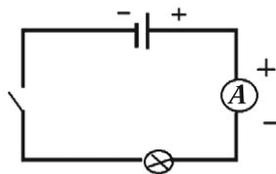
$$R_{ш} = \frac{R_a \cdot I_a}{I_{ц} - I_a} = \frac{R_a}{n-1},$$

где $I_{ц}$ — сила тока в цепи, I_a — максимально допустимая для данного амперметра сила тока, R_a — сопротивление амперметра,

$$n = \frac{I_{ц}}{I_a}.$$

При этом цена деления прибора увеличивается в n раз, а точность измерений во столько же раз уменьшается.

Работающим с электрическими цепями надо знать, что для человеческого организма безопасной считается сила тока до 1 мА. Сила тока больше 100 мА приводит к серьезным поражениям организма.



3.2.2. Постоянный электрический ток. Напряжение

В проводнике, по которому протекает ток, заряды движутся под действием сил электростатического поля. Работу электростатических сил характеризуют разностью потенциалов или напряжением.

- ◆ **Электрическое напряжение** — скалярная физическая величина, равная отношению работы по перемещению электрического заряда между двумя точками цепи к величине этого заряда.

Обозначение — U , единица измерения в СИ — *вольт (В)*.

Формула для вычисления:

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

Напряжение равно разности потенциалов только в том случае, если рассматриваемый участок цепи не содержит источник тока ($\mathcal{E}DC=0$).

Измеряют напряжение *вольтметром*.

Изображение вольтметра на схеме: \textcircled{V} .

При измерении напряжения вольтметр включают в цепь параллельно с тем прибором, напряжение на котором измеряют, и с соблюдением полярности. Клемму вольтметра со знаком «+» нужно обязательно соединять с проводом, идущим от положительного полюса источника тока. Для того чтобы включение вольтметра не влияло на измерение напряжения, его сопротивление должно быть большим.

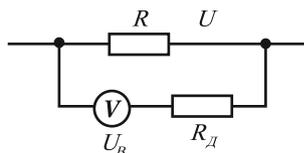
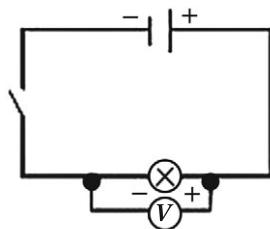
Для измерения напряжения больше, чем допустимое для данного вольтметра, используют добавочное сопротивление — *резистор*, включаемый последовательно с вольтметром.

Величина добавочного сопротивления рассчитывается по формуле:

$$R_D = \frac{U - U_B}{U_B} R_B = (n - 1)R_B,$$

где U — напряжение, которое нужно измерить, U_B — напряжение, на которое рассчитан вольтметр, $n = \frac{U}{U_B}$, R_B — сопротивление вольтметра.

При этом цена деления прибора увеличивается в n раз, а точность измерений во столько же раз уменьшается.



3.2.3. Закон Ома для участка цепи

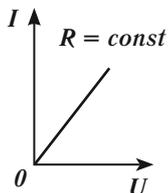
Взаимосвязь между силой тока, протекающей по проводнику, и напряжением на его концах была экспериментально установлена Г. Омом и носит название закона Ома для участка цепи.

Закон Ома для участка цепи

Сила тока прямо пропорциональна напряжению на концах участка и обратно пропорциональна его сопротивлению:

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

График зависимости силы тока от напряжения называется *вольт-амперной характеристикой*. Из закона Ома для участка цепи следует, что при постоянном сопротивлении сила тока прямо пропорциональна напряжению. Следовательно, вольт-амперная характеристика для металлического проводника представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат.



Проводник с такими свойствами называется резистором.

Угол наклона графика к оси напряжений зависит от сопротивления проводника. Тангенс угла наклона графика равен проводимости резистора.

3.2.4. Электрическое сопротивление.

Удельное сопротивление вещества

- ◆ **Электрическое сопротивление** — свойство материала проводника препятствовать прохождению через него электрического тока.

Обозначение — R , единица измерения в СИ — *Ом*.

Объяснить наличие сопротивления можно на основе строения металлических проводников. Свободные электроны при движении по проводнику встречают на своем пути ионы кристаллической решетки и другие электроны и, взаимодействуя с ними, неизбежно теряют часть своей энергии. Различные металлические проводники, имеющие различное атомное строение, оказывают различное сопротивление электрическому току.

Чем больше сопротивление проводника, тем хуже он проводит электрический ток.

Сопротивление различных проводников зависит от материала, из которого они изготовлены, их длины, геометрической формы и температуры. Для характеристики электрического сопротивления различных материалов введено понятие так называемого удельного сопротивления.

- ◆ **Удельным сопротивлением** называется сопротивление проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м^2 .

Обозначение — ρ , единица измерения в СИ — $\text{Ом}\cdot\text{м}$.

Каждый материал, из которого изготавливается проводник, обладает своим удельным сопротивлением.

Например, удельное сопротивление меди равно $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, т.е. медный проводник длиной 1 м и сечением 1 м^2 обладает сопротивлением $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}$. На практике часто используют единицу удельного сопротивления $\frac{\text{Ом}\cdot\text{мм}^2}{\text{м}}$.

Электрическое сопротивление проводника прямо пропорционально длине проводника и обратно пропорционально площади поперечного сечения проводника.

$$\text{Формула для вычисления: } R = \frac{\rho \cdot l}{S}.$$

Сопротивление проводника увеличивается с ростом температуры. Удельное сопротивление зависит от температуры:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta T),$$

где ρ_0 — удельное сопротивление при $T_0 = 293 \text{ К}$ (20°C),
 $\Delta T = T - T_0$, α — температурный коэффициент сопротивления.

Единица измерения температурного коэффициента сопротивления — К^{-1} .

При нагревании увеличивается интенсивность движения частиц вещества. Это создает трудности для направленного движения электронов. Увеличивается число столкновений свободных электронов с ионами кристаллической решетки.

Свойство изменения сопротивления при изменении температуры используется в термометрах сопротивления. Эти приборы могут измерять температуру, основываясь на зависимости сопротивления от температуры. У термометров сопротивления высокая точность измерений.

3.2.5. Электродвижущая сила.

Внутреннее сопротивление источника тока

Для создания электрического поля в проводниках используют источник тока. Внутри источника тока происходит перераспределение зарядов, в результате которого на полюсах источника возникает избыток зарядов разных знаков.

Виды источников тока:

- электрофорная машина;
- термопара;

- фотоэлемент;
- аккумулятор;
- гальванический элемент.

Сторонними называются силы неэлектрической природы, действующие внутри источника тока.

Когда проводник соединяют с полюсами источника, то на внешнем участке цепи заряженные частицы движутся под действием электростатической силы. А внутри источника на заряды действуют сторонние и электростатические силы.

Под действием этих сил внутри источника происходит перемещение положительных зарядов от отрицательного полюса источника к положительному. Это перемещение происходит до тех пор, пока сторонние силы не станут равными электростатическим. При переносе заряда эти силы совершают работу. Работа сторонних сил по перемещению заряда компенсирует потери энергии заряженными частицами при их движении по цепи.

◆ **Электродвижущей силой (ЭДС)** называется отношение работы сторонних сил по перемещению положительного заряда к величине этого заряда.

Обозначение — ε , единица измерения в СИ — *вольт (В)*.

Формула для вычисления:

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{СТ}}}{\Delta q},$$

где Δq — модуль перенесенного заряда.

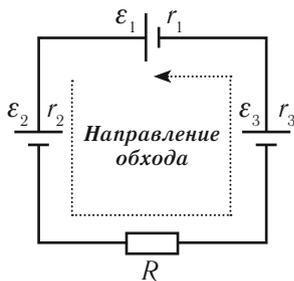
Если электрическая цепь содержит несколько источников тока с ЭДС $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$, то суммарная ЭДС $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n$.

ЭДС считается положительной, если направление обхода цепи против часовой стрелки совпадает с переходом внутри источника тока от отрицательного полюса источника к положительному полюсу.

На рисунке: $\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 < 0, \varepsilon_3 > 0$.

Суммарная ЭДС: $\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3$.

При подключении проводника к полюсам источника тока происходит перераспределение заряда на поверхности проводника, а внутри проводника возникает постоянное электрическое поле. Заряды начинают перемещаться по замкнутой цепи, в которой устанавливается постоянная сила тока.



Сопротивление источника тока называется **внутренним сопротивлением**.

Обозначение внутреннего сопротивления – r . Единица измерения в СИ – Ом.

3.2.6. Закон Ома для полной электрической цепи

Полная электрическая цепь состоит из источника тока и проводников, представляющих внешнее сопротивление.

Закон Ома для полной электрической цепи

Сила тока в полной цепи прямо пропорциональна ЭДС, действующей в цепи, и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}.$$

Полное сопротивление – это сумма внутреннего сопротивления источника и сопротивления внешней цепи. Во внешней цепи ток идет по направлению электрического поля, внутри источника тока – против поля.

Напряжение на внешней цепи (падение напряжения):

$$U = IR = \frac{\varepsilon \cdot R}{R + r} = \varepsilon - Ir.$$

Если цепь разомкнута, то ток внутри источника не проходит и $\varepsilon = U$.

ЭДС численно равна напряжению на зажимах источника тока (разности потенциалов на полюсах источника).

Сопротивление внешней цепи больше внутреннего сопротивления источника.

Если сопротивление внешней цепи мало ($R = 0$), то возможно короткое замыкание. Сила тока короткого замыкания: $I_{кз} = \frac{\varepsilon}{r}$. Возрастание силы тока приводит к резкому увеличению количества теплоты и может стать причиной пожара. Для предотвращения возгорания в электрическую цепь последовательно включают предохранители.

Соединение источников тока

Источники тока можно соединять между собой последовательно и параллельно.

При *параллельном соединении* положительные полюсы элементов соединяют между собой, отрицательные – между собой. Если ЭДС источников одинаковы, то общая ЭДС $\varepsilon = \varepsilon_1$ (ε_1 – ЭДС одного источника). Величина, обратная общему внутреннему сопротивлению,

равна сумме величин, обратных внутренним сопротивлениям элементов: $\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots$. Если внутренние сопротивления источников одинаковы, то $r_{\text{общ}} = \frac{r_1}{n}$, r_1 – сопротивление одного источника, n – число источников. Сила тока: $\frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{n}}$.

При *последовательном соединении* положительный полюс источника соединяется с отрицательным полюсом следующего. Общая ЭДС батареи $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots$, а общее внутреннее сопротивление равно сумме внутренних сопротивлений отдельных источников: $r = r_1 + r_2 + \dots$. Если внутренние сопротивления источников одинаковы, то $r_{\text{общ}} = nr_1$. Сила тока: $I = \frac{n\varepsilon}{R + nr}$.

3.2.7. Параллельное и последовательное соединение проводников

Проводники в электрических цепях могут соединяться *последовательно* и *параллельно*.

Последовательное соединение проводников

При последовательном соединении начало одного проводника соединяется с концом другого.

При последовательном соединении сила тока во всех проводниках одинакова:

$$I = I_1 = I_2 = \dots$$

Общее напряжение U на проводниках равно сумме напряжений на отдельных проводниках:

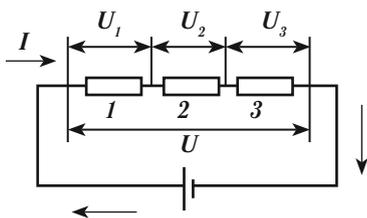
$$U = U_1 + U_2 + \dots$$

Напряжение на проводниках прямо пропорционально их сопротивлениям:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Общее сопротивление равно сумме сопротивлений проводников, образующих цепь:

$$R = R_1 + R_2 + \dots$$



Если проводники имеют одинаковое сопротивление, то общее сопротивление находится по формуле:

$$R = n \cdot R_i,$$

где n — число проводников, R_i — сопротивление проводника.

Параллельное соединение проводников

При параллельном соединении проводники подключаются между одной и той же парой точек. Если в этой точке соединяются три и более проводников, то она называется узлом электрической цепи.

При параллельном соединении напряжение на всех проводниках одинаково:

$$U = U_1 = U_2 = \dots$$

Сумма сил токов, протекающих по проводникам, равна силе тока в неразветвленной цепи:

$$I = I_1 + I_2 + \dots$$

Это следствие того факта, что в точках разветвления цепи заряды не могут накапливаться.

Силы токов в разветвленных частях цепи обратно пропорциональны их сопротивлениям:

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

Величина, обратная общему сопротивлению цепи, равна сумме величин, обратных сопротивлениям параллельно включенных проводников:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

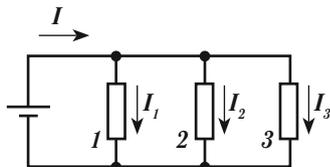
Если проводники имеют одинаковое сопротивление, то общее сопротивление находится по формуле:

$$R = \frac{R_1}{n},$$

где n — число проводников, R_1 — сопротивление проводника.

Если параллельно соединены два проводника, то общее сопротивление вычисляется по формуле:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$



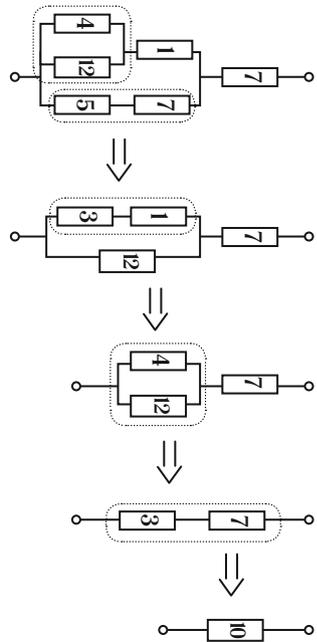
3.2.8. Смешанное соединение проводников

◆ **Смешанное соединение проводников** — соединение, при котором часть проводников соединена последовательно, а часть — параллельно.

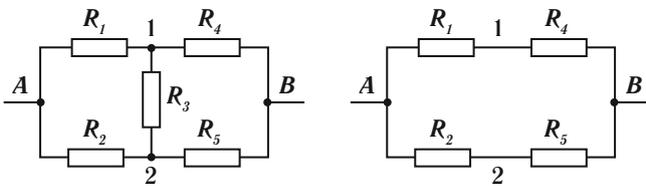
Важно!

Чтобы *рассчитать общее сопротивление* такого участка или найти силу тока и напряжение при таком соединении, нужно:

- 1) разбить его на простые участки с последовательно или параллельно соединенными проводниками;
- 2) найти общее (эквивалентное) сопротивление каждого из этих участков;
- 3) составить эквивалентную схему. Обычно получается цепь из последовательно соединенных эквивалентных сопротивлений;
- 4) рассчитать сопротивление полученной схемы.



Если в схеме не удастся выделить участки с последовательным или параллельным соединением проводников, то можно использовать такое правило: *точки с одинаковыми потенциалами можно соединять и разъединять, ток между такими точками не идет.*



На рисунке, если $R_1 = R_2$, $R_4 = R_5$, то потенциалы точек 1 и 2 равны. Резистор R_3 можно убрать на эквивалентной схеме — ток по нему не идет.

Точки с одинаковыми потенциалами есть в схемах с осью или плоскостью симметрии относительно точек подключения источника тока.

Если схема симметрична относительно оси, проходящей через точки входа и выхода тока, то точки равного потенциала находятся на концах симметричных сопротивлений (по ним идут одинаковые токи).

Если схема симметрична относительно оси, перпендикулярной линии, на которой лежат точки входа и выхода тока, то точки равного потенциала находятся на пересечении этой оси с проводниками.

Если в схеме нет участков с известным видом соединения и нет точек с равным потенциалом, то для расчета таких цепей используют правила Кирхгофа.

Правила Кирхгофа:

- Алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$I_1 + I_2 + \dots = 0.$$

Положительными считают токи, входящие в узел, отрицательными — выходящие из узла.

- В любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивления соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме ЭДС, имеющих в контуре:

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 + \dots = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots$$

Порядок расчета цепи:

- выбрать направление токов во всей цепи;
- записать уравнения токов для узлов;
- записать уравнения для выделенных контуров. Произвольные замкнутые контуры выделяются так, чтобы каждый новый контур содержал хотя бы один участок, не входящий в ранее рассмотренные контуры;
- решить полученную систему уравнений.

Алгоритм решения задач на определение силы тока, напряжения или сопротивления на участке цепи:

- начертить схему цепи и указать на ней все элементы;
- установить, какие элементы цепи включены последовательно, какие — параллельно;
- расставить токи и напряжения на каждом участке цепи и записать для каждой точки разветвления (если они есть) уравнения токов и уравнения, связывающие напряжения на участках цепи;
- используя закон Ома, установить связь между токами, напряжениями и ЭДС;
- если в схеме делают какие-либо переключения сопротивлений или источников, уравнения составить для каждого режима работы цепи;
- решить полученную систему уравнений относительно неизвестной величины;
- решение проверить.

3.2.9. Работа электрического тока. Закон Джоуля–Ленца

- ◆ **Работа тока** – работа сил электрического поля, создающего электрический ток.

Работа тока на участке цепи вычисляется по формуле:

$$A = IUt.$$

Используя формулу закона Ома для участка цепи, можно работу тока вычислить так:

$$A = I^2 R t = \frac{U^2 t}{R}.$$

Работа тока в замкнутой цепи находится по формуле:

$$A = \mathcal{E} I t = q\mathcal{E} = I^2 (R + r) t = \frac{\mathcal{E}^2 t}{R + r}.$$

При протекании постоянного тока по металлическому проводнику электроны сталкиваются с положительными ионами, расположенными в узлах кристаллической решетки. При этом электроны передают им энергию. Это приводит к нагреванию проводника. Количество теплоты, выделяющееся в проводнике за время t , равно:

$$Q = I^2 R t.$$

Эта формула выражает **закон Джоуля–Ленца**: количество теплоты, выделяющееся при прохождении тока по проводнику, прямо пропорционально квадрату силы тока, времени его прохождения и сопротивлению проводника.

3.2.10. Мощность электрического тока

- ◆ **Мощность электрического тока** равна отношению работы тока ко времени, в течение которого она совершается.

Обозначение – P , единица измерения в СИ – *ватт (Вт)*.

Вычисляется по формуле:

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

Можно записать еще несколько формул для вычисления мощности электрического тока на участке цепи:

$$P = IU = \frac{U^2}{R} = I^2 R = \frac{qU}{t} = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R + r)^2}.$$

Полная мощность источника тока:

$$P = \varepsilon I = I^2 (R + r) = \frac{\varepsilon^2}{R + r}.$$

Коэффициент полезного действия источника тока:

$$\eta = \frac{A_{\text{пол.}}}{A_{\text{затр.}}} \cdot 100\% = \frac{P_{\text{пол.}}}{P_{\text{затр.}}} = \frac{U}{\varepsilon} \cdot 100\% = \frac{\varepsilon^2}{R + r} \cdot 100\%.$$

При решении задач на тепловое действие тока нужно учитывать следующее:

1. Если на участке есть источник тока, то необходимо использовать для решения формулу закона Джоуля–Ленца:

$$Q = I^2 R t.$$

2. Если сила тока в цепи постоянна, то удобно использовать формулу закона Джоуля–Ленца:

$$Q = I^2 R t.$$

3. Если постоянно напряжение, то формулу:

$$Q = I U t = \frac{U^2 t}{R}.$$

4. Количество теплоты можно находить, используя формулы термодинамики.

3.2.11. Носители свободных электрических зарядов в металлах, жидкостях и газах

Одним из условий существования электрического тока является наличие свободных заряженных частиц.

- ◆ **Носители электрического тока:** в металлах — свободные электроны; в электролитах — положительные и отрицательные ионы; в газах — электроны и положительные ионы; в полупроводниках — электроны и дырки; в вакууме — любые заряженные частицы, но чаще всего это электроны.

Электрический ток в металлах

Электрический ток в металлах — это упорядоченное движение электронов под действием электрического поля. При протекании тока по металлическому проводнику не происходит переноса вещества (опыт Рикке). Это значит, что ионы металла не принимают участия в переносе электрического заряда. Носителями заряда являются частицы одинаковые для всех металлов — электроны.

Сила тока в металлическом проводнике с площадью поперечного сечения S :

$$I = qnvS,$$

где q — элементарный электрический заряд (заряд электрона),
 n — концентрация электронов проводимости,
 v — средняя скорость упорядоченного движения электронов.

Наиболее убедительное доказательство электронной природы тока в металлах было получено в опытах с инерцией электронов (опыты Мандельштама и Папалекси, Стюарта и Толмена). Катушка с большим числом витков проволоки приводилась в быстрое вращение вокруг своей оси. Концы катушки с помощью гибких проводов были присоединены к чувствительному гальванометру. Раскрученная катушка резко тормозилась, и в цепи возникал кратковременный ток, обусловленный инерцией носителей заряда. Полный заряд, протекающий по цепи, измерялся по отбросу стрелки гальванометра. На основании результатов опытов Толмена и Стюарта было установлено, что носители свободного заряда в металлах имеют отрицательный знак, а отношение заряда носителя к его массе близко к удельному заряду электрона.

Хорошая электропроводность металлов объясняется высокой концентрацией свободных электронов, равной по порядку величины числу атомов в единице объема. Электроны в металлах ведут себя как электронный газ, во многом похожий на идеальный газ. Электронный газ заполняет пространство между положительными ионами, образующими кристаллическую решетку металла.

У некоторых металлов и сплавов обнаружено явление сверхпроводимости. Это явление открыто в 1911 г. Камерлинг-Оннесом. При температурах ниже критической сопротивление проводника становится равным нулю. Значения критической температуры для чистых металлов изменяются в диапазоне от долей кельвина до 30 К. В настоящее время получены вещества с критической температурой 125 К. Сверхпроводящие свойства наблюдаются у ртути, свинца, олова.

Объяснение механизма этого явления было дано только через 60 лет после его открытия на основе квантово-механических представлений.

Явление сверхпроводимости используется для получения сильных магнитных полей

Электрический ток в жидкостях

Жидкости, проводящие электрический ток, называют *электролитами*. К электролитам относятся водные растворы неорганических

кислот, солей и оснований, многие соединения металлов в расплавленном состоянии. Носителями свободных зарядов в электролитах являются положительно и отрицательно заряженные ионы.

В результате электролитической диссоциации (распада нейтральных молекул на ионы) образуются положительные и отрицательные ионы. При подключении электродов к источнику тока ионы под действием электрического поля начинают упорядоченное движение. Электрический ток в электролитах представляет собой перемещение ионов обоих знаков в противоположных направлениях. Положительные ионы движутся к отрицательному электроду (*катоду*), отрицательные ионы — к положительному электроду (*аноду*).

◆ **Электролиз** — явление прохождения электрического тока через электролит, сопровождающееся выделением веществ на электродах.

Закон электролиза был экспериментально установлен английским физиком М. Фарадеем в 1833 году.

Масса m вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна заряду Q , прошедшему через электролит:

$$m = kQ = kIt.$$

Величину k называют электрохимическим эквивалентом.

Электрохимический эквивалент k равен отношению массы m_0 иона данного вещества к его заряду q_0 :

$$k = \frac{m_0}{q_0} = \frac{1}{F} \frac{M}{n},$$

где M — молярная масса вещества, n — валентность вещества,

$$F = eN_A \text{ — постоянная Фарадея. } F = 96,5 \cdot 10^3 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}.$$

Постоянная Фарадея численно равна заряду, который нужно пропустить через раствор любого электролита для получения одного моля одновалентного вещества.

Явление электролиза широко применяется в современном промышленном производстве: получение чистых металлов (меди, алюминия), нанесение металлических покрытий (гальваностегия), изготовление копий с матриц (гальванопластика).

Электрический ток в газах

В обычных условиях газы являются диэлектриками, но при определенных условиях газ может стать проводником. Процесс протекания электрического тока через газ называется **газовым разрядом**. Носители заряда в газе — свободные электроны и ионы. Проводимость в газах смешанная — электронно-ионная.

Свободные носители заряда в газах появляются в процессе ионизации. **Ионизация** — процесс вырывания электрона из атома. Наряду с процессом ионизации в газе происходит и обратный процесс — рекомбинация заряженных частиц.

Ионизацию вызывают нагревание газа, излучение (ультрафиолетовое, рентгеновское или гамма-излучение).

Выделяют два вида разрядов в газе: несамостоятельный и самостоятельный разряды.

Несамостоятельный разряд происходит под действием внешнего ионизатора и прекращается, как только ионизатор перестает действовать. **Самостоятельный разряд** происходит без действия внешнего ионизатора под действием электрического поля, существующего между электродами. С ростом напряженности электрического поля скорости свободных заряженных частиц растут. Достигая катода, такие частицы выбивают из него электроны (вторичная электронная эмиссия). Эти электроны, разгоняясь полем, вызывают ионизацию других молекул (ионизация электронным ударом). Число заряженных частиц нарастает лавинообразно, и внешний ионизатор не нужен для поддержания тока.

На рисунке участок *OAB* соответствует несамостоятельному разряду, участок *BC* — самостоятельному разряду.

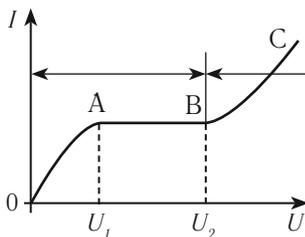
Виды самостоятельного разряда:

- тлеющий;
- коронный;
- дуговой;
- искровой.

Тлеющий разряд происходит в разреженном газе при низком давлении. Применяется в газосветных трубках, лампах дневного света, цифровых индикаторах, ртутных лампах низкого давления.

Дуговой разряд — разряд между электродами, нагретыми до высокой температуры при атмосферном или повышенном давлении. Применяется в ртутных лампах высокого давления, при сварке металлов, в электропечах, в источниках света (прожекторах).

Коронный разряд возникает при нормальном и повышенном давлении у заостренных электродов. У острия электрода напряженность электрического поля велика, и в этой области возникает ударная ионизация при атмосферном давлении. Коронный разряд может возникнуть в тонких проводах, находящихся под высоким напряжением. Это приводит к утечке электроэнергии. Применяется в электрофильтрах, громоотводах, счетчике Гейгера—Мюллера.



Искровой разряд — это прерывистый самостоятельный разряд при нормальном или повышенном атмосферном давлении газа в электрическом поле очень большой напряженности. Применяется при обработке металлов. Пример такого разряда в природе — молния.

Плазма — частично или полностью ионизированный газ, в котором плотности отрицательных и положительных зарядов одинаковы. При сильном нагревании любое вещество испаряется, превращается в газ. Если увеличивать температуру и далее, резко усиливается процесс термической ионизации. Молекулы газа начнут распадаться на составляющие их атомы, которые затем превращаются в ионы.

В состоянии плазмы находится подавляющая часть вещества Вселенной: звезды, галактические туманности и межзвездная среда. Около Земли плазма существует в виде солнечного ветра и ионосферы. Плазму можно наблюдать в рекламных газовых трубках, кварцевых лампах. За последние годы применение плазмы существенно расширилось. Высокотемпературная плазма ($T \sim 10^6 - 10^8 \text{ K}$) из смеси дейтерия с тритием используется для осуществления управляемого термоядерного синтеза; низкотемпературная плазма ($T \leq 10^5 \text{ K}$) — в различных газоразрядных приборах: газовых лазерах, ионных приборах.

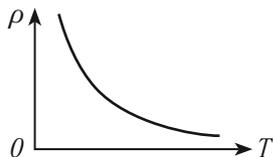
3.2.12. Полупроводники. Собственная и примесная проводимость полупроводников. Полупроводниковый диод

В природе существует большая группа веществ, занимающих промежуточное положение между проводниками и диэлектриками по величине электропроводности.

Полупроводниками называют вещества, удельное сопротивление которых находится в интервале от 10^{-3} до $10^7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. К типичным полупроводникам относятся германий и кремний, селен, теллур, мышьяк.

Удельное сопротивление полупроводника зависит от внешних факторов: температуры, освещенности, электрического поля. С ростом температуры удельное сопротивление полупроводника уменьшается. С ростом освещенности также происходит уменьшение сопротивления полупроводника.

Такой ход зависимости удельного сопротивления от температуры $\rho(T)$ показывает, что у полупроводников концентрация свободных носителей заряда не остается посто-



янной, а увеличивается с ростом температуры. Объясним такую зависимость на примере германия.

Атомы германия на внешней оболочке имеют четыре валентных электрона. В кристаллической решетке каждый атом окружен четырьмя ближайшими соседями. Связь между атомами в кристалле германия является ковалентной, т. е. осуществляется парами валентных электронов. Каждый валентный электрон принадлежит двум разным атомам. Валентные электроны в кристалле германия связаны с атомами гораздо сильнее, чем в металлах, поэтому концентрация электронов проводимости при комнатной температуре в полупроводниках значительно меньше, чем у металлов. Вблизи абсолютного нуля температуры в кристалле германия все электроны заняты в образовании связей. Такой кристалл электрического тока не проводит.

При повышении температуры некоторая часть валентных электронов может получить энергию, достаточную для разрыва ковалентных связей. Тогда в кристалле возникнут свободные электроны (электроны проводимости). Одновременно в местах разрыва связей образуются вакансии, которые не заняты электронами. Эти вакансии получили название дырок. Вакантное место может быть занято валентным электроном из соседней пары, тогда дырка переместится на новое место в кристалле. При заданной температуре полупроводника в единицу времени образуется определенное количество электронно-дырочных пар. В то же время идет обратный процесс — при встрече свободного электрона с дыркой восстанавливается электронная связь между атомами германия. Этот процесс называется рекомбинацией. Электронно-дырочные пары могут появляться также при освещении полупроводника за счет энергии электромагнитного излучения. В отсутствие электрического поля электроны проводимости и дырки участвуют в хаотическом тепловом движении.

Если полупроводник поместить в электрическое поле, то в упорядоченном движении участвуют свободные электроны и дырки, которые ведут себя как положительно заряженные частицы. Поэтому ток I в полупроводнике складывается из электронного $I_{\text{э}}$ и дырочного $I_{\text{д}}$ токов:

$$I = I_{\text{э}} + I_{\text{д}}$$

Концентрация электронов проводимости в полупроводнике равна концентрации дырок.

Электронно-дырочный механизм проводимости проявляется только у чистых (т. е. без примесей) полупроводников. Он называется *собственной электрической проводимостью полупроводников*.

◆ **Собственный полупроводник** — полупроводник, не содержащий примесей, влияющих на его электропроводность.

При наличии примесей электрическая проводимость полупроводников сильно изменяется. Например, добавка в кристалл кремния примесей фосфора в количестве 0,001 атомного процента уменьшает удельное сопротивление более чем на пять порядков.

Важно!

Необходимым условием резкого уменьшения удельного сопротивления полупроводника при введении примесей является отличие валентности атомов примеси от валентности основных атомов кристалла.

◆ **Примесной проводимостью** называют проводимость полупроводников при наличии примесей.

Различают два типа примесной проводимости — *электронную* и *дырочную*.

Электронная проводимость

Электронная проводимость возникает при введении в кристалл германия с четырехвалентными атомами пентавалентных атомов (например атомов мышьяка, As).

Четыре валентных электрона атома мышьяка включены в образование ковалентных связей с четырьмя соседними атомами германия. Пятый валентный электрон оказывается лишним, он легко отрывается от атома мышьяка и становится свободным.

Атом, потерявший электрон, превращается в положительный ион, расположенный в узле кристаллической решетки. Примесь из атомов с валентностью, превышающей валентность основных атомов полупроводникового кристалла, называется *донорной примесью*. В результате ее введения в кристалле появляется значительное число свободных электронов. Это приводит к резкому уменьшению удельного сопротивления полупроводника.

Основными носителями заряда являются электроны. Концентрация свободных электронов намного больше концентрации дырок. Такая проводимость называется *электронной*, а полупроводник, обладающий электронной проводимостью, называется *полупроводником n-типа*.

Дырочная проводимость

Дырочная проводимость возникает при введении в кристалл германия трехвалентных атомов (например атомов индия, In). Атом индия с помощью своих валентных электронов создал ковалентные связи лишь с тремя соседними атомами германия. На образование связи с четвертым атомом германия у атома индия нет электрона. Этот недостающий электрон может быть захвачен атомом индия из ковалентной связи со-

седних атомов германия. В этом случае атом индия превращается в отрицательный ион, расположенный в узле кристаллической решетки, а в ковалентной связи соседних атомов образуется вакансия.

Примесь атомов, способных захватывать электроны, называется *акцепторной примесью*. В результате введения акцепторной примеси в кристалле разрывается множество ковалентных связей и образуются вакантные места — дырки. На эти места могут переходить электроны из соседних ковалентных связей, что приводит к движению дырок по кристаллу.

Наличие акцепторной примеси резко снижает удельное сопротивление полупроводника за счет появления большого числа свободных дырок. Концентрация дырок в полупроводнике с акцепторной примесью значительно превышает концентрацию электронов.

Проводимость такого типа называется дырочной проводимостью. Примесный полупроводник с дырочной проводимостью называется *полупроводником p -типа*. *Основными носителями заряда в полупроводниках p -типа являются дырки*.

◆ ***p - n переход (электронно-дырочный переход)*** — это область контакта двух полупроводников с разными типами проводимости.

При контакте двух полупроводников n - и p -типов начинается процесс диффузии: дырки из p -области переходят в n -область, а электроны, наоборот, из n -области в p -область. В результате в n -области вблизи зоны контакта уменьшается концентрация электронов и возникает положительно заряженный слой. В p -области уменьшается концентрация дырок и возникает отрицательно заряженный слой. Таким образом, на границе полупроводников образуется двойной электрический слой, поле которого препятствует процессу диффузии электронов и дырок. Пограничная область раздела полупроводников с разными типами проводимости называется *запирающим слоем*. Объемные заряды этого слоя создают между p - и n -областями запирающее напряжение U_z , приблизительно равное $0,35\text{ В}$ для германиевых n - p -переходов и $0,6\text{ В}$ для кремниевых.

p - n -переход обладает свойством односторонней проводимости. Если полупроводник с p - n -переходом подключен к источнику тока так, что положительный полюс источника соединен с n -областью, а отрицательный — с p -областью, то напряженность поля в запирающем слое возрастает. Дырки в p -области и электроны в n -области будут смещаться от p - n -перехода, увеличивая тем самым концентрации неосновных носителей в запирающем слое. Ток через p - n -переход практически не идет. Напряжение, поданное на p - n -переход, в этом случае называют

обратным. Незначительный обратный ток обусловлен только собственной проводимостью полупроводниковых материалов.

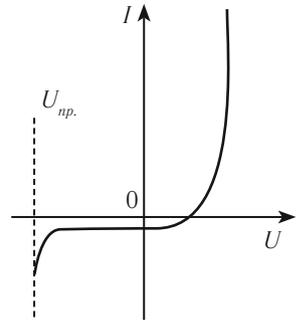
Если p - n -переход соединить с источником так, чтобы положительный полюс источника был соединен с p -областью, а отрицательный с n -областью, то напряженность электрического поля в запирающем слое будет уменьшаться, что облегчает переход основных носителей через контактный слой. Дырки из p -области и электроны из n -области, двигаясь навстречу друг другу, будут пересекать p - n -переход, создавая ток в *прямом* направлении. Сила тока через p - n -переход в этом случае будет возрастать при увеличении напряжения источника.

Способность p - n -перехода пропускать ток практически только в одном направлении используется в приборах, которые называются *полупроводниковыми диодами*.

Обозначение на схемах полупроводникового диода: .

Полупроводниковые диоды изготавливают из кристаллов кремния или германия. Они используются в выпрямителях для преобразования переменного тока в постоянный. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода приведена на рисунке.

Полупроводниковые диоды имеют малые размеры, длительный срок службы, механическую прочность. Существенным недостатком полупроводниковых диодов является зависимость их параметров от температуры.



Основные формулы раздела «Законы постоянного тока»

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad \text{— сила тока}$$

$$R_{ш} = \frac{R_a \cdot I_a}{I_u - I_a} = \frac{R_a}{n-1} \quad \text{— сопротивление шунта}$$

$$U = \frac{A}{q} \quad \text{— напряжение}$$

$$R_d = \frac{U - U_B}{U_B} R_B = (n-1)R_B \quad \text{— добавочное сопротивление}$$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad - \text{сопротивление проводника}$$

$$I = \frac{U}{R} \quad - \text{закон Ома для участка цепи}$$

$$\varepsilon = \frac{A_{ст}}{\Delta q} \quad - \text{электродвижущая сила}$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad - \text{закон Ома для полной цепи}$$

$$\left. \begin{aligned} I &= I_1 = I_2 = \dots \\ U &= U_1 + U_2 + \dots \\ R &= R_1 + R_2 + \dots \\ R &= n \cdot R_i \end{aligned} \right\} - \text{последовательное соединение}$$

$$\left. \begin{aligned} U &= U_1 = U_2 = \dots \\ I &= I_1 + I_2 + \dots \\ \frac{1}{R} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \\ R &= \frac{R_1}{n} \end{aligned} \right\} - \text{параллельное соединение}$$

$$A = I^2 R t = \frac{U^2 t}{R} \quad - \text{работа электрического тока на участке цепи}$$

$$A = \varepsilon I t = q \varepsilon = I^2 (R + r) t = \frac{\varepsilon^2 t}{R + r} \quad - \text{работа тока в замкнутой цепи}$$

$$Q = I^2 R t \quad - \text{закон Джоуля–Ленца}$$

$$P = \frac{A}{t} = IU = \frac{U^2}{R} = I^2 R = \frac{qU}{t} = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2} \quad - \text{мощность электрического тока}$$

$$P = \varepsilon I = I^2 (R + r) = \frac{\varepsilon^2}{R + r} \quad - \text{полная мощность источника тока}$$

$$\eta = \frac{A_{пол.}}{A_{затр.}} \cdot 100\% = \frac{P_{пол.}}{P_{затр.}} = \frac{U}{\varepsilon} \cdot 100\% = \frac{\varepsilon^2}{R + r} \cdot 100\% \quad - \text{коэффициент полезного действия источника тока}$$

$$m = kQ = kIt \quad - \text{закон электролиза}$$

3.3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

- ◆ **Магнитное поле** — особая форма материи, существующая вокруг движущихся электрических зарядов — токов.

Источниками магнитного поля являются постоянные магниты, проводники с током. Обнаружить магнитное поле можно по действию на магнитную стрелку, проводник с током и движущиеся заряженные частицы.

Для исследования магнитного поля используют замкнутый плоский контур с током (рамку с током).

Впервые поворот магнитной стрелки около проводника, по которому протекает ток, обнаружил в 1820 году Эрстед. Ампер наблюдал взаимодействие проводников, по которым протекал ток: если токи в проводниках текут в одном направлении, то проводники притягиваются, если токи в проводниках текут в противоположных направлениях, то они отталкиваются.

Свойства магнитного поля:

- магнитное поле материально;
- источник и индикатор поля — электрический ток;
- магнитное поле является вихревым — его силовые линии (линии магнитной индукции) замкнутые;
- величина поля убывает с расстоянием от источника поля.

Важно!

Магнитное поле не является потенциальным. Его работа на замкнутой траектории может быть не равна нулю.

- ◆ **Магнитным взаимодействием** называют притяжение или отталкивание электрически нейтральных проводников при пропускании через них электрического тока.

Магнитное взаимодействие движущихся электрических зарядов объясняется так: всякий движущийся электрический заряд создает в пространстве магнитное поле, которое действует на движущиеся заряженные частицы.

Силовая характеристика магнитного поля — *вектор магнитной индукции* \vec{B} . Модуль вектора магнитной индукции равен отношению максимального значения силы, действующей со стороны магнитного поля на проводник с током, к силе тока в проводнике I и его длине l :

$$B = \frac{F_{\max}}{I \cdot l}.$$

Обозначение — \vec{B} , единица измерения в СИ — *тесла* (*Тл*).

1 *Тл* — это индукция такого магнитного поля, в котором на каждый метр длины проводника при силе тока 1 *А* действует максимальная сила 1 *Н*.

Направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением от южного полюса к северному полюсу магнитной стрелки (направление, которое указывает северный полюс магнитной стрелки), свободно установившейся в магнитном поле.

Направление вектора магнитной индукции можно определить по **правилу буравчика**:

если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением вектора магнитной индукции.

Для определения магнитной индукции нескольких полей используется **принцип суперпозиции**:

магнитная индукция результирующего поля, созданного несколькими источниками, равна векторной сумме магнитных индукций полей, создаваемых каждым источником в отдельности:

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

Поле, в каждой точке которого вектор магнитной индукции одинаков по величине и направлению, называется *однородным*.

Наглядно магнитное поле изображают в виде магнитных линий или линий магнитной индукции. *Линия магнитной индукции* — это воображаемая линия, в любой точке которой вектор магнитной индукции направлен по касательной к ней.

Свойства магнитных линий:

- магнитные линии непрерывны;
- магнитные линии замкнуты (т.е. в природе не существует магнитных зарядов, аналогичных электрическим зарядам);
- магнитные линии имеют направление, связанное с направлением тока.

Густота расположения позволяет судить о величине поля: чем гуще расположены линии, тем сильнее поле.

На плоский замкнутый контур с током, помещенный в однородное магнитное поле, действует момент сил *M*:

$$M = ISB \sin \alpha,$$

где *I* — сила тока в проводнике, *S* — площадь поверхности, охватываемая контуром, *B* — модуль вектора магнитной индукции,

α — угол между перпендикуляром к плоскости контура и вектором магнитной индукции.

Тогда для модуля вектора магнитной индукции можно записать формулу:

$$B = \frac{M_{\text{макс}}}{IS},$$

где максимальный момент сил соответствует углу $\alpha = 90^\circ$.

В этом случае линии магнитной индукции лежат в плоскости рамки, и ее положение равновесия является неустойчивым. Устойчивым будет положение рамки с током в случае, когда плоскость рамки перпендикулярна линиям магнитной индукции.

3.3.1. Взаимодействие магнитов

◆ **Постоянные магниты** — это тела, длительное время сохраняющие намагниченность, то есть создающие магнитное поле.

Основное свойство магнитов: притягивать тела из железа или его сплавов (например стали). Магниты бывают естественные (из магнитного железняка) и искусственные, представляющие собой намагниченные железные полосы. Области магнита, где его магнитные свойства выражены наиболее сильно, называют полюсами. У магнита два полюса: северный N и южный S .

Важно!

Вне магнита магнитные линии выходят из северного полюса и входят в южный полюс.

Разделить полюса магнита нельзя.

Объяснил существование магнитного поля у постоянных магнитов Ампер. Согласно его гипотезе внутри молекул, из которых состоит магнит, циркулируют элементарные электрические токи. Если эти токи ориентированы определенным образом, то их действия складываются и тело проявляет магнитные свойства. Если эти токи расположены беспорядочно, то их действие взаимно компенсируется и тело не проявляет магнитных свойств.

Магниты взаимодействуют: одноименные магнитные полюса отталкиваются, разноименные — притягиваются.

3.3.2. Магнитное поле проводника с током

Электрический ток, протекающий по проводнику с током, создает в окружающем его пространстве магнитное поле. Чем больше ток, прохо-

дющийся по проводнику, тем сильнее возникающее вокруг него магнитное поле.

Магнитные силовые линии этого поля располагаются по концентрическим окружностям, в центре которых находится проводник с током.

Направление линий магнитного поля вокруг проводника с током всегда находится в строгом соответствии с направлением тока, проходящего по проводнику.

Направление магнитных силовых линий можно определить **по правилу буравчика**: если поступательное движение буравчика (1) совпадает с направлением тока (2) в проводнике, то вращение его рукоятки укажет направление силовых линий (4) магнитного поля вокруг проводника.

При изменении направления тока линии магнитного поля также изменяют свое направление.

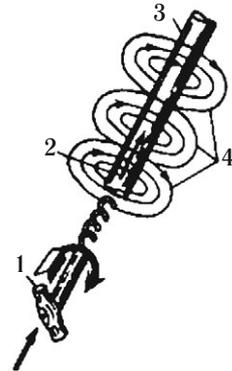
По мере удаления от проводника магнитные силовые линии располагаются реже. Следовательно, индукция магнитного поля уменьшается.

Направление тока в проводнике принято изображать точкой, если ток идет к нам, и крестиком, если ток направлен от нас.

Для получения сильных магнитных полей при небольших токах обычно увеличивают число проводников с током и выполняют их в виде ряда витков; такое устройство называют катушкой.

В проводнике, согнутом в виде витка, магнитные поля, образованные всеми участками этого проводника, будут внутри витка иметь одинаковое направление. Поэтому интенсивность магнитного поля внутри витка будет больше, чем вокруг прямолинейного проводника. При объединении витков в катушку магнитные поля, созданные отдельными витками, складываются. При этом концентрация силовых линий внутри катушки возрастает, т. е. магнитное поле внутри нее усиливается.

Чем больше ток, проходящий через катушку, и чем больше в ней витков, тем сильнее создаваемое катушкой магнитное поле. Магнитное поле снаружи катушки также складывается из магнитных полей отдельных витков, однако магнитные силовые линии располагаются не так густо, вследствие чего интенсивность магнитного поля там не столь велика, как внутри катушки.

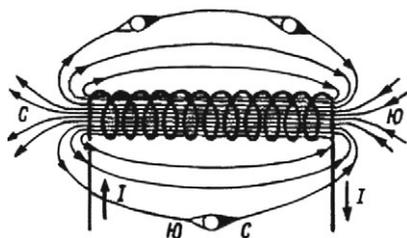


Ток идет от нас



Ток идет к нам





Магнитное поле катушки с током имеет такую же форму, как и поле прямолинейного постоянного магнита: силовые магнитные линии выходят из одного конца катушки и входят в другой ее конец. Поэтому катушка с током представляет собой искусственный электрический магнит. Обычно для усиления магнитного поля внутрь катушки вставляют стальной сердечник; такую катушку называют *электромагнитом*.

Направление линий магнитной индукции катушки с током находят по **правилу правой руки**:

если мысленно обхватить катушку с током ладонью правой руки так, чтобы четыре пальца указывали направление тока в ее витках, тогда большой палец укажет направление вектора магнитной индукции.

Для определения направления линий магнитного поля, создаваемого витком или катушкой, можно использовать также **правило буравчика**:

если вращать ручку буравчика по направлению тока в витке или катушке, то поступательное движение буравчика укажет направление вектора магнитной индукции.

Электромагниты нашли чрезвычайно широкое применение в технике. Полярность электромагнита (направление магнитного поля) можно определить и с помощью правила правой руки.

3.3.3. Сила Ампера

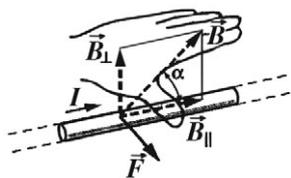
◆ **Сила Ампера** — сила, которая действует на проводник с током, находящийся в магнитном поле.

Закон Ампера: на проводник с током силой I длиной l , помещенный в магнитное поле с индукцией \vec{B} , действует сила, модуль которой равен:

$$F = IBl \sin \alpha,$$

где α — угол между проводником с током и вектором магнитной индукции \vec{B} .

Направление силы Ампера определяют **по правилу левой руки**: если ладонь левой руки расположить так, чтобы перпендикулярная к проводнику составляющая вектора магнитной индукции B_{\perp} входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали на направление тока в проводнике, то отогнутый на 90° большой палец покажет направление силы Ампера.



Сила Ампера не является центральной. Она направлена перпендикулярно линиям магнитной индукции.

Сила Ампера широко используется. В технических устройствах создают магнитное поле с помощью проводников, по которым течет электрический ток. Электромагниты используют в электромеханическом реле для дистанционного выключения электрических цепей, магнитном подъемном кране, жестком диске компьютера, записывающей головке видеомагнитофона, в кинескопе телевизора, мониторе компьютера. В быту, на транспорте и в промышленности широко применяют электрические двигатели. Взаимодействие электромагнита с полем постоянного магнита позволило создать электроизмерительные приборы (амперметр, вольтметр).

Простейшей моделью электродвигателя служит рамка с током, помещенная в магнитное поле постоянного магнита. В реальных электродвигателях вместо постоянных магнитов используют электромагниты, вместо рамки — обмотки с большим числом витков провода.

Коэффициент полезного действия электродвигателя:

$$\eta = \frac{N}{UI},$$

где N — механическая мощность, развиваемая двигателем.

Коэффициент полезного действия электродвигателя очень высок.

Алгоритм решения задач о действии магнитного поля на проводники с током:

- сделать схематический чертеж, на котором указать проводник или контур с током и направление силовых линий поля;
- отметить углы между направлением поля и отдельными элементами контура;
- используя правило левой руки, определить направление силы Ампера, действующей на проводник с током или на каждый элемент контура, и показать эти силы на чертеже;
- указать все остальные силы, действующие на проводник или контур;

- записать формулы для остальных сил, упоминаемых в задаче. Выразить силы через величины, от которых они зависят. Если проводник находится в равновесии, то необходимо записать условие его равновесия (равенство нулю суммы сил и моментов сил);
- записать второй закон Ньютона в векторном виде и в проекциях;
- решить полученную систему уравнений относительно неизвестной величины;
- решение проверить.

3.3.4. Сила Лоренца

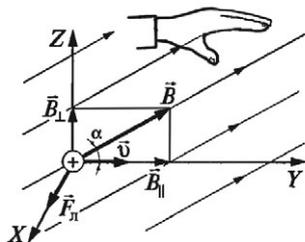
◆ **Сила Лоренца** — сила, действующая на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля.

Формула для нахождения силы Лоренца:

$$F = q \cdot B \cdot v \cdot \sin \alpha,$$

где q — заряд частицы, v — скорость частицы, B — модуль вектора магнитной индукции, α — угол между вектором скорости частицы и вектором магнитной индукции.

Направление силы Лоренца определяют **по правилу левой руки**: если ладонь левой руки расположить так, чтобы перпендикулярная к проводнику составляющая вектора магнитной индукции B_{\perp} входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление скорости положительно заряженной частицы, то отогнутый на 90° большой палец покажет направление силы Лоренца.



Если заряд частицы отрицательный, то направление силы изменится на противоположное.

Важно!

Если вектор скорости сонаправлен с вектором магнитной индукции, то частица движется равномерно и прямолинейно.

В однородном магнитном поле сила Лоренца искривляет траекторию движения частицы.

Если вектор скорости перпендикулярен вектору магнитной индукции, то частица движется по окружности, радиус которой равен:

$$R = \frac{mv}{qB},$$

где m — масса частицы, v — скорость частицы, B — модуль вектора магнитной индукции, q — заряд частицы.

В этом случае сила Лоренца играет роль центростремительной и ее работа равна нулю. Период (частота) обращения частицы не зависит от радиуса окружности и скорости частицы. Формула для вычисления периода обращения частицы:

$$T = \frac{2\pi m}{Bq}.$$

Угловая скорость движения заряженной частицы:

$$\omega = \frac{qB}{m}.$$

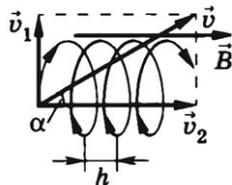
Важно!

Сила Лоренца не меняет кинетическую энергию частицы и модуль ее скорости. *Под действием силы Лоренца изменяется направление скорости частицы.*

Если вектор скорости направлен под углом α ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$) к вектору магнитной индукции, то частица движется по винтовой линии.

В этом случае вектор скорости частицы можно представить как сумму двух векторов скорости, один из которых, \vec{v}_2 , параллелен вектору \vec{B} , а другой, \vec{v}_1 , — перпендикулярен ему. Вектор \vec{v}_1 не меняется ни по модулю, ни по направлению. Вектор \vec{v}_2 меняется по направлению. Сила Лоренца будет сообщать движущейся частице ускорение, перпендикулярное вектору скорости \vec{v}_1 . Частица будет двигаться по окружности. Период обращения частицы по окружности — T .

Таким образом, на равномерное движение вдоль линии индукции будет накладываться движение по окружности в плоскости, перпендикулярной вектору \vec{B} . Частица движется по винтовой линии с шагом $h = v_2 T$.



Важно!

Если частица движется в электрическом и магнитном полях, то полная сила Лоренца равна:

$$\vec{F} = \vec{F}_L + \vec{F}_Э.$$

Особенности движения заряженной частицы в магнитном поле используются в масс-спектрометрах — устройствах для измерения масс заряженных частиц; ускорителях частиц; для термоизоляции плазмы в установках «Токамак».

Алгоритм решения задач о действии магнитного (и электрического) поля на заряженные частицы:

- сделать чертеж, указать на нем силовые линии магнитного (и электрического) поля, нарисовать вектор начальной скорости частицы и отметить знак ее заряда;
- изобразить силы, действующие на заряженную частицу;
- определить вид траектории частицы;
- разложить силы, действующие на заряженную частицу, вдоль направления магнитного поля и по направлению, ему перпендикулярному;
- составить основное уравнение динамики материальной точки по каждому из направлений разложения сил;
- выразить силы через величины, от которых они зависят;
- решить полученную систему уравнений относительно неизвестной величины;
- решение проверить.

Основные формулы раздела «Магнитное поле»

$$B = \frac{F_{\max}}{I \cdot l} \quad - \text{ модуль вектора магнитной индукции}$$

$$F = IBl \sin \alpha \quad - \text{ сила Ампера}$$

$$F = q \cdot B \cdot v \cdot \sin \alpha \quad - \text{ сила Лоренца}$$

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots \quad - \text{ принцип суперпозиции}$$

$$M = ISB \sin \alpha \quad - \text{ момент сил, действующий на замкнутый плоский контур со стороны магнитного поля}$$

3.4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

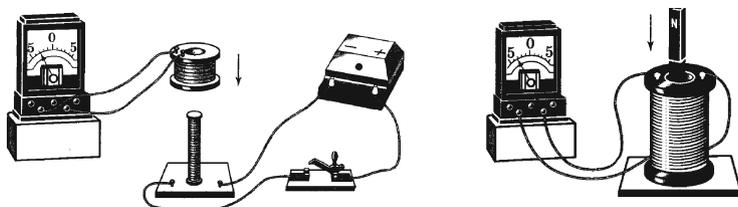
3.4.1. Явление электромагнитной индукции

- ◆ **Электромагнитная индукция** — явление возникновения тока в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока, пронизывающего его.

Явление электромагнитной индукции было открыто М. Фарадеем.

Опыты Фарадея

- На одну непроводящую основу были намотаны две катушки: витки первой катушки были расположены между витками второй. Витки одной катушки были замкнуты на гальванометр, а второй — подключены к источнику тока. При замыкании ключа и протекании тока по второй катушке в первой возникал импульс тока. При размыкании ключа также наблюдался импульс тока, но ток через гальванометр тек в противоположном направлении.
- Первая катушка была подключена к источнику тока, вторая, подключенная к гальванометру, перемещалась относительно нее. При приближении или удалении катушки фиксировался ток.
- Катушка замкнута на гальванометр, а магнит движется — движется (выдвигается) — относительно катушки.



Опыты показали, что индукционный ток возникает только при изменении линий магнитной индукции. Направление тока будет различно при увеличении числа линий и при их уменьшении.

Сила индукционного тока зависит от скорости изменения магнитного потока. Может изменяться само поле, или контур может перемещаться в неоднородном магнитном поле.

Объяснения возникновения индукционного тока

Ток в цепи может существовать, когда на свободные заряды действуют сторонние силы. Работа этих сил по перемещению единичного положительного заряда вдоль замкнутого контура равна ЭДС. Значит, при изменении числа магнитных линий через поверхность, ограниченную контуром, в нем появляется ЭДС, которую называют ЭДС индукции.

Электроны в неподвижном проводнике могут приводиться в движение только электрическим полем. Это электрическое поле порождается изменяющимся во времени магнитным полем. Его называют **вихревым электрическим полем**. Представление о вихревом электрическом поле было введено в физику великим английским физиком Дж. Максвеллом в 1861 году.

Свойства вихревого электрического поля:

- источник — переменное магнитное поле;
- обнаруживается по действию на заряд;
- не является потенциальным;
- линии поля замкнутые.

Работа этого поля при перемещении единичного положительного заряда по замкнутому контуру равна ЭДС индукции в неподвижном проводнике.

3.4.2. Магнитный поток

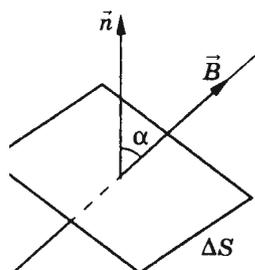
◆ **Магнитным потоком** через площадь S контура называют скалярную физическую величину, равную произведению модуля вектора магнитной индукции B , площади поверхности S , пронизываемой данным потоком, и косинуса угла α между направлением вектора магнитной индукции и вектора нормали (перпендикуляра к плоскости данной поверхности):

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

Обозначение — Φ , единица измерения в СИ — *вебер* ($Вб$).

Магнитный поток в 1 *вебер* создается однородным магнитным полем с индукцией 1 *Тл* через поверхность площадью 1 $м^2$, расположенную перпендикулярно вектору магнитной индукции:

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2.$$



Магнитный поток можно наглядно представить как величину, пропорциональную числу магнитных линий, проходящих через данную площадь.

В зависимости от угла α магнитный поток может быть положительным ($\alpha < 90^\circ$) или отрицательным ($\alpha > 90^\circ$). Если $\alpha = 90^\circ$, то магнитный поток равен 0.

Изменить магнитный поток можно меняя площадь контура, модуль индукции поля или расположение контура в магнитном поле (поворачивая его).

В случае неоднородного магнитного поля и неплоского контура магнитный поток находят как сумму магнитных потоков, пронизывающих площадь каждого из участков, на которые можно разбить данную поверхность.

3.4.3. Закон электромагнитной индукции Фарадея

Закон электромагнитной индукции (закон Фарадея):

ЭДС индукции в замкнутом контуре равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Знак « $-$ » в формуле позволяет учесть направление индукционного тока. Индукционный ток в замкнутом контуре имеет всегда такое направление, чтобы магнитный поток поля, созданного этим током сквозь поверхность, ограниченную контуром, уменьшал бы те изменения поля, которые вызвали появление индукционного тока.

Если контур состоит из N витков, то ЭДС индукции:

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Сила индукционного тока в замкнутом проводящем контуре с сопротивлением R :

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R}.$$

При движении проводника длиной l со скоростью v в постоянном однородном магнитном поле с индукцией \vec{B} ЭДС электромагнитной индукции равна:

$$\mathcal{E}_i = B \cdot v \cdot l \cdot \sin \alpha,$$

где α — угол между векторами \vec{B} и \vec{v} .

Возникновение ЭДС индукции в движущемся в магнитном поле проводнике объясняется действием силы Лоренца на свободные заряды в движущихся проводниках. Сила Лоренца играет в этом случае роль сторонней силы.

Движущийся в магнитном поле проводник, по которому протекает индукционный ток, испытывает магнитное торможение. Полная работа силы Лоренца равна нулю.

Количество теплоты в контуре выделяется либо за счет работы внешней силы, которая поддерживает скорость проводника неизменной, либо за счет уменьшения кинетической энергии проводника.

Важно!

Изменение магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур, может происходить по двум причинам:

- магнитный поток изменяется вследствие перемещения контура или его частей в постоянном во времени магнитном поле. Это

случай, когда проводники, а вместе с ними и свободные носители заряда, движутся в магнитном поле;

- вторая причина изменения магнитного потока, пронизывающего контур, — изменение во времени магнитного поля при неподвижном контуре. В этом случае возникновение ЭДС индукции уже нельзя объяснить действием силы Лоренца. Явление электромагнитной индукции в неподвижных проводниках, возникающее при изменении окружающего магнитного поля, также описывается формулой Фарадея.

Таким образом, явления индукции в движущихся и неподвижных проводниках протекают одинаково, но физическая причина возникновения индукционного тока оказывается в этих двух случаях различной:

- в случае движущихся проводников ЭДС индукции обусловлена силой Лоренца;
- в случае неподвижных проводников ЭДС индукции является следствием действия на свободные заряды вихревого электрического поля, возникающего при изменении магнитного поля.

3.4.4. Правило Ленца

Направление индукционного тока определяется по **правилу Ленца**: индукционный ток, возбуждаемый в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, всегда направлен так, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызывающего индукционный ток.

Алгоритм решения задач с использованием правила Ленца:

- определить направление линий магнитной индукции внешнего магнитного поля;
- выяснить, как изменяется магнитный поток;
- определить направление линий магнитной индукции магнитного поля индукционного тока: если магнитный поток уменьшается, то они сонаправлены с линиями внешнего магнитного поля; если магнитный поток увеличивается, — противоположно направлению линий магнитной индукции внешнего поля;
- по правилу буравчика, зная направление линий индукции магнитного поля индукционного тока, определить направление индукционного тока.

Правило Ленца имеет глубокий физический смысл — оно выражает закон сохранения энергии.

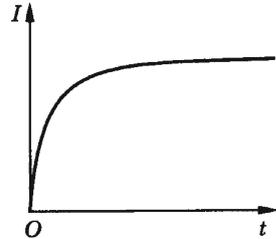
3.4.5. Самоиндукция

◆ **Самоиндукция** — это явление возникновения ЭДС индукции в проводнике в результате изменения тока в нем.

При изменении силы тока в катушке происходит изменение магнитного потока, создаваемого этим током. Изменение магнитного потока, пронизывающего катушку, должно вызывать появление ЭДС индукции в катушке.

В соответствии с правилом Ленца ЭДС самоиндукции препятствует нарастанию силы тока при включении и убыванию силы тока при выключении цепи.

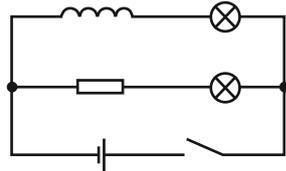
Это приводит к тому, что при замыкании цепи, в которой есть источник тока с постоянной ЭДС, сила тока устанавливается через некоторое время.



При отключении источника ток также не прекращается мгновенно. Возникающая при этом ЭДС самоиндукции может превышать ЭДС источника.

Явление самоиндукции можно наблюдать, собрав электрическую цепь из катушки с большой индуктивностью, резистора, двух одинаковых ламп накаливания и источника тока. Резистор должен иметь такое же электрическое сопротивление, как и провод катушки.

Опыт показывает, что при замыкании цепи электрическая лампа, включенная последовательно с катушкой, загорается несколько позже, чем лампа, включенная последовательно с резистором. Нарастанию тока в цепи катушки при замыкании препятствует ЭДС самоиндукции, возникающая при возрастании магнитного потока в катушке.



При отключении источника тока вспыхивают обе лампы. В этом случае ток в цепи поддерживается ЭДС самоиндукции, возникающей при убывании магнитного потока в катушке.

ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_{is} , возникающая в катушке с индуктивностью L , по закону электромагнитной индукции равна:

$$\mathcal{E}_{is} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна индуктивности катушки и скорости изменения силы тока в катушке.

3.4.6. Индуктивность

Электрический ток, проходящий по проводнику, создает вокруг него магнитное поле. Магнитный поток Φ через контур из этого проводника пропорционален модулю индукции \vec{B} магнитного поля внутри контура, а индукция магнитного поля, в свою очередь, пропорциональна силе тока в проводнике.

Следовательно, магнитный поток через контур прямо пропорционален силе тока в контуре:

$$\Phi = LI.$$

- ◆ **Индуктивность** — коэффициент пропорциональности L между силой тока I в контуре и магнитным потоком Φ , создаваемым этим током:

$$L = \frac{\Phi}{I}.$$

Индуктивность зависит от размеров и формы проводника, от магнитных свойств среды, в которой находится проводник.

Единица индуктивности в СИ — *генри (Гн)*. Индуктивность контура равна 1 *генри*, если при силе постоянного тока 1 *ампер* магнитный поток через контур равен 1 *вебер*:

$$1\text{Гн} = \frac{1\text{Вб}}{1\text{А}}.$$

Можно дать *второе определение единицы индуктивности*: элемент электрической цепи обладает индуктивностью в 1 *Гн*, если при равномерном изменении силы тока в цепи на 1 *ампер* за 1 *с* в нем возникает ЭДС самоиндукции 1 *вольт*.

3.4.7. Энергия магнитного поля

При отключении катушки индуктивности от источника тока лампа накаливания, включенная параллельно катушке, дает кратковременную вспышку. Ток в цепи возникает под действием ЭДС самоиндукции.

Источником энергии, выделяющейся при этом в электрической цепи, является магнитное поле катушки.

Для создания тока в контуре с индуктивностью необходимо совершить работу на преодоление ЭДС самоиндукции. Энергия магнитного поля тока вычисляется по формуле:

$$W_{\text{маг}} = \frac{L \cdot I^2}{2}.$$

Основные формулы раздела «Электромагнитная индукция»

$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$	— магнитный поток
$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$	— закон электромагнитной индукции
$\mathcal{E}_i = B \cdot v \cdot l \cdot \sin \alpha$	— ЭДС индукции в движущемся проводнике
$\mathcal{E}_{is} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$	— ЭДС самоиндукции
$\Phi = LI$	— магнитный поток
$L = \frac{\Phi}{I}$	— индуктивность
$W_{\text{mag}} = \frac{L \cdot I^2}{2}$	— энергия магнитного поля

Алгоритм решения задач по теме «Электромагнитная индукция»:

1. Внимательно прочитать условие задачи. Установить причины изменения магнитного потока, пронизывающего контур.
2. Записать формулу:
 - закона электромагнитной индукции;
 - ЭДС индукции в движущемся проводнике, если в задаче рассматривается поступательно движущийся проводник; если в задаче рассматривается электрическая цепь, содержащая источник тока, и возникающая на одном из участков ЭДС индукции, вызванная движением проводника в магнитном поле, то сначала нужно определить величину и направление ЭДС индукции. После этого задача решается по аналогии с задачами на расчет цепи постоянного тока с несколькими источниками.
3. Записать выражение для изменения магнитного потока и подставить в формулу закона электромагнитной индукции.
4. Записать математически все дополнительные условия (чаще всего это формулы закона Ома для полной цепи, силы Ампера или силы Лоренца, формулы кинематики и динамики).
5. Решить полученную систему уравнений относительно искомой величины.
6. Решение проверить.

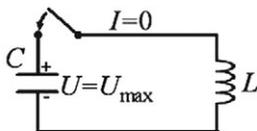
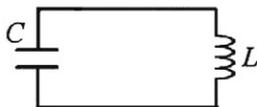
3.5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

3.5.1. Свободные электромагнитные колебания. Колебательный контур

- ◆ **Электромагнитные колебания** — это периодические изменения заряда, силы тока и напряжения, происходящие в электрической цепи. Простейшей системой для наблюдения электромагнитных колебаний служит колебательный контур.
- ◆ **Колебательный контур** — это замкнутый контур, образованный последовательно соединенными конденсатором и катушкой.

Сопротивление катушки R равно нулю.

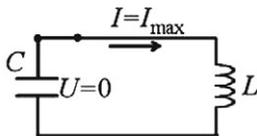
Если зарядить конденсатор до напряжения U_m , то в начальный момент времени $t_1=0$, напряжение на конденсаторе будет равно U_m . Заряд конденсатора в этот момент времени будет равен $q_m = CU_m$. Сила тока равна нулю.



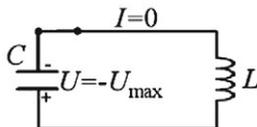
Полная энергия системы будет равна энергии электрического поля:

$$W = W_э = \frac{CU_m^2}{2} = \frac{q_m^2}{2C}.$$

Конденсатор начинает разряжаться, по катушке начинает течь ток. Вследствие самоиндукции в катушке конденсатор разряжается постепенно.



Ток достигает своего максимального значения I_m в момент времени $t_2=T/4$. Заряд конденсатора в этот момент равен нулю, напряжение на конденсаторе равно нулю.



Полная энергия системы в этот момент времени равна энергии магнитного поля:

$$W = W_M = \frac{LI_m^2}{2}.$$

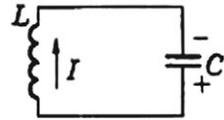
В следующий момент времени ток течет в том же направлении, постепенно (вследствие явления самоиндукции) уменьшаясь до нуля. Кон-

денсатор перезаряжается. Заряды обкладок имеют заряды, по знаку противоположные первоначальным.

В момент времени $t_3 = T/2$ заряд конденсатора равен q_m , напряжение равно U_m , сила тока равна нулю.

Полная энергия системы равна энергии электрического поля конденсатора.

Затем конденсатор снова разряжается, но ток через катушку течет в обратном направлении.



В момент времени $t_4 = 3T/4$ сила тока в катушке достигает максимального значения, напряжение на конденсаторе и его заряд равны нулю. С этого момента ток в катушке начинает убывать, но не сразу (явление самоиндукции). Энергия магнитного поля переходит в энергию электрического поля. Конденсатор начинает заряжаться, и через некоторое время его заряд равен первоначальному, а сила тока станет равной нулю.

Через время, равное периоду T , система возвращается в начальное состояние. Совершилось одно полное колебание, дальше процесс повторяется.

Важно!

Колебания, происходящие в колебательном контуре, — свободные. Они совершаются без какого-либо внешнего воздействия — только за счет энергии, запасенной в контуре.

В контуре происходят превращения энергии электрического поля конденсатора в энергию магнитного поля катушки и обратно. В любой произвольный момент времени полная энергия в контуре равна:

$$W = W_э + W_м = \frac{Cu^2}{2} + \frac{Li^2}{2} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2},$$

где i , u , q — мгновенные значения силы тока, напряжения, заряда в любой момент времени.

Эти колебания являются затухающими. Амплитуда колебаний постепенно уменьшается из-за электрического сопротивления проводников.

3.5.2. Вынужденные электромагнитные колебания. Резонанс

- ◆ *Вынужденными электромагнитными колебаниями* называют периодические изменения заряда, силы тока и напряжения в ко-

лебательном контуре, происходящие под действием периодически изменяющейся синусоидальной (переменной) ЭДС от внешнего источника:

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t,$$

где ε — мгновенное значение ЭДС, ε_m — амплитудное значение ЭДС.

При этом к контуру подводится энергия, необходимая для компенсации потерь энергии в контуре из-за наличия сопротивления.

- ◆ **Резонанс в электрической цепи** — явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний силы тока в колебательном контуре с малым активным сопротивлением при совпадении частоты вынужденных колебаний внешней ЭДС с частотой собственных колебаний в контуре.

Емкостное и индуктивное сопротивления по-разному изменяются в зависимости от частоты. С увеличением частоты растет индуктивное сопротивление, а емкостное уменьшается. С уменьшением частоты растет емкостное сопротивление и уменьшается индуктивное сопротивление. Кроме того, колебания напряжения на конденсаторе и катушке имеют разный сдвиг фаз по отношению к колебаниям силы тока: для катушки колебания напряжения и силы тока имеют сдвиг фаз $\varphi_L = -\pi/2$, а на конденсаторе $\varphi_C = \pi/2$. Это означает, что когда растет энергия магнитного поля катушки, то энергия электрического поля конденсатора убывает, и наоборот. При резонансной частоте индуктивное и емкостное сопротивления компенсируют друг друга и цепь обладает только активным сопротивлением. При резонансе выполняется условие:

$$X_L = X_C.$$

Резонансная частота вычисляется по формуле:

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

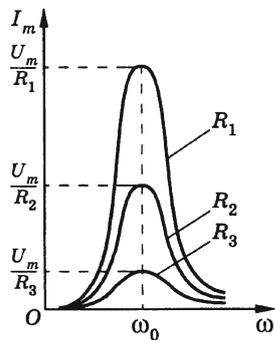
Важно!

Резонансная частота не зависит от активного сопротивления R . Но чем меньше активное сопротивление цепи, тем ярче выражен резонанс.

Чем меньше потери энергии в цепи, тем сильнее выражен резонанс. Если активное сопротивление очень мало ($R \rightarrow 0$), то резонансное значение силы тока неограниченно возрастает. С увеличением сопротивления максимальное значение силы тока уменьшается, и при больших значениях сопротивления резонанс не наблюдается.

График зависимости амплитуды силы тока от частоты называется резонансной кривой. Резонансная кривая имеет большой максимум в цепи с меньшим активным сопротивлением.

Одновременно с ростом силы тока при резонансе резко возрастают напряжения на конденсаторе и катушке. Эти напряжения становятся одинаковыми и во много раз больше внешнего напряжения. Колебания напряжения на катушке индуктивности и конденсаторе всегда происходят в противофазе. При резонансе амплитуды этих напряжений одинаковы и они компенсируют друг друга. Падение напряжения происходит только на активном сопротивлении.



При резонансе возникают наилучшие условия для поступления энергии от источника напряжения в цепь: при резонансе колебания напряжения в цепи совпадают по фазе с колебаниями силы тока. Установление колебаний происходит постепенно. Чем меньше сопротивление, тем больше времени требуется для достижения максимального значения силы тока за счет энергии, поступающей от источника.

Явление резонанса используется в радиосвязи. Каждая передающая станция работает на определенной частоте. С приемной антенной индуктивно связан колебательный контур. При приеме сигнала в катушке возникают переменные ЭДС. С помощью конденсатора переменной емкости добиваются совпадения частоты контура с частотой принимаемых колебаний. Из колебаний всевозможных частот, возбужденных в антенне, контур выделяет колебания, равные его собственной частоте.

Резонанс может привести к перегреву проводов и аварии, если цепь не рассчитана на работу в условиях резонанса.

3.5.3. Гармонические электромагнитные колебания

♦ *Гармоническими электромагнитными колебаниями* называются периодические изменения заряда, силы тока и напряжения, происходящие по гармоническому — синусоидальному или косинусоидальному — закону.

В электрических цепях это могут быть колебания:

- силы тока — $i = I_m \cos(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2});$
- напряжения — $u = U_m \cos(\omega t + \varphi);$
- заряда — $q = q_m \cos(\omega t + \varphi);$
- ЭДС — $\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t.$

В этих уравнениях ω — циклическая частота, φ — начальная фаза колебаний, амплитудные значения: силы тока — I_m , напряжения — U_m и заряда — q_m .

Важно!

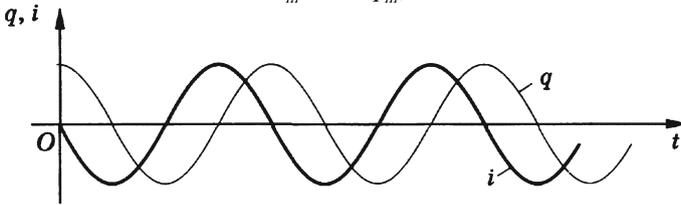
Если в начальный момент времени заряд имеет максимальное значение, а сила тока равна нулю, то колебания заряда совершаются по закону косинуса с начальной фазой, равной нулю. Если в начальный момент времени заряд равен нулю, а сила тока максимальна, то колебания заряда совершаются по закону синуса.

Сила тока равна первой производной заряда от времени:

$$i = q'(t).$$

Амплитуда колебаний силы тока равна:

$$I_m = \omega \cdot q_m.$$



Колебания заряда и напряжения в колебательном контуре происходят в одинаковых фазах. Амплитуда напряжения равна:

$$U_m = \frac{q_m}{C}.$$

Колебания силы тока смещены по фазе относительно колебаний заряда на $\pi/2$.

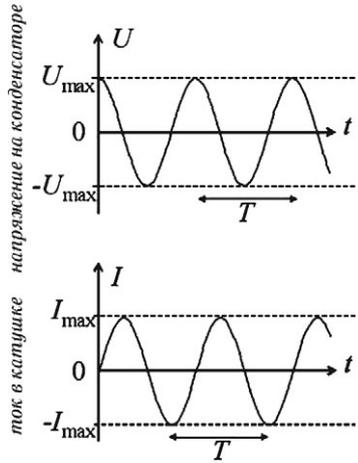
Период свободных электромагнитных колебаний

Период свободных электромагнитных колебаний находится по формуле Томсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

где L — индуктивность катушки, C — емкость конденсатора.

Циклическая частота: $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$



Важно!

Период и циклическая частота не зависят от начальных условий, а определяются только индуктивностью катушки и электроемкостью конденсатора. Амплитуда колебаний заряда и силы тока определяются начальным запасом энергии в контуре.

При свободных гармонических колебаниях происходит периодическое преобразование энергии. Период колебаний энергии в два раза меньше, чем период колебаний заряда, силы тока и напряжения. Частота колебаний энергии в два раза больше частоты колебаний заряда, силы тока и напряжения.

3.5.4. Переменный ток. Производство, передача и потребление электрической энергии

◆ **Переменным** называется ток, изменяющийся по величине и направлению по гармоническому закону.

Переменный ток представляет пример вынужденных электромагнитных колебаний. Для описания переменного электрического тока используют следующие величины:

- мгновенное значение силы тока — i ;
- мгновенное значение напряжения — u ;
- амплитудное значение силы тока — I_m ;
- амплитудное значение напряжения — U_m .

Цепь переменного тока представляет собой колебательный контур, к которому приложена внешняя синусоидальная ЭДС. В цепь переменного тока могут включаться различные нагрузки: резистор, катушка, конденсатор.

Активное сопротивление

Проводник, преобразующий всю энергию электрического тока во внутреннюю, называется *активным сопротивлением* R . (Эту величину мы раньше называли сопротивлением.) Активное сопротивление зависит от материала проводника, его длины и площади поперечного сечения и не зависит от частоты переменного тока.

В проводнике с активным сопротивлением колебания силы тока и напряжения совпадают по фазе:

$$u = U_m \cos \omega t, \quad i = I_m \cos \omega t.$$

Мгновенное значение мощности: $p = i^2 R$,

среднее значение мощности за период: $\bar{p} = \frac{I_m^2 R}{2}$.

- ◆ **Действующим значением силы переменного тока I_d** называют значение силы постоянного тока, который в том же проводнике выделяет то же количество теплоты, что и переменный ток за то же время:

$$I_d = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

- ◆ **Действующим значением напряжения переменного тока U_d** называют значение напряжения постоянного тока, который в том же проводнике выделяет то же количество теплоты, что и переменный ток за то же время:

$$U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

Для цепи с активным сопротивлением выполняется закон Ома для мгновенных, амплитудных и действующих значений.

Индуктивное сопротивление

Катушка в цепи переменного тока имеет большее сопротивление, чем в цепи постоянного тока. В такой цепи колебания напряжения опережают колебания силы тока по фазе на $\pi/2$. Колебания силы тока и напряжения происходят по закону:

$$u = U_m \sin(\omega t + \pi/2), \quad i = I_m \sin \omega t.$$

Амплитуда силы тока в катушке:

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}, \quad \text{где } L \text{ — индуктивность катушки.}$$

- ◆ **Индуктивным сопротивлением X_L** называют физическую величину, равную произведению циклической частоты на индуктивность катушки:

$$X_L = \omega L.$$

Индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте. Физический смысл индуктивного сопротивления: ЭДС самоиндукции препятствует изменению в ней силы тока. Это приводит к существованию индуктивного сопротивления, уменьшающего силу тока.

Для цепи с индуктивным сопротивлением выполняется закон Ома.

Емкостное сопротивление

В цепи постоянного тока через конденсатор ток не идет. Для переменного тока конденсатор обладает конечным сопротивлением, обратно пропорциональным его емкости. В цепи переменного тока сопротивление конденсатора меньше, чем в цепи постоянного тока.

В такой цепи колебания напряжения отстают от колебаний силы тока по фазе на $\pi/2$. Колебания силы тока и напряжения происходят по закону:

$$u = U_m \cos \omega t, \quad i = I_m \cos(\omega t + \pi/2).$$

Амплитуда силы тока в катушке: $I_m = C\omega U_m$.

Если ввести обозначение $X_C = \frac{1}{\omega C}$, то получим соотношение между амплитудными значениями силы тока и напряжения, аналогичное закону Ома: $I_m = \frac{U_m}{X_C}$.

♦ **Емкостным сопротивлением** X_C называют величину, обратную произведению циклической частоты на электроемкость конденсатора. Емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте.

Физический смысл емкостного сопротивления: изменению переменного тока в любой момент времени противодействует электрическое поле между обкладками конденсатора.

В цепи переменного тока колебания силы тока и ЭДС происходят по синусоидальному закону с одинаковой циклической частотой ω и разностью фаз φ :

$$I = I_m \sin \omega t, \quad \varepsilon = \varepsilon_m \sin(\omega t + \varphi).$$

Соотношения амплитудных значений силы тока I_m и ЭДС ε_m в цепи переменного тока связаны между собой **законом Ома для цепи переменного тока**:

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{Z}.$$

Он гласит: амплитуда силы переменного тока прямо пропорциональна амплитуде ЭДС и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи:

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{Z}, \quad Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}.$$

Величина Z называется *полным сопротивлением цепи переменного тока*.

Электрическая энергия имеет перед другими видами энергии следующие преимущества:

- можно передавать на большие расстояния с малыми потерями;
- удобно распределять между потребителями;
- легко превращать в другие виды энергии.

В настоящее время производится и используется энергия переменного тока. Это связано с возможностью преобразовывать его напряжение и силу тока с малыми потерями энергии, что особенно важно при передаче электроэнергии на большие расстояния.

Различают следующие типы электростанций:

- тепловые;
- гидроэлектростанции;
- атомные.

Получение переменного тока

Переменный ток получают с помощью генератора переменного тока.

Генератор переменного тока (электромеханический генератор переменного тока) — это устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую. В основе работы генератора переменного тока лежит явление электромагнитной индукции.

Процесс получения переменного тока можно рассмотреть на примере вращения витка провода в однородном магнитном поле. Магнитный поток через площадь витка равен:

$$\Phi = BS \cos \alpha .$$

Если период вращения витка T , то угол $\alpha = \frac{2\pi t}{T} = \omega t$.

Тогда $\Phi = BS \cos \omega t$.

ЭДС индукции изменяется по закону $e = -\Phi' = BS\omega \sin \omega t = \varepsilon_m \sin \omega t$.

Амплитуда ЭДС $\varepsilon_m = BS\omega$.

Если рамка содержит N витков, то $\varepsilon_m = NBS\omega$.

Основные части генератора переменного тока:

- обмотка статора с большим числом витков, в ней индуцируется ЭДС. Статор состоит из отдельных пластин из электротехнической стали для уменьшения нагрева от вихревых токов;
- ротор (вращающаяся часть генератора) создает магнитное поле. Для получения нужной частоты переменного тока может иметь несколько пар полюсов. На гидроэлектростанциях в генераторе число пар полюсов равно 40–50, на тепловых электростанциях — 10^{-16} ;
- клеммы для снятия напряжения.

Промышленные генераторы вырабатывают напряжение порядка 10^4 В. Промышленная частота переменного тока в нашей стране 50 Гц.

Передача электроэнергии

Электроэнергия производится в основном вдалеке от основных потребителей энергии, там, где есть топливные ресурсы.

С электростанции переменный ток по проводам линии электропередач (ЛЭП) поступает к различным потребителям электрической энергии. Для уменьшения потерь при передаче переменного тока не-

обходимо использовать высокое напряжение. Чем длиннее линия, тем выше должно быть напряжение. В высоковольтных ЛЭП оно может достигать 500 кВ. Генераторы на электростанциях вырабатывают напряжение 16–20 кВ. Потребителям не нужно высокое напряжение. Возникает необходимость преобразования напряжения. С электростанции электрический ток поступает на повышающую подстанцию, затем передается по линии электропередач на понижающую подстанцию, где напряжение понижается до 6–10 кВ, а затем до 220–380 В. Для преобразования напряжения используют трансформатор.

Трансформатор — устройство, преобразующее переменное напряжение без изменения его частоты.

На схемах трансформатор обозначается: 

Основные части трансформатора:

- замкнутый сердечник из электротехнической стали;
- две катушки-обмотки.

Катушка, подключаемая к источнику переменного напряжения, называется первичной обмоткой; катушка, к которой подключается нагрузка, — вторичной обмоткой.

Сердечник набирается из отдельных пластин для уменьшения потерь на нагревание вихревыми токами.

Принцип действия основан на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к полюсам источника напряжения в ней возникает переменный ток. Напряжение изменяется с течением времени по гармоническому закону. С такой же частотой будут изменяться сила тока в катушке и магнитный поток, создаваемый этим током.

При изменении магнитного потока в каждом витке провода первичной обмотки возникает переменная ЭДС самоиндукции. Этот магнитный поток будет пронизывать и вторую катушку. В каждом ее витке возникает ЭДС индукции, изменяющаяся по гармоническому закону с той же частотой. Число витков в обмотках различно. Отношение ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_1 в первичной обмотке к ЭДС индукции во вторичной обмотке \mathcal{E}_2 равно отношению числа витков в первичной обмотке N_1 к числу витков во вторичной обмотке N_2 :

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Режим работы

- *Режим холостого хода* — разомкнута цепь вторичной обмотки. Напряжение U_2 на ее концах в любой момент времени равно ЭДС индукции \mathcal{E}_2 , взятой с противоположным знаком. Поэтому можно записать:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2},$$

где k — коэффициент трансформации.

Если $k > 1$, то трансформатор понижающий, если $k < 1$, то повышающий.

- *Режим нагрузки.* При подключении нагрузки к концам вторичной обмотки в ней возникает переменный ток. Напряжение U_2 на ее концах в любой момент времени отличается от ЭДС индукции ε_2 на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении вторичной обмотки r : $U_2 = \varepsilon_2 - I_2 r$ или $U_2 = I_2 R$.

Мощность тока в обмотках одинакова. Поэтому увеличение напряжения на входе повышающего трансформатора в k раз сопровождается уменьшением силы тока во вторичной катушке во столько же раз.

В трансформаторе нет потерь на трение, так как нет вращающихся частей. Потери в сердечнике состоят из потерь на нагревание и на перемагничивание.

Отношение мощности P_2 , потребляемой нагрузкой, к мощности P_1 , потребляемой первичной обмоткой трансформатора, называется коэффициентом полезного действия трансформатора:

$$\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} = \frac{U_2 I_2}{U_2 I_2 + I_2^2 r} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{потерь}}}.$$

КПД трансформатора — 98%.

Потребление электрической энергии: промышленность — около 70%; сельское хозяйство; транспорт; строительство; средства связи; в быту.

3.5.5. Электромагнитное поле

- ◆ *Электромагнитное поле* — это особый вид материи, с помощью которого осуществляется электромагнитное взаимодействие заряженных тел или частиц.

Это понятие было введено Д. Максвеллом, развившим идеи Фарадея о том, что переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.

Всякое изменение магнитного поля порождает в окружающем пространстве вихревое электрическое поле, силовые линии которого замкну-

ты. Вихревое электрическое поле порождает появление вихревого магнитного поля и так далее. Эти переменные электрическое и магнитное поля, существующие одновременно, и образуют единое электромагнитное поле.

Характеристиками этого поля являются вектор напряженности и вектор магнитной индукции.

Если электрический заряд покоится, то вокруг него существует только электрическое поле.

Если напряженность электрического поля равна нулю, а магнитная индукция отлична от нуля, то обнаруживается только магнитное поле.

Если электрический заряд движется с постоянной скоростью, то вокруг него существует электромагнитное поле.

Максвелл предположил, что при ускоренном движении зарядов в пространстве будет возникать возмущение, которое будет распространяться в вакууме с конечной скоростью. Когда это возмущение достигнет второго заряда, то изменится сила, с которой электромагнитное поле действует на этот заряд.

При ускоренном движении заряда происходит излучение электромагнитной волны. Электромагнитное поле материально. Оно распространяется в пространстве в виде электромагнитной волны.

3.5.6. Свойства электромагнитных волн

◆ **Электромагнитная волна** — это изменяющееся во времени и распространяющееся в пространстве электромагнитное поле.

Существование электромагнитных волн было теоретически предсказано английским физиком Дж. Максвеллом в 1864 году. Электромагнитные волны были открыты Г. Герцем.

Источник электромагнитной волны — ускоренно движущаяся заряженная частица — колеблющийся заряд.

Важно!

Наличие ускорения — главное условие излучения электромагнитной волны. Интенсивность излученной волны тем больше, чем больше ускорение, с которым движется заряд.

Источниками электромагнитных волн служат антенны различных конструкций, в которых возбуждаются высокочастотные колебания.

Электромагнитная волна называется **монохроматической**, если векторы \vec{E} и \vec{B} совершают гармонические колебания с одинаковой частотой (частотой волны).

Длина электромагнитной волны: $\lambda = cT = \frac{c}{\nu}$,

где c — скорость электромагнитной волны, T — период, ν — частота электромагнитной волны.

Свойства электромагнитных волн

- В вакууме электромагнитная волна распространяется с конечной скоростью, равной скорости света $3 \cdot 10^8 \frac{M}{C}$.
- Электромагнитная волна поперечная. Колебания векторов напряженности переменного электрического поля и магнитной индукции переменного магнитного поля взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной к вектору скорости волны.
- Электромагнитная волна переносит энергию в направлении распространения волны.

Важно!

Электромагнитная волна в отличие от механической волны может распространяться в вакууме.

◆ **Плотность потока или интенсивность** — это электромагнитная энергия, переносимая через поверхность единичной площади за единицу времени.

Обозначение — I , единица измерения в СИ — *ватт на квадратный метр* ($Вт/м^2$).

Важно!

Плотность потока излучения электромагнитной волны от точечного источника убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника и пропорциональна четвертой степени частоты.

Электромагнитная волна обладает общими для любых волн свойствами, это:

- отражение,
- преломление,
- интерференция,
- дифракция,
- поляризация.

Электромагнитная волна производит давление на вещество. Это означает, что у электромагнитной волны есть импульс.

3.5.7. Различные виды электромагнитных излучений и их применение

Электромагнитные излучения имеют длины волн от 10^{-12} до 10^4 м или частоты от $3 \cdot 10^4$ до $3 \cdot 10^{20}$.

Различают следующие *виды электромагнитных излучений*:

- радиоволны;
- инфракрасное излучение;
- видимое излучение (свет);
- ультрафиолетовое излучение;
- рентгеновское излучение;
- гамма-излучение.

Границы между диапазонами условны, но излучения имеют качественные различия в свойствах. При переходе от излучений с малой частотой к излучениям с большей частотой волновые свойства проявляются слабее, а корпускулярные (квантовые) — сильнее.

Радиоволны

$\lambda = 10^3 - 10^{-3}$ м, $\nu = 10^5 - 10^{11}$ Гц. Источники радиоволн — колебательный контур, вибратор.

Радиоволны делятся на:

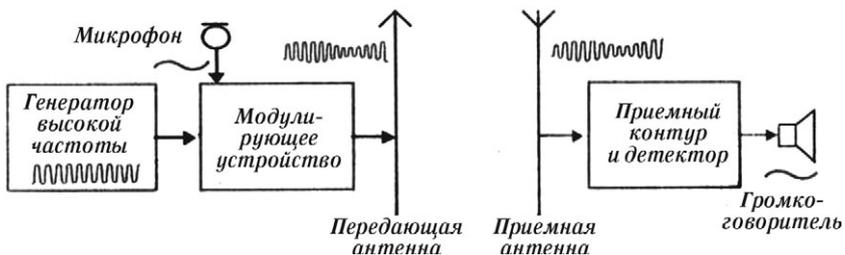
- длинные (длина больше 1 км);
- средние (от 100 м до 1 км);
- короткие (от 10 до 100 м);
- ультракороткие (меньше 10 м).

Свойства: отражение, поглощение, интерференция, дифракция.

Применение: радиосвязь, телевидение, радиолокация.

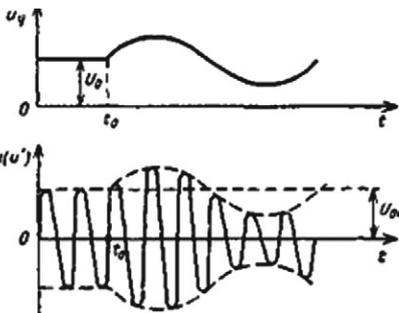
Радиосвязью называется передача информации с помощью радиоволн. Радиосвязь осуществляется с помощью модулированных радиоволн. Модуляцией радиоволны называется изменение ее параметров (амплитуды, частоты, начальной фазы) с частотой, меньшей частоты передаваемой волны.

Схема радиосвязи показана на рисунке:

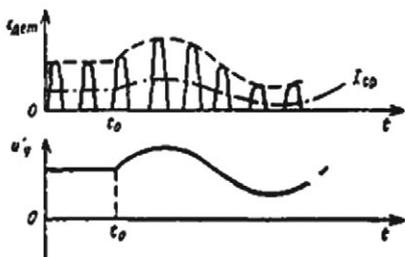


Передача радиоволн.

Генератор высокой частоты вырабатывает высокочастотные колебания несущей частоты. Звуковые колебания поступают в микрофон, где преобразуются в электромагнитные колебания. В модуляторе эти колебания преобразуются в модулированные колебания. После усиления модулированные колебания поступают в передающую антенну, которая излучает электромагнитные волны. На рисунке показан звуковой сигнал низкой частоты и модулированный высокочастотный сигнал.



Прием радиоволн. Электромагнитные колебания поступают в приемную антенну и вызывают электромагнитные колебания в приемном контуре. Эти колебания поступают в усилитель, а затем в детектор. В качестве детектора используют устройство с односторонней проводимостью. Это может быть полупроводниковый диод.



В детекторе сигнал демодулируют (детектируют). Процесс детектирования заключается в выделении из высокочастотных модулированных колебаний колебаний низкой (звуковой) частоты. После сглаживания и усиления сигнал поступает в динамик. На рисунке показаны процессы детектирования (демодуляции) и сглаживания.

Радиолокацией называют обнаружение и определение местоположения объектов с помощью радиоволн. Излучение осуществляется короткими импульсами. В интервале времени между излучением двух последовательных импульсов осуществляется прием отраженного от объекта сигнала. Для радиолокации используют ультракороткие радиоволны.

Инфракрасное (тепловое) излучение

$\lambda = 10^{-3} - 10^{-7} \text{ м}$, $\nu = 10^{11} - 10^{14} \text{ Гц}$. Источники — атомы и молекулы вещества.

Это излучение испускают все тела при температуре, отличной от 0 К. **Свойства:** нагревает вещество при поглощении; интерференция; дифракция; проходит через дождь, снег, дымку; невидимо; преломление,

отражение. *Применение*: в приборах ночного видения, в физиотерапии, промышленности (для сушки). Регистрируют с помощью терморпары, болометра, фотографическим методом.

Видимое излучение

$$\lambda = 8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}, \nu = 4 \cdot 10^{11} - 8 \cdot 10^{14} \text{ Гц.}$$

Это излучение воспринимается глазом. *Свойства*: отражение, преломление, поглощение, интерференция, дифракция.

Ультрафиолетовое излучение

$\lambda = 10^{-8} - 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}, \nu = 8 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{15} \text{ Гц.}$ Источники — кварцевые лампы.

Ультрафиолетовое излучение дают светящиеся пары ртути и твердые тела, у которых температура выше 1000⁰С. *Свойства*: химическое действие; большая проникающая способность; биологическое действие; невидимо. *Применение*: в медицине, промышленности. Регистрируют фотографическими методами.

Рентгеновское излучение

$\lambda = 10^{-8} - 10^{-11} \text{ м}, \nu = 3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{19} \text{ Гц.}$ Источник — рентгеновские трубки.

Возникает при торможении быстрых электронов. *Свойства*: высокая химическая активность; биологическое действие; интерференция; дифракция на кристаллической решетке; высокая проникающая способность. *Применение*: в медицине, промышленности, науке.

Гамма-излучение

Длина волны меньше 10^{-11} м , частота от 10^{20} Гц и выше. Источник — ядерные реакции.

Свойства: высокая проникающая способность, сильное биологическое действие. *Применение*: в медицине, промышленности (дефектоскопия), науке.

Шкала электромагнитных излучений позволяет сделать вывод: все электромагнитные излучения обладают одновременно волновыми и квантовыми свойствами, которые дополняют друг друга.

Важно!

Волновые свойства сильнее выражены при малых частотах и больших длинах волн, а квантовые — при больших частотах и малых длинах волн.

Решение задач по теме «Электромагнитные колебания и волны»

По этой теме можно выделить четыре группы задач:

- на определение параметров колебательного контура;
- на уравнения гармонических электромагнитных колебаний;

- на применение закона Ома;
- на расчет мощности и КПД трансформатора.

Решение первой группы задач *на определение параметров колебательного контура* основано на использовании формулы Томсона (формулы периода свободных электромагнитных колебаний) и закона сохранения и превращения энергии в колебательном контуре. Поэтому необходимо записать уравнения для мгновенных значений заряда и напряжения на конденсаторе и силы тока в катушке; записать уравнение для полной энергии колебательного контура в произвольный момент времени. В качестве дополнительных формул могут понадобиться формулы емкости плоского конденсатора, индуктивности катушки и длины электромагнитной волны. Помните, что скорость распространения электромагнитной волны в вакууме равна скорости света — $3 \cdot 10^8$ м/с. В среде с показателем преломления n скорость света можно рассчитать по формуле: $v = \frac{c}{n}$.

Важно!

Амплитудное значение напряжения — $U_m = \frac{q_m}{C}$, амплитудное значение силы тока — $I_m = q_m \omega$.

При решении второй группы задач *на уравнения гармонических электромагнитных колебаний* рекомендуется записать заданное в задаче уравнение и уравнение гармонических колебаний в общем виде. Сравнить эти уравнения и определить основные характеристики: амплитуду, частоту, фазу.

При решении задач *на закон Ома* нужно помнить, что электроизмерительные приборы показывают действующие значения напряжения и силы тока. Действующие значения величин пропорциональны амплитудным значениям. Важно помнить, что резонанс возникает при равенстве индуктивного и емкостного сопротивлений.

Решение четвертой группы задач *на расчет мощности и КПД трансформатора* опирается на знание формул КПД и мощности в цепи.

Основные формулы раздела «Электромагнитные колебания и волны»

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{— резонансная частота}$$

$$q = q_m \sin \omega t \quad \text{— уравнение колебания заряда}$$

$$I = I_m \sin \omega t \quad \text{— уравнение колебания силы тока}$$

$u = U_m \cos \omega t$	– уравнение колебания напряжения
$T = 2\pi\sqrt{LC}$	– период электромагнитных колебаний (формула Томсона)
$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	– циклическая частота
$p = i^2 \cdot R$	– мгновенная мощность
$\bar{p} = \frac{I_m^2 R}{2}$	– среднее значение мощности за период
$I_d = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$	– действующее значение силы тока
$U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$	– действующее значение напряжения
$X_L = \omega L$	– индуктивное сопротивление
$X_C = \frac{1}{\omega C}$	– емкостное сопротивление
$I_m = \frac{\mathcal{E}_m}{Z}$	– закон Ома для цепи переменного тока
$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}$	– полное сопротивление цепи переменного тока
$\mathcal{E}_m = NBS\omega$	– амплитуда ЭДС генератора переменного тока
$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}$	– длина электромагнитной волны
$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$	– коэффициент трансформации
$\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} 100\% = \frac{U_2 I_2}{U_2 I_2 + I_2^2 r} 100\% = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{потерь}}} 100\%$	– КПД трансформатора

3.6. ОПТИКА

◆ **Оптика** — это раздел физики, в котором изучаются закономерности световых явлений, природа света и его взаимодействие с веществом.

◆ **Световой луч** — это линия, вдоль которой распространяется свет.

Закон независимости световых лучей:

при пересечении световых лучей каждый из них продолжает распространяться в прежнем направлении.

◆ **Источник света** — это тело, которое излучает свет.

При излучении света источник теряет энергию, при поглощении его внутренняя энергия увеличивается, т. е. распространение света сопровождается переносом энергии.

Виды источников света:

- тепловые — это источники, в которых излучение света происходит в результате нагревания тела до высокой температуры;
- люминисцентные — это тела, излучающие свет при облучении их светом, рентгеновскими лучами, радиоактивным излучением и т. д.

◆ **Точечный источник света** — это источник, представляющий собой светящуюся материальную точку, т. е. источник, размеры которого малы по сравнению с расстоянием до освещаемого предмета.

Если источник света находится в бесконечности, то его лучи падают на поверхность параллельным пучком.

◆ **Свет** — это электромагнитная волна с частотой от $1,5 \cdot 10^{11}$ Гц до $3 \cdot 10^{16}$ Гц.

Скорость света в вакууме: $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

3.6.1. Прямолинейное распространение света

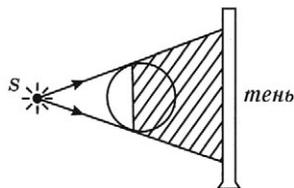
Закон распространения света:

свет в прозрачной однородной среде распространяется прямолинейно.

Экспериментальным доказательством прямолинейности распространения света является образование тени.

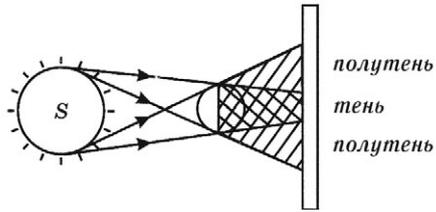
◆ **Тень** — это область пространства, куда не попадает свет от источника.

◆ **Полутень** — это область пространства, куда частично попадает свет от источника.



Если источник света точечный, то на экране образуется четкая тень предмета.

Если источник неточечный, то на экране образуется размытая тень (области тени и полутени).

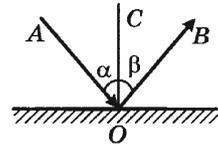


Образованием тени при падении света на непрозрачный предмет объясняются такие явления, как солнечное и лунное затмения.

3.6.2. Закон отражения света

- ◆ **Отражение** — это явление, при котором при падении световых лучей на непрозрачную гладкую поверхность они меняют направление распространения, возвращаясь в прежнюю среду.

АО — падающий луч, ОВ — отраженный луч, СО — перпендикуляр



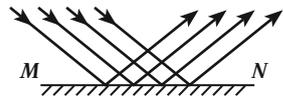
- ◆ **Угол падения** — это угол между падающим лучом и перпендикуляром к отражающей поверхности.
- ◆ **Угол отражения** — это угол между отраженным лучом и перпендикуляром к отражающей поверхности.

Законы отражения света

- Лучи падающий и отраженный лежат в одной плоскости с перпендикуляром, восстановленным в точку падения луча к отражающей поверхности.
- Угол отражения равен углу падения.
 $\angle\beta = \angle\alpha$, где α — угол падения, β — угол отражения.

Виды отражения

- **Зеркальное** — это отражение, при котором лучи, падающие на поверхность параллельным пучком, после отражения остаются параллельными.
- **Рассеянное** — это отражение, при котором лучи, падающие на поверхность параллельным пучком, после отражения отклоняются в различных направлениях.



Если луч падает перпендикулярно отражающей поверхности, то угол падения равен нулю, и угол отражения тоже равен нулю. Поэтому луч отражается в обратном направлении.

Важно!

В оптике все углы отсчитываются от перпендикуляра к отражающей поверхности или к границе раздела сред.

3.6.3. Построение изображений в плоском зеркале

Построение изображения в плоском зеркале основано на законах отражения света.

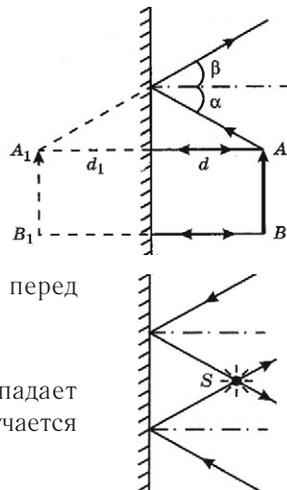
Алгоритм построения изображения в плоском зеркале

1. Проведите из данной точки на поверхность луч под произвольным углом. В точке падения луча на границу раздела сред проведите перпендикуляр.
2. Отметьте угол падения α .
3. Постройте равный ему угол отражения β .
4. Проведите из данной точки перпендикуляр к поверхности зеркала ($\alpha = 0$).
5. Постройте равный ему угол отражения ($\beta = 0$) (эти лучи совпадают).
6. Проведите пунктирной линией продолжения отраженных лучей за зеркало.
7. Найдите точку пересечения продолжений отраженных лучей (эта точка является изображением данной точки в плоском зеркале).
8. Аналогично постройте изображение второй точки.
9. Соедините полученные изображения точек пунктирной линией.

Изображение предмета в плоском зеркале мнимое, прямое, по размерам равное предмету, находящееся за зеркалом на таком же расстоянии, на каком предмет находится перед зеркалом.

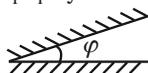
Важно!

Если на поверхность плоского зеркала падает сходящийся пучок лучей, то изображение получается действительным.



Если поверхность двух плоских зеркал образует угол φ , то количество изображений в такой системе зеркал можно определить по формуле:

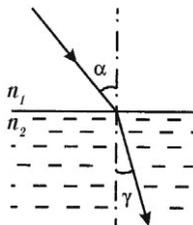
$$N = \frac{360^\circ}{\varphi} - 1, \text{ где } N - \text{ количество изображений.}$$



3.6.4. Закон преломления света

- ◆ **Преломление света** — это изменение направления распространения светового луча на границе раздела двух сред.
- ◆ **Угол преломления** — это угол между преломленным лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред.

γ — угол преломления



Законы преломления света

- Лучи падающий и преломленный лежат в одной плоскости с перпендикуляром, восстановленным в точку падения луча к преломляющей поверхности.
- Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред и равная относительному показателю преломления двух сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}, \text{ где } n_{21} - \text{ относительный показатель преломления.}$$

Первой является среда, в которой распространяется падающий луч, второй является среда, в которой распространяется преломленный луч.

Относительный показатель преломления равен отношению абсолютного показателя преломления второй среды к абсолютному показателю преломления первой среды:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}, \text{ где } n_1 - \text{ абсолютный показатель преломления первой среды; } n_2 - \text{ абсолютный показатель преломления второй среды.}$$

Абсолютный показатель преломления показывает, во сколько раз скорость света в вакууме больше, чем в данной среде:

$$n = \frac{c}{v}, \text{ где } c - \text{ скорость света в вакууме, } v - \text{ скорость распространения света в данной среде.}$$

$$n_{21} = \frac{c \cdot v_1}{v_2 \cdot c} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Относительный показатель преломления показывает, во сколько раз скорость распространения света в первой среде больше, чем во второй:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Среда, у которой абсолютный показатель преломления больше, является оптически более плотной средой.

Среда, у которой абсолютный показатель преломления меньше, является оптически менее плотной средой.

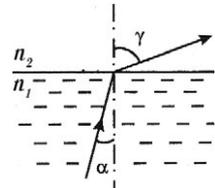
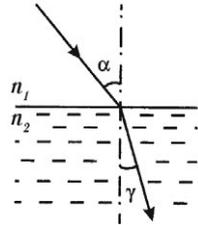
Следствия закона преломления света

- Если свет падает из оптически менее плотной среды в оптически более плотную, то угол падения больше угла преломления:

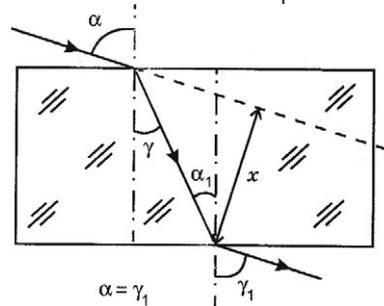
$$n_1 < n_2, \quad \angle \alpha > \angle \gamma.$$

- Если свет падает из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, то угол падения меньше угла преломления:

$$n_1 > n_2, \quad \angle \alpha < \angle \gamma.$$



Если луч падает на плоско параллельную пластину, изготовленную из оптически более плотного вещества, чем окружающая среда, то луч не изменяет своего направления, а лишь смещается на некоторое расстояние.

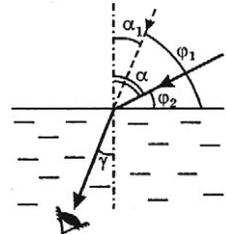


x — смещение луча от первоначального направления:

$$x = \frac{d \cdot \sin(\alpha - \gamma)}{\cos \gamma}, \text{ где } d \text{ — толщина пластины.}$$

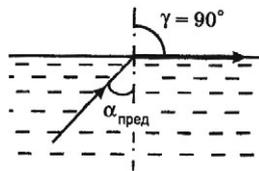
Важно!

Если в условии задачи говорится, что «кажется, что луч падает под углом φ_1 к поверхности воды», то имеют в виду не кажущийся угол падения α_1 , а угол между кажущимся падающим лучом и поверхностью воды φ_1 .



3.6.5. Полное внутреннее отражение

Если свет падает из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду, то с увеличением угла падения увеличивается угол преломления. При некотором значении угла падения угол преломления становится равным 90° . Преломленный луч будет скользить по поверхности раздела двух сред.

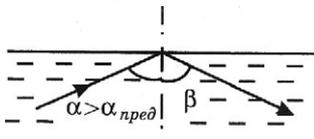


◆ **Предельный угол полного отражения** — это угол падения, при котором угол преломления становится равным 90° :

$$\frac{\sin \alpha_{пр.}}{\sin 90^\circ} = \sin \alpha_{пр.} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Если вторая среда — воздух, $n_2 = 1$, то $\sin \alpha_{пр.} = \frac{1}{n_1}$.

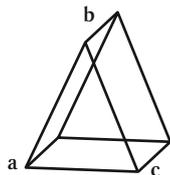
При дальнейшем увеличении угла падения угол преломления тоже увеличивается и наблюдается только отражение света. Это явление называется *полным отражением света*.



Применение явления полного внутреннего отражения

Треугольная призма — прозрачное тело, ограниченное с трех сторон плоскими поверхностями так, что линии их пересечения взаимно параллельны.

Если призма изготовлена из оптически более плотного вещества, чем окружающая среда, то луч, дважды преломляясь, отклоняется к основанию призмы, а мнимое изображение источника света смещается к вершине призмы.



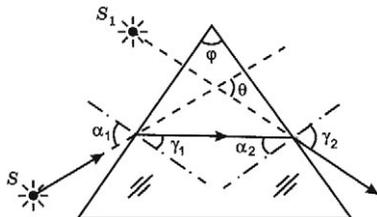
Преломляющий угол призмы — это угол, лежащий против основания.

Угол отклонения луча призмой — это угол между направлением падающего на призму и вышедшего из призмы лучей.

φ — преломляющий угол,

θ — угол отклонения луча призмой.

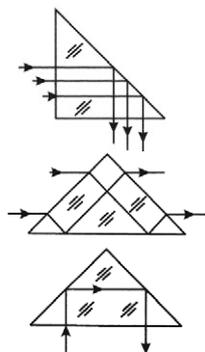
$$\Theta = \alpha_1 + \gamma_2 - \varphi.$$



Важно!

С помощью треугольной равнобедренной призмы с преломляющим углом 90° можно:

- повернуть луч на 90° (поворотная призма, используется в перископах);
- изменить направление луча на 180° (оборотная призма, используется в биноклях);
- изменить относительное расположение лучей.



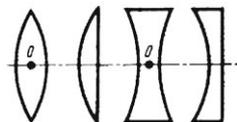
3.6.6. Линзы. Оптическая сила линзы

- ◆ **Линза** — это прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими или криволинейными поверхностями, одна из которых может быть плоской.
- ◆ **Тонкая линза** — физическая модель линзы, в которой ее толщиной можно пренебречь по сравнению с диаметром линзы.

Классификация линз

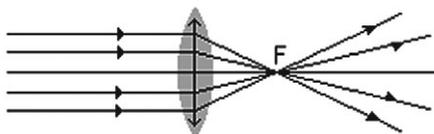
1. По форме:

- *выпуклые* — это линзы, у которых средняя часть толще, чем края;
- *вогнутые* — это линзы, у которых края толще, чем средняя часть.

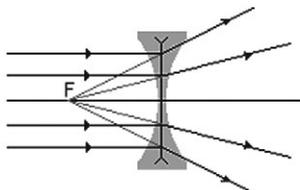


2. По оптическим свойствам:

- *собирающие* — это линзы, после прохождения которых параллельный пучок лучей собирается в одной точке;



- *рассеивающие* — это линзы, после прохождения которых параллельный пучок лучей рассеивается.



Условные обозначения:



— собирающая линза;



— рассеивающая линза.

Величины, характеризующие линзу

Главная оптическая ось — это прямая, проходящая через центры сферических поверхностей линзы.

Оптический центр линзы — это точка пересечения главной оптической оси с линзой, проходя через которую луч не изменяет своего направления.

Побочная оптическая ось — это любая прямая, проходящая через оптический центр линзы под произвольным углом к главной оптической оси.

Фокус линзы — это точка, в которой пересекаются после преломления лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси.

Обозначение — F .

Фокусное расстояние — это расстояние от оптического центра линзы до ее фокуса. Обозначение — F , единица измерения — m .

Фокальная плоскость — это плоскость, проходящая через фокус линзы перпендикулярно ее главной оптической оси.

Побочный фокус — это точка пересечения побочной оптической оси с фокальной плоскостью.

Оптическая сила линзы — это величина, обратная фокусному расстоянию.

Обозначение — D , единица измерения — *диоптрия (дптр)*:

$$D = \frac{1}{F}.$$

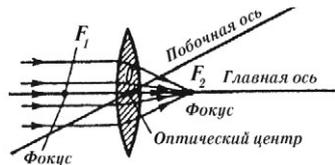
1 *дптр* — это оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 m .

Важно!

Оптическая сила линзы зависит от показателя преломления линзы и от радиусов кривизны сферических поверхностей, ограничивающих линзу:

$$D = \left(\frac{n_l}{n_{cp}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где n_l — показатель преломления линзы, n_{cp} — показатель преломления среды, R_1 и R_2 — радиусы сферических поверхностей.



Если поверхности выпуклые, то $R_1 > 0$ и $R_2 > 0$, если поверхности вогнутые, то $R_1 < 0$ и $R_2 < 0$.

Если одна из поверхностей линзы плоская, например первая, то $R_1 \rightarrow \infty$, а вторая поверхность выпуклая: $R_2 > 0$, то

$$D = \left(\frac{n_l}{n_{cp}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{R_2} \right), \text{ т.к. } \frac{1}{\infty} = 0.$$

3.6.7. Формула тонкой линзы

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f},$$

где F – фокусное расстояние линзы, d – расстояние от предмета до линзы, f – расстояние от линзы до изображения.

Правило знаков:

- $F > 0$, если линза собирающая; $F < 0$, если линза рассеивающая;
- $d > 0$, если предмет действительный; $d < 0$, если предмет мнимый (если на линзу падает сходящийся пучок лучей);
- $f > 0$, если изображение действительное; $f < 0$, если изображение мнимое.

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} \quad \text{— линза собирающая, предмет действительный, изображение действительное;}$$

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f} \quad \text{— линза собирающая, предмет действительный, изображение мнимое;}$$

$$\frac{1}{F} = -\frac{1}{d} + \frac{1}{f} \quad \text{— линза собирающая, предмет мнимый, изображение действительное;}$$

$$-\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f} \quad \text{— линза рассеивающая, предмет действительный, изображение мнимое;}$$

$$-\frac{1}{F} = -\frac{1}{d} - \frac{1}{f} \quad \text{— линза рассеивающая, предмет мнимый, изображение мнимое.}$$

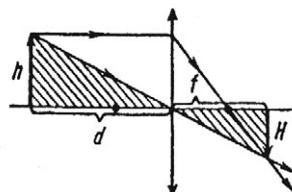
Увеличение линзы – это величина, равная отношению линейных размеров изображения к линейным размерам предмета.

Обозначение – Γ , единицы измерения – нет.

$$\Gamma = \frac{H}{h}, \quad \text{где } H \text{ — линейный размер изображения,} \\ h \text{ — линейный размер предмета.}$$

$$\Gamma = \frac{f}{d},$$

где f — расстояние от линзы до изображения, d — расстояние от предмета до линзы.



Важно!

При расчете увеличения линзы знаки f и d не учитываются.

3.6.8. Построение изображений в линзах

Для построения изображения в линзах следует помнить:

- 1) луч, идущий вдоль главной оптической оси линзы, не преломляется;
- 2) луч, проходящий через оптический центр линзы, не преломляется;
- 3) луч, падающий на собирающую линзу параллельно главной оптической оси, после преломления пройдет через фокус линзы;
- 4) луч, падающий на рассеивающую линзу параллельно главной оптической оси, преломится так, что его мнимое продолжение пройдет через фокус линзы, а сам луч — противоположно мнимому продолжению;
- 5) луч, падающий на собирающую линзу через фокус, после преломления пройдет параллельно главной оптической оси линзы;
- 6) произвольный луч после преломления в собирающей линзе пойдет через побочный фокус (точку фокальной плоскости, в которой ее пересечет параллельная произвольному лучу побочная оптическая ось);
- 7) произвольный луч, падающий на рассеивающую линзу, преломится так, что его мнимое продолжение пройдет через точку, в которой пересечет фокальную плоскость линзы побочная оптическая ось, параллельная произвольному лучу.

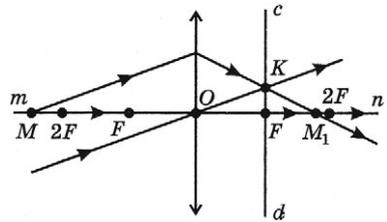
Изображение, даваемое тонкой линзой, может быть действительным или мнимым.

Действительное изображение получается в результате пересечения преломленных в линзе лучей, исходящих из данной точки.

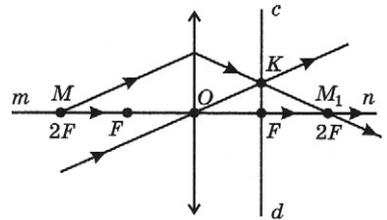
Мнимое изображение получается в результате пересечения продолжений преломленных в линзе лучей, исходящих из данной точки.

Построение изображений точки, даваемых собирающей линзой

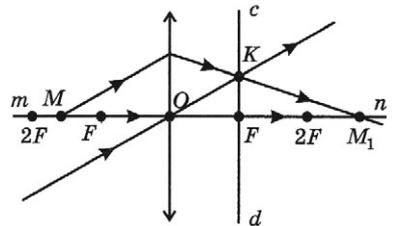
- Если точка находится за двойным фокусом линзы, то ее действительное изображение получается между фокусом и двойным фокусом по другую сторону от линзы.



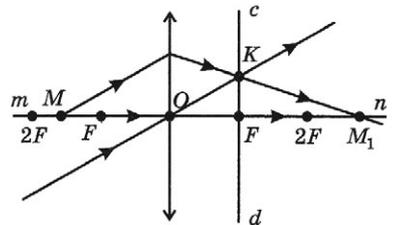
- Если точка находится в двойном фокусе линзы, то его действительное изображение получается в двойном фокусе по другую сторону от линзы.



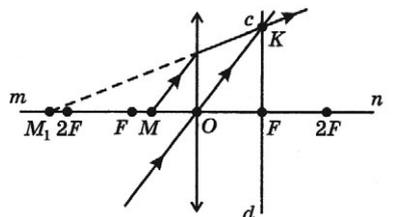
- Если точка находится между фокусом и двойным фокусом линзы, то его действительное изображение получается за двойным фокусом по другую сторону от линзы.



- Если точка находится в фокусе линзы, то его изображение находится в бесконечности.

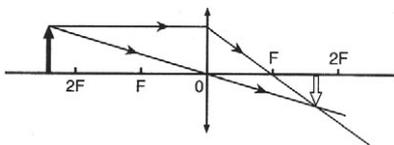


- Если точка находится между линзой и фокусом, то его мнимое изображение получается по ту же сторону от линзы.

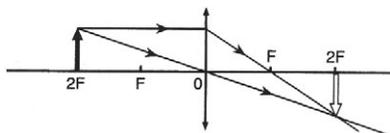


Построение изображений предмета, даваемых собирающей линзой

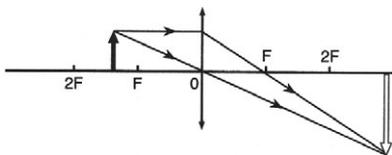
- Если предмет находится за двойным фокусом линзы, то его изображение получается действительным, перевернутым, уменьшенным, по другую сторону от линзы.



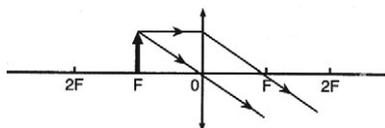
- Если предмет находится в двойном фокусе линзы, то его изображение получается действительным, перевернутым, равным по размерам предмету, в двойном фокусе по другую сторону от линзы.



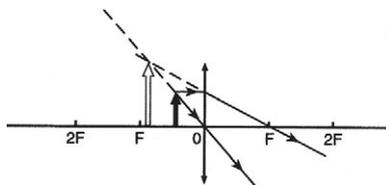
- Если предмет находится между фокусом и двойным фокусом линзы, то его изображение получается действительным, перевернутым, увеличенным, по другую сторону от линзы.



- Если предмет находится в фокусе линзы, то его изображение находится в бесконечности.

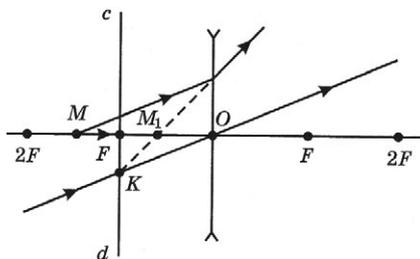


- Если предмет находится между линзой и фокусом, то его изображение получается мнимым, прямым, увеличенным, по ту же сторону от линзы.



Построение изображений точки, даваемых рассеивающей линзой

В рассеивающей линзе изображение точки всегда получается мнимым, по ту же сторону от линзы.



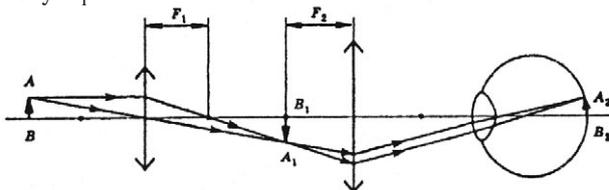
Для получения увеличенного изображения предмет помещают перед линзой на расстоянии немного меньше фокусного. Изображение получается мнимым.

Микроскоп — это оптический прибор, предназначенный для рассматривания очень мелких предметов под большим углом зрения.

Микроскоп состоит из двух собирающих линз — короткофокусного объектива и длиннофокусного окуляра, расстояние между которыми может изменяться:

$$F_1 \ll F_2,$$

где F_1 — фокусное расстояние объектива; F_2 — фокусное расстояние окуляра.



Фотоаппарат — прибор, предназначенный для получения действительных, уменьшенных, перевернутых изображений предметов на фотопленке.

Предметы могут находиться на разных расстояниях.

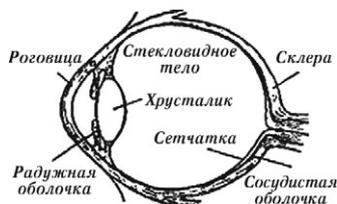
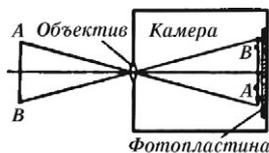
Мультимедийный проектор — оптическое устройство, с помощью которого на экране получают действительное, увеличенное изображение, снятое с источника видеосигнала.

Человеческий глаз — оптическая система, подобная фотоаппарату.

Зрачок регулирует доступ света в глаз. Диаметр зрачка уменьшается при ярком освещении и увеличивается при слабом.

Хрусталик имеет форму двояковыпуклой линзы с показателем преломления 1,41. Он может изменять свою форму, в результате чего меняется его фокусное расстояние. При рассмотрении близких предметов хрусталик становится более выпуклым, при рассмотрении удаленных предметов — более плоским.

На сетчатке глаза образуется действительное, уменьшенное, перевернутое изображение предмета. Благодаря большому количеству нервных окончаний, находящихся на сетчатке, их раздражение передается в мозг и вызывает зрительные ощущения.

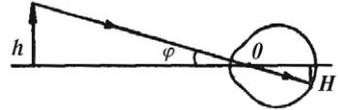


Зрение двумя глазами позволяет видеть предмет с разных сторон, т. е. осуществлять объемное зрение.

Если смотреть на предмет одним глазом, то, начиная с 10 м, он будет казаться плоским, если смотреть на предмет двумя глазами, то это расстояние увеличивается до 500 м.

Угол зрения — это угол, образованный лучами, идущими от краев предмета в оптический центр глаза.

φ — угол зрения.



Аккомодация глаза — это свойство глаза, обеспечивающее четкое восприятие равноудаленных предметов путем изменения фокусного расстояния оптической системы.

Предел аккомодации — от ∞ до 10 см.

Расстояние наилучшего зрения — это наименьшее расстояние, с которого глаз может без особого напряжения рассматривать предметы:

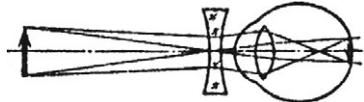
$$d_0 = 25 \text{ см.}$$

Дефекты зрения

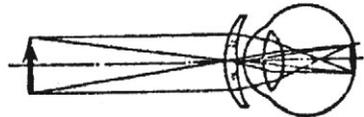
- *Близорукость* — это дефект оптической системы глаза, при котором ее фокус находится перед сетчаткой. Близорукий глаз плохо видит отдаленные предметы.
- *Дальнозоркость* — это дефект оптической системы глаза, при котором ее фокус находится за сетчаткой. Дальнозоркий глаз плохо видит близкие предметы.

Очки — это простейший прибор для коррекции оптических недостатков зрения.

Близорукость исправляют с помощью рассеивающих линз.



Дальнозоркость исправляют с помощью собирающих линз.



3.6.10. Интерференция света

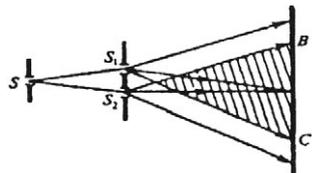
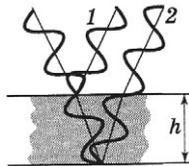
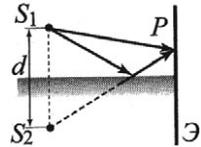
- ◆ *Интерференция света* — это явление перераспределения энергии в пространстве, происходящее в результате сложения когерентных волн, вследствие чего в одних местах возникают максимумы, а в других минимумы.
- ◆ *Когерентные волны* — это волны, имеющие одинаковую частоту и постоянную во времени разность фаз.

Когерентные волны можно получить от одного источника в результате отражения, преломления или дифракции.

Два независимых источника света не могут быть когерентными, поэтому в опытах с интерференцией света световые пучки от одного источника разделяют на два пучка, заставляют их проходить разные расстояния, а потом соединяют.

Когерентными могут быть:

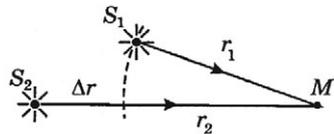
- волны, одна из которых падает на экран непосредственно от источника света, а другая создается его отражением в зеркале (зеркало Ллойда);
- волны, образованные отражением одной и той же волны от двух сдвинутых относительно друг друга поверхностей (тонкие пленки);
- волны, падающие от точечного источника на непрозрачную преграду с двумя узкими щелями, которые разделяют исходный пучок света на два когерентных пучка (опыт Юнга).



Интерференционная картина представляет собой чередование светлых (цветных) и темных полос.

Источником когерентных волн является лазер.

- ◆ **Геометрическая разность хода волн** — это разность путей волн от двух когерентных источников S_1 и S_2 до точки пространства M , в которой наблюдается интерференция.



Обозначение — Δr , единица измерения в СИ — м.

Условие максимума интерференции

Если геометрическая разность хода содержит целое число длин волн или четное число длин полуволн, то в месте их наложения друг на друга наблюдается усиление света — максимум:

$$\Delta r = k\lambda \quad \text{или} \quad \Delta r = 2k \frac{\lambda}{2},$$

где $k = 0; 1; 2; 3...$ — порядок интерференционного максимума.

Условие минимума интерференции

Если геометрическая разность хода содержит нечетное число длин полуволн, то в месте их наложения друг на друга наблюдается ослабление света — минимум:

$$\Delta r = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad \text{или} \quad \Delta r = (2k+1)\frac{\lambda}{2},$$

где $k = 0; 1; 2; 3...$ — порядок интерференционного минимума.

Если свет распространяется в прозрачной среде с показателем преломления n , то применяют понятие оптической разности хода.

◆ **Оптическая разность хода** — это величина, равная произведению показателя преломления и геометрической разности хода волн.

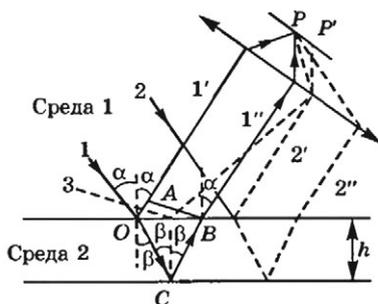
Обозначение — Δ , единица измерения в СИ — m .

$$\Delta = n \cdot \Delta r.$$

Интерференция в тонких пленках

Наблюдаемое в природе радужное окрашивание тонких пленок (масляные пленки на воде, мыльные пузыри, оксидные пленки на металлах) объясняется интерференцией света, возникающей в результате отражения света от передней и задней поверхностей пленки.

На тонкую прозрачную пленку толщиной h падает световая волна, ограниченная лучами 1 и 2. В точке O свет частично отразится от верхней поверхности пленки (волна 1'), а частично преломится и отразится от задней ее поверхности в точке C , преломившись в точке B , выйдет в воздух параллельно волне 1'.



Волны 1' и 1'' когерентны. (То же самое справедливо и для луча 2.)

Если на пути этих лучей поставить собирающую линзу, то они будут накладываться в ее фокальной плоскости и давать интерференционную картину. (То же самое справедливо и для луча 2.)

Максимум освещенности поверхности тонкой пленки в отраженном свете:

$$2hn \cdot \cos \beta = \Delta + \frac{\lambda}{2} \quad \text{или} \quad 2hn = (2k+1)\frac{\lambda}{2},$$

где $\Delta = 2k\frac{\lambda}{2}$ — оптическая разность хода световых волн при отражении от верхней и нижней поверхности, $k = 1; 2; 3...$ — целое число длин полуволн, укладываемых в этой разности хода, β — угол преломления.

Минимум освещенности поверхности тонкой пленки в отраженном свете:

$$2hn \cdot \cos \beta = \Delta \quad \text{или} \quad 2hn = 2k \frac{\lambda}{2}.$$

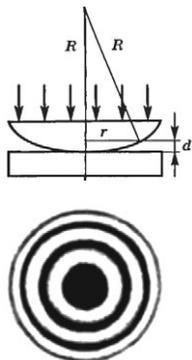
Максимум освещенности поверхности тонкой пленки в проходящем свете:

$$2hn \cdot \cos \beta = \Delta \quad \text{или} \quad 2hn = 2k \frac{\lambda}{2}.$$

Минимум освещенности поверхности тонкой пленки в проходящем свете:

$$2hn \cdot \cos \beta = \Delta + \frac{\lambda}{2} \quad \text{или} \quad 2hn = (2k+1) \frac{\lambda}{2}.$$

Примером интерференции являются кольца Ньютона, которые наблюдаются при отражении света от воздушного зазора, образованного плоскопараллельной пластинкой и соприкасающейся с ней плосковыпуклой линзой с большим радиусом кривизны. Воздушная прослойка постепенно утолщается от точки соприкосновения линзы к краям. Отраженные от верхней и нижней границ воздушной прослойки световые волны интерферируют между собой. При этом получается следующая картина: в точке соприкосновения наблюдается черное пятно, окруженное рядом concentрических светлых и темных колец убывающей ширины.



Радиус светлого кольца Ньютона в отраженном свете:

$$r = \sqrt{(2k-1)R \frac{\lambda}{2}},$$

где R — радиус кривизны линзы, k — номер кольца, считая от центра интерференционной картины.

Радиус темного кольца Ньютона в отраженном свете:

$$r = \sqrt{k\lambda R}.$$

Радиус светлого кольца Ньютона в проходящем свете:

$$r = \sqrt{k\lambda R}.$$

Радиус темного кольца Ньютона в проходящем свете:

$$r = \sqrt{(2k-1)R \frac{\lambda}{2}}.$$

Важно!

При решении задач следует учитывать, в каком свете наблюдается интерференция: в отраженном или проходящем.

Использование интерференции света

- Интерферометры — это приборы, которые контролируют качество обработки поверхностей зеркал, точность изготовления деталей оптических инструментов и измерительных приборов.
- Просветление оптики — на поверхность линз наносят тонкую пленку с показателем преломления меньше, чем показатель преломления стекла. Подбирая толщину пленки и величину показателя преломления, добиваются «гашения отраженных волн», вследствие чего возрастает интенсивность света, пропускаемого линзой.

3.6.11. Дифракция света

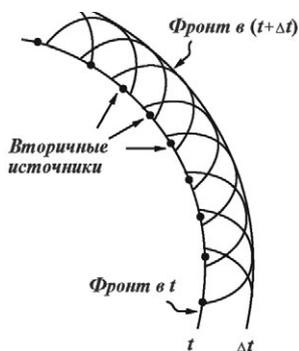
- ◆ **Дифракция света** — это явление отклонения волны от прямолинейного распространения при прохождении через малые отверстия и огибании волной малых препятствий.

Наилучшее условие для наблюдения дифракции создается, когда размеры отверстий или препятствий — порядка длины волны. Чтобы определить распределение интенсивности световой волны, распространяющейся в среде с неоднородностями, используют принцип Гюйгенса—Френеля.

Принцип Гюйгенса—Френеля

Каждая точка фронта волны является источником вторичных волн, которые интерферируют между собой. Поверхность, касательная ко всем вторичным волнам, представляет новое положение фронта волны в следующий момент времени.

Все вторичные источники, расположенные на поверхности фронта волны, когерентны между собой, поэтому амплитуда и фаза волны в любой точке пространства — это результат интерференции волн, излучаемых вторичными источниками.



3.6.12. Дифракционная решетка

◆ **Дифракционная решетка** — это оптический прибор, предназначенный для наблюдения дифракции света.

Дифракционная решетка представляет собой систему параллельных щелей равной ширины, лежащих в одной плоскости и разделенных равными по ширине непрозрачными промежутками.

Дифракционную решетку применяют для разложения света в спектр и измерения длин световых волн.

◆ **Период решетки** — это величина, равная сумме ширины прозрачной и непрозрачной полос решетки.

Обозначение — d , единица измерения в СИ — m .

$$d = a + b, \text{ где}$$

a — ширина прозрачной полосы; b — ширина непрозрачной полосы.

Если решетка регулярна, т. е. ее прозрачные и непрозрачные полосы имеют одинаковую ширину, то период решетки можно рассчитать, разделив ее длину на число штрихов:

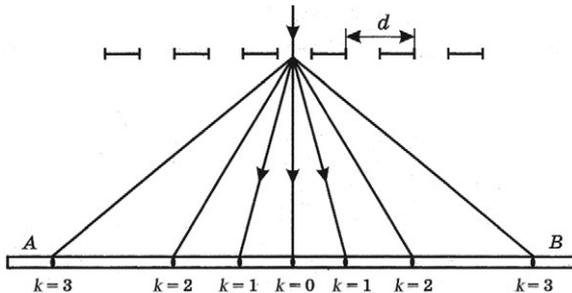
$$d = \frac{l}{N},$$

где l — длина решетки, N — число штрихов.

Формула дифракционной решетки

$$d \sin \varphi = k\lambda,$$

где d — период решетки; φ — угол дифракции; $k = 0; 1; 2; \dots$ — порядок максимума, считая от центрального $k = 0$ и расположенного напротив центра решетки; λ — длина волны, падающей на решетку нормально к ней.



Если дифракционная решетка освещается белым светом, то при $k \neq 0$ разным длинам волн будут соответствовать разные дифракцион-

ные углы. Поэтому положение главных максимумов ненулевого порядка будет различным. Центральный максимум ($k = 0$) остается белым, т. к. при $k = 0$ для всех длин волн $\varphi = 0$, т. е. положение главного максимума для всех длин волн одинаково. Все остальные максимумы имеют вид радужных полос, называемых дифракционными спектрами первого порядка ($k = 1$), второго порядка ($k = 2$) и т. д. Ближе к центральному максимуму находится фиолетовый край спектра, дальше всего — красный, т. к. $\lambda_{\text{фиол}} < \lambda_{\text{кр}}$, то и $\varphi_{\text{фиол}} < \varphi_{\text{кр}}$.

Важно!

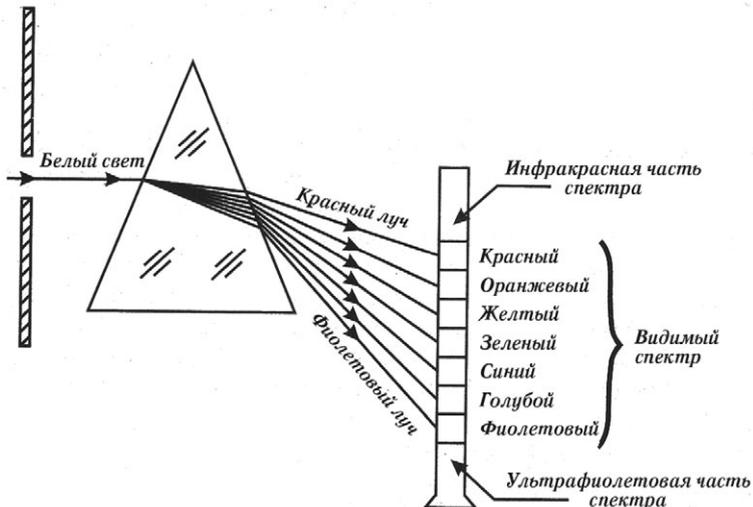
Поскольку углы, под которыми наблюдаются максимумы первого и второго порядка, не превышают 5° , можно вместо синусов углов использовать их тангенсы.

3.6.13. Дисперсия света

◆ **Дисперсия света** — это зависимость показателя преломления среды от длины волны (частоты) падающего на вещество света.

Опыт Ньютона (1672)

Из-за дисперсии световые волны с различной длиной волны по-разному преломляются веществом, что приводит к разложению белого света на цветные монохроматические лучи — спектр.



Цвет	Длина волны, нм	Ширина участка, нм
Красный	800 – 620	180
Оранжевый	620 – 585	35
Желтый	585 – 575	10
Зеленый	550 – 510	40
Голубой	510 – 480	30
Синий	480 – 450	30
Фиолетовый	450 – 390	60

Для лучей света различной цветности показатели преломления данного вещества различны, т. к. различны скорости распространения электромагнитных волн, у которых разная длина волны. Луч красного света преломляется меньше из-за того, что красный свет имеет в веществе наибольшую скорость, а луч фиолетового цвета преломляется больше, так как скорость для фиолетового цвета наименьшая. Это объясняется особенностями взаимодействия этих волн с электронами, входящими в состав атомов и молекул вещества среды, где они движутся.

Дисперсией света объясняется такое природное явление, как радуга.

Основные формулы по теме «Оптика»

$$\angle \beta = \angle \alpha \quad - \text{закон отражения света}$$

$$N = \frac{360^\circ}{\varphi} - 1 \quad - \text{количество изображений, даваемых плоскими зеркалами}$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21} \quad - \text{закон преломления света}$$

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}, \quad n_{21} = \frac{v_1}{v_2} \quad - \text{относительный показатель преломления}$$

$$n = \frac{c}{v} \quad - \text{абсолютный показатель преломления}$$

$$\frac{\sin \alpha_{\text{пр.}}}{\sin 90^\circ} = \sin \alpha_{\text{пр.}} = \frac{n_2}{n_1} \quad - \text{предельный угол полного отражения}$$

$$\Theta = \alpha_1 + \gamma_2 - \varphi \quad - \text{угол отклонения луча призмой}$$

$$x = \frac{d \cdot \sin(\alpha - \gamma)}{\cos \gamma} \quad - \text{смещение луча от первоначального направления}$$

$$D = \frac{1}{F} \quad - \text{оптическая сила линзы}$$

$$\pm \frac{1}{F} = \pm \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} \quad - \text{ формула тонкой линзы}$$

$$\Gamma = \frac{H}{h}, \quad \Gamma = \frac{f}{d} \quad - \text{ увеличение линзы}$$

$$\Delta r = k\lambda, \quad \Delta r = 2k\frac{\lambda}{2} \quad - \text{ условие максимума интерференции}$$

$$\Delta r = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad \Delta r = (2k + 1)\frac{\lambda}{2} \quad - \text{ условие минимума интерференции}$$

$$\Delta = n \cdot \Delta r \quad - \text{ оптическая разность хода}$$

$$\mathbf{d} = \mathbf{a} + \mathbf{b}, \quad d = \frac{l}{N} \quad - \text{ период решетки}$$

$$d \sin \varphi = k\lambda \quad - \text{ формула дифракционной решетки}$$

4. ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Специальная теория относительности (СТО) — физическая теория, рассматривающая пространственно-временные свойства физических процессов. Закономерности СТО проявляются при больших (сравнимых со скоростью света) скоростях. Законы классической механики в этом случае не работают. Причина этого заключается в том, что передача взаимодействий происходит не мгновенно, а с конечной скоростью (скоростью света).

Классическая механика является частным случаем СТО при небольших скоростях. Явления, описываемые СТО и противоречащие законам классической физики, называют *релятивистскими*. Согласно СТО одновременность событий, расстояния и промежутки времени являются относительными.

В любых инерциальных системах отсчета при одинаковых условиях все механические явления протекают одинаково (принцип относительности Галилея). В классической механике измерение времени и расстояний в двух системах отсчета и сравнение этих величин считаются очевидными. В СТО это не так.

События являются *одновременными*, если они происходят при одинаковых показаниях синхронизированных часов. Два события, одновременные в одной инерциальной системе отсчета, не являются одновременными в другой инерциальной системе отсчета.

4.1. ИНВАРИАНТНОСТЬ СКОРОСТИ СВЕТА. ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ЭЙНШТЕЙНА

В 1905 г. Эйнштейн создал специальную теорию относительности (СТО). В основе его **теории относительности** лежат два постулата:

- Любые физические явления во всех инерциальных системах отсчета при одинаковых условиях протекают одинаково (принцип относительности Эйнштейна).
- Скорость света в вакууме во всех инерциальных системах отсчета одинакова и не зависит от скорости источника и приемника света (принцип постоянства скорости света).

Первый постулат распространяет принцип относительности на все явления, включая электромагнитные. Проблема применимости принципа относительности возникла с открытием электромагнитных волн и электромагнитной природы света. Постоянство скорости света приводит к несоответствию с законом сложения скоростей классической механики. По мысли Эйнштейна, изменения характера взаимодействия при смене системы отсчета не должно происходить. Первый постулат Эйнштейна непосредственно вытекает из опыта Майкельсона—Морли, доказавшего отсутствие в природе абсолютной системы отсчета. В этом опыте измерялась скорость света в зависимости от скорости движения приемника света. Из результатов этого опыта следует и второй постулат Эйнштейна о постоянстве скорости света в вакууме, который вступает в противоречие с первым постулатом, если распространить на электромагнитные явления не только сам принцип относительности Галилея, но и правило сложения скоростей. Следовательно, преобразования Галилея для координат и времени, а также его правило сложения скоростей к электромагнитным явлениям неприменимы.

Следствия из постулатов СТО

Если проводить сравнение расстояний и показаний часов в разных системах отсчета с помощью световых сигналов, то можно показать, что расстояние между двумя точками и длительность интервала времени между двумя событиями зависят от выбора системы отсчета.

Относительность расстояний:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

где l_0 — длина тела в системе отсчета, относительно которой тело покоится, l — длина тела в системе отсчета, относительно которой тело движется, v — скорость тела.

Это означает, что линейный размер движущегося относительно инерциальной системы отсчета уменьшается в направлении движения.

Относительность промежутков времени:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где τ_0 — промежуток времени между двумя событиями, происходящими в одной точке инерциальной системы отсчета, τ — промежуток времени между этими же событиями в движущейся со скоростью v системе отсчета.

Это означает, что часы, движущиеся относительно инерциальной системы отсчета, идут медленнее неподвижных часов и показывают меньший промежуток времени между событиями (замедление времени).

Закон сложения скоростей в СТО записывается так:

$$v = \frac{v' + u}{1 - \frac{v'u}{c^2}},$$

где v — скорость тела относительно неподвижной системы отсчета, v' — скорость тела относительно подвижной системы отсчета, u — скорость подвижной системы отсчета относительно неподвижной, c — скорость света.

При скоростях движения, много меньших скорости света, релятивистский закон сложения скоростей переходит в классический, а длина тела и интервал времени становятся одинаковыми в неподвижной и движущейся системах отсчета (принцип соответствия).

Для описания процессов в микромире классический закон сложения неприменим, а релятивистский закон сложения скоростей работает.

4.2. ПОЛНАЯ ЭНЕРГИЯ

Полная энергия E тела в состоянии движения называется релятивистской энергией тела:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Полная энергия, масса и импульс тела связаны друг с другом — они не могут меняться независимо.

Закон пропорциональности массы и энергии — один из самых важных выводов СТО. Масса и энергия являются различными свойствами материи. Масса тела характеризует его инертность, а также способность тела вступать в гравитационное взаимодействие с другими телами.

Важно!

Важнейшим свойством энергии является ее способность превращаться из одной формы в другую в эквивалентных количествах при различных физических процессах — в этом заключается содержание закона сохранения энергии. Пропорциональность массы и энергии является выражением внутренней сущности материи.

4.3. ЭНЕРГИЯ ПОКОЯ

Наименьшей энергией E_0 тело обладает в системе отсчета, относительно которой оно покоится. Эта энергия называется *энергией покоя*:

$$E_0 = mc^2.$$

Энергия покоя является внутренней энергией тела.

В СТО масса системы взаимодействующих тел не равна сумме масс тел, входящих в систему. Разность суммы масс свободных тел и массы системы взаимодействующих тел называется *дефектом масс* — Δm . Дефект масс положителен, если тела притягиваются друг к другу. Изменение собственной энергии системы, т. е. при любых взаимодействиях этих тел внутри нее, равно произведению дефекта масс на квадрат скорости света в вакууме:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2.$$

Экспериментальное подтверждение связи массы с энергией было получено при сравнении энергии, высвобождающейся при радиоактивном распаде, с разностью масс исходного ядра и конечных продуктов.

Это утверждение имеет разнообразные практические применения, включая использование ядерной энергии. Если масса частицы или системы частиц уменьшилась на Δm , то при этом должна выделиться энергия $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$.

Кинетическая энергия тела (частицы) равна:

$$E_k = E - E_0.$$

Важно!

В классической механике энергия покоя равна нулю.

4.4. РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ИМПУЛЬС

Релятивистским импульсом тела называется физическая величина, равная:

$$\vec{p} = \frac{E \cdot \vec{v}}{c^2},$$

где E — релятивистская энергия тела.

Для тела массой m можно использовать формулу:

$$\vec{p} = \frac{m \cdot \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

В экспериментах по исследованию взаимодействий элементарных частиц, движущихся со скоростями, близкими к скорости света, подтвердилось предсказание теории относительности о сохранении релятивистского импульса при любых взаимодействиях.

Важно!

Закон сохранения релятивистского импульса является фундаментальным законом природы.

Классический закон сохранения импульса является частным случаем универсального закона сохранения релятивистского импульса.

Полная энергия E релятивистской частицы, энергия покоя E_0 и импульс p связаны соотношением:

$$E^2 = p^2 c^2 + E_0^2.$$

Из него следует, что для частиц с массой покоя, равной нулю, $E_0 = 0$ и $E = pc$.

**Основные формулы раздела
«Основы специальной теории относительности»**

$$v = \frac{v' + u}{1 - \frac{v'u}{c^2}} \quad \text{— закон сложения скоростей}$$

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \text{— длина тела}$$

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{— промежуток времени}$$

$$E_0 = mc^2 \quad \text{— энергия покоя}$$

$$\left. \begin{aligned} E &= \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ E^2 &= p^2 c^2 + E_0^2 \end{aligned} \right\} \quad \text{— полная энергия}$$

$$\vec{p} = \frac{E \cdot \vec{v}}{c^2} \quad \text{— релятивистский импульс}$$

$$E_k = E - E_0 \quad \text{— кинетическая энергия}$$

5. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

- ◆ **Квантовая физика** — раздел физики, в котором изучаются квантово-механические и квантово-полевые системы и законы их движения.
- ◆ **Тепловое излучение** — электромагнитное излучение, возникающее за счет внутренней энергии тела и зависящее только от температуры и оптических свойств этого тела.

В случае, если излучение находится в термодинамическом равновесии с веществом, то такое излучение называется **равновесным**.

Спектр такого излучения эквивалентен спектру абсолютно черного тела. Однако в общем случае тепловое излучение не находится в термодинамическом равновесии с веществом, таким образом, более горячее тело остывает, а более холодное, наоборот, нагревается.

Основные характеристики теплового излучения:

- $\Phi_s = \frac{W}{t}$ — поток излучения — отношение энергии излучения ко времени, за которое это излучение произошло;
 - $R_s = \frac{\Phi_s}{S}$ — энергетическая светимость тела — отношение потока излучения, испускаемого телом, к площади поверхности излучателя;
 - $\alpha_\lambda = \frac{\Phi'_{\lambda}}{\Phi_{\lambda}}$ — коэффициент поглощения — величина, равная отношению потока излучения, поглощенного данным телом, к потоку излучения, падающего на это тело.
- ◆ **Абсолютно черное тело** — это физическая абстракция (модель), под которой понимают тело, полностью поглощающее все падающее на него электромагнитное излучение произвольной длины волны $\alpha_\lambda = 1$.
 - ◆ **Серое тело** — это такое тело, коэффициент поглощения которого не зависит от частоты, а зависит только от температуры $\alpha_\lambda < 1$.
 - ◆ **Абсолютно белое тело** — тело, поглощающая способность которого равна нулю $\alpha_\lambda = 0$.

Основные законы теплового излучения

- **Закон Стефана–Больцмана:**
мощность излучения абсолютно черного тела прямо пропорциональна четвертой степени термодинамической температуры тела:

$$R_s = \sigma T^4,$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)}$ — постоянная Стефана–Больцмана.

- **Закон смещения Вина:**

длина волны, соответствующая максимальному значению энергетической светимости абсолютно черного тела, обратно пропорциональна его термодинамической температуре:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T},$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ — постоянная Вина.

- **Закон излучения Кирхгофа:**

отношение излучательной способности любого тела к его поглощательной способности одинаково для всех тел при данной температуре для данной частоты и не зависит от их формы и химического состава:

$$r'_\nu = \frac{r_\nu}{\alpha_\nu}.$$

5.1. КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

Для объяснения световых явлений некоторые ученые во главе с И. Ньютоном считали, что свет — это поток частиц (корпускул). Другие ученые во главе с Гюйгенсом считали, что свет — это волна.

Луи де Бройль впервые выдвинул идею о том, что свет имеет двойственную природу.

Свет, как поток частиц (корпускул), проявляет себя при поглощении и излучении атомов, в других явлениях (интерференция, дифракция, поляризация, дисперсия) свет ведет себя как волна.

5.1.1. Гипотеза М. Планка о квантах

М. Планк выдвинул гипотезу о квантах:

энергия испускается телом не непрерывно, а отдельными порциями — квантами, энергия которых пропорциональна частоте колебаний.

$$\varepsilon = h\nu,$$

где h — постоянная Планка, $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.

Свет, как и любое другое электромагнитное излучение, представляет собой поток фотонов с энергией ϵ .

5.1.2. Фотоэффект

Фотоэффект был открыт в 1887 году Г. Герцем.

В опытах с электроискровыми вибраторами Герц установил, что заряженный проводник, освещенный ультрафиолетовыми лучами, быстро теряет свой заряд, а электрическая искра возникает в искровом промежутке при меньшей разности потенциалов.

◆ **Фотоэффект** — это явление взаимодействия света с веществом, в результате которого энергия фотонов передается электронам вещества.

Различают внутренний и внешний фотоэффект.

◆ **Внутренний фотоэффект** — изменение концентрации носителей заряда в веществе.

◆ **Внешний фотоэффект** — явление вырывания электронов с поверхности вещества под действием падающего на него света.

5.1.3. Опыты А. Г. Столетова

В 1888 году А. Г. Столетов впервые систематически исследовал фотоэффект. Он выяснил, от чего зависит число вырванных светом с поверхности вещества электронов (фотоэлектронов) и чем определяется их скорость или кинетическая энергия. Он исследовал вещества различной природы и установил, что наиболее восприимчивы к свету металлы: никель, медь, цинк, алюминий, серебро. Для облучения электродов он использовал свет различных длин волн: красный, зеленый, синий, ультрафиолетовый.

Для исследования фотоэффекта он собрал следующую установку: в стеклянный баллон, из которого выкачан воздух, помещаются два электрода.

Внутри баллона на один из электродов поступает свет через кварцевое «окошко», прозрачное для ультрафиолетового излучения.

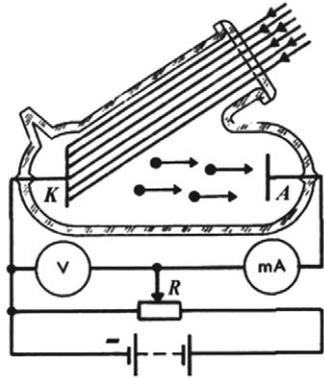
На электроды подается напряжение, которое можно менять с помощью потенциометра R и измерять вольтметром V .

К освещаемому электроду (катоде K) присоединяют отрицательный полюс батареи. Под действием света этот электрод испускает электро-

ны, которые при движении в электрическом поле образуют электрический ток.

Облучая катод светом различных длин волн, Столетов установил закономерности (законы) фотоэффекта, не утратившие своего значения до нашего времени.

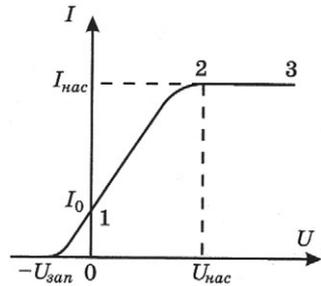
При малых напряжениях не все вырванные светом электроны достигают другого электрода (анод А). Если, не меняя интенсивности излучения, увеличивать разность потенциалов между электродами, то сила тока также увеличивается. При некотором напряжении она достигает максимального значения, после чего перестает изменяться.



Вольт-амперная характеристика (зависимость силы фототока от напряжения)

Из графика видно:

- 1) сила фототока отлична от нуля и при отсутствии напряжения. Это означает, что часть вырванных светом электронов достигает анода и при отсутствии напряжения, т. е. фотоэлектроны при вылете обладают кинетической энергией;



- 2) при некотором значении напряжения $U_{нас}$ между электродами сила фототока перестает зависеть от напряжения и не изменяется при увеличении напряжения. Максимальное значение силы тока $I_{нас}$ называется током насыщения. При фототоке насыщения все электроны, покинувшие за 1 с поверхность металла, за это же время попадают на анод. Поэтому по силе фототока насыщения можно судить о числе фотоэлектронов, вылетающих с катода в единицу времени:

$$I_{нас} = \frac{q_{max}}{t} = \frac{n \cdot e}{t},$$

где q_{max} — максимальный заряд, переносимый фотоэлектронами;
 n — число фотоэлектронов, вылетающих с поверхности освещаемого металла; e — заряд электрона;

- 3) если катод соединить с положительным полюсом источника тока, а анод — с отрицательным, то в электростатическом поле между

электродами фотоэлектроны будут тормозиться, а сила фототока уменьшаться при увеличении значения этого отрицательного напряжения. При некотором значении отрицательного напряжения $U_{\text{зап}}$ (его называют запирающим или задерживающим напряжением) фототок прекращается. Это значит, что электрическое поле тормозит вырванные электроны до полной остановки, а затем возвращает их на электрод.

Согласно теореме о кинетической энергии работа задерживающего электрического поля равна изменению кинетической энергии фотоэлектронов:

$$eU_{\text{зап}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}.$$

Законы внешнего фотоэффекта

- **Закон Столетова:**

количество электронов, выбиваемых светом с поверхности металла за 1 с, прямо пропорционально интенсивности света и не зависит от частоты падающего света.

- Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего излучения, а определяется только его частотой.

- Для каждого вещества существует «красная граница» фотоэффекта, т. е. минимальная частота света, ниже которой фотоэффект невозможен.

◆ **«Красная граница» фотоэффекта** — наименьшая частота (наибольшая длина волны), при которой начинается фотоэффект:

$$\nu_{\text{кр}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}, \quad \lambda_{\text{кр}} = \frac{hc}{A_{\text{вых}}}.$$

С уменьшением частоты падающего света (увеличением длины волны) энергия падающих квантов при некоторой частоте (длине волны) может стать равной работе выхода электрона из металла.

«Красная граница» фотоэффекта зависит только от работы выхода электрона из вещества.

Фотоэффект практически безынерционен. Он наступает через 10^{-9} с от момента освещения катода.

5.1.4. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

Теоретическое обоснование законов фотоэффекта было дано А. Эйнштейном.

При падении на металл энергия фотона расходуется на совершение работы выхода электрона из металла и на сообщение ему кинетической энергии:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}, \quad \frac{hc}{\lambda} = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}.$$

Если частота световой волны меньше «красной границы» фотоэффекта, то энергии фотона не хватит для того, чтобы вырвать электрон с поверхности металла. Фотоэффект наблюдаться не будет:

$$h\nu_{\text{кр}} < A_{\text{вых}}.$$

Если частота световой волны равна «красной границе» фотоэффекта, то энергии фотона хватит для того, чтобы вырвать электрон с поверхности металла, но не хватит для того, чтобы сообщить электрону кинетическую энергию. Фотоэффект наблюдаться не будет:

$$h\nu_{\text{кр}} = A_{\text{вых}}.$$

Если частота световой волны больше «красной границы» фотоэффекта, то энергии фотона хватит для того, чтобы вырвать электрон с поверхности металла и сообщить ему кинетическую энергию. Фотоэффект будет наблюдаться:

$$h\nu_{\text{кр}} > A_{\text{вых}}.$$

5.1.5. Фотоны

Электромагнитное излучение имеет квантовый характер, т. е. излучается и поглощается веществом в виде отдельных частиц электромагнитного поля — **фотонов**.

Основные свойства фотона:

- является частицей электромагнитного поля;
- движется со скоростью света;
- существует только в движении;
- масса покоя равна нулю;
- заряд равен нулю.

Равенство нулю массы фотона означает невозможность его нахождения в покоем состоянии. Фотон всегда движется, причем только со скоростью света.

Масса фотона:

согласно теории относительности $E = mc^2$, $E = h\nu$,

$$mc^2 = h\nu \Rightarrow m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}.$$

5.1.6. Энергия фотона

Энергия фотона:

$$E = h\nu, \quad E = \frac{hc}{\lambda}.$$

5.1.7. Импульс фотона

Импульс фотона:

$$p = \frac{h\nu}{c}, \quad p = \frac{h}{\lambda}.$$

Давление света

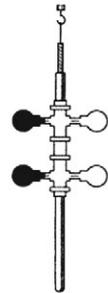
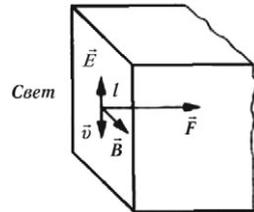
Максвелл на основе электромагнитной теории света предсказал, что свет должен оказывать давление на препятствия.

Под действием электрического поля волны, падающей на поверхность тела, например металла, свободный электрон движется в сторону, противоположную вектору \vec{E} .

На движущийся электрон действует сила Лоренца, направленная в сторону распространения волны. Суммарная сила, действующая на электроны поверхности металла, и определяет силу светового давления.

Для доказательства справедливости теории Максвелла было важно измерить давление света. Многие ученые пытались это сделать, но безуспешно, так как световое давление очень мало. В яркий солнечный день на поверхности площадью 1 м^2 действует сила, равная всего лишь $4 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$.

Впервые давление света измерил русский физик Петр Николаевич Лебедев в 1900 г. Прибор Лебедева состоял из очень легкого стерженька на тонкой стеклянной нити, по краям которого были приклеены легкие крылышки. Весь прибор помещался в сосуд, откуда был выкачан воздух. Свет падал на крылышки, расположенные по одну сторону от стерженька. О значении давления можно было судить по углу закручивания нити. Трудность точного измерения давления света была связана с невозможностью создать вакуум (движение молекул воздуха, вызванное неодинаковым нагревом крылышек и стенок сосуда, приводит к возникновению дополнительных вращающих моментов). На закручивание нити влияет и неодинаковый нагрев сторон крылышек (сторона, обращенная к источнику света, нагревается сильнее, чем противоположная сторона).



Молекулы, отражающиеся от более нагретой стороны, передают крылышку больший импульс, чем молекулы, отражающиеся от менее нагретой стороны.

Лебедев сумел преодолеть все эти трудности, взяв очень большой сосуд и очень тонкие крылышки. Полученное значение совпало с предсказанным Максвеллом. Впоследствии после трех лет работы Лебедеву удалось осуществить еще более тонкий эксперимент: измерить давление света на газы.

Появление квантовой теории света позволило более просто объяснить причину светового давления. Фотоны, подобно частицам вещества, имеющим массу покоя, обладают импульсом. При поглощении их телом они передают ему свой импульс. Согласно закону сохранения импульса импульс тела становится равным импульсу поглощенных фотонов. Поэтому покоящееся тело приходит в движение. Изменение импульса тела означает, согласно второму закону Ньютона, что на тело действует сила.

Важно!

Опыты Лебедева можно рассматривать как экспериментальное доказательство того, что фотоны обладают импульсом.

Хотя световое давление очень мало в обычных условиях, оно является существенным в недрах звезд. При температуре в несколько десятков миллионов Кельвинов давление электромагнитного излучения достигает громадных значений и совместно с гравитационными силами обеспечивает стабильное состояние звезд.

Давление света, согласно электродинамике Максвелла, возникает из-за действия силы Лоренца на электроны среды, колеблющиеся под действием электрического поля электромагнитной волны. С точки зрения квантовой теории давление появляется в результате передачи телу импульсов фотонов при их поглощении:

$$p = \frac{N h \nu}{c} (1 + \rho),$$

где ρ — коэффициент отражения, N — количество всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени.

5.1.8. Гипотеза де Бройля о волновых свойствах частиц. Корпускулярно-волновой дуализм

Корпускулярно-волновой дуализм:

- корпускулярная теория Ньютона (1675);
- волновая теория Гюйгенса (1678).

Согласно корпускулярной теории Ньютона светящиеся тела испускают мельчайшие частицы — корпускулы, которые летят прямолинейно по всем направлениям. Доказательством корпускулярной теории являются фотоэффект, излучение черного тела.

Согласно волновой теории Гюйгенса светящиеся тела вызывают в окружающей среде упругие колебания, которые распространяются в эфире подобно звуковым волнам в воздухе. Доказательством волновой теории Гюйгенса являются интерференция, дифракция, поляризация света.

Однако это не означает, что свет излучается как поток частиц, затем превращается в волну и распространяется волной, а при поглощении опять превращается в поток частиц — фотонов. Свет одновременно обладает и волновыми, и корпускулярными свойствами. Такое сочетание свойств обозначается термином **корпускулярно-волновой дуализм**.

Корпускулярными характеристиками света являются энергия и импульс, волновыми — частота или длина волны.

Уравнения, связывающие корпускулярные и волновые характеристики света:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= h\nu, \quad \varepsilon = \frac{hc}{\lambda}, \\ p &= mc, \quad \varepsilon = mc^2, \\ p &= \frac{mc^2}{c} = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h\nu}{c}, \quad \nu = \frac{c}{\lambda}, \quad p = \frac{hc}{\lambda c} = \frac{h}{\lambda}. \end{aligned}$$

Гипотеза де Бройля

После того как представления о двойственных свойствах света подтвердились, было высказано предположение о том, что корпускулярно-волновая двойственность свойств характерна не только для фотонов, но и для частиц вещества — электронов, протонов, нейтронов, а также атомов, молекул и атомных ядер — т. е. движение любых частиц, имеющих энергию ε и импульс p , можно рассматривать с помощью теории волн. При этом движущаяся частица представляется как волна с частотой:

$$\nu = \frac{\varepsilon}{h} \text{ и длиной волны } \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}.$$

Позже эти волны получили название **волн де Бройля** в честь французского ученого Луи де Бройля, высказавшего это предположение.

Корпускулярно-волновая двойственность света характерна для электромагнитного поля и имеет универсальный характер.

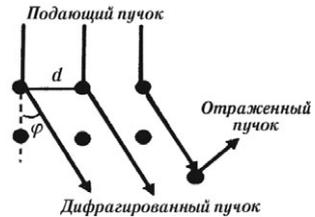
5.1.9. Дифракция электронов

Дифракция электронов является опытным доказательством гипотезы де Бройля о волновых свойствах частиц.

Опыт К. Дэвиссона и Л. Джермера (1927)

Общим условием дифракции является соизмеримость длины падающей волны с расстоянием между рассеивающими центрами: $\lambda \approx d$.

В качестве дифракционной решетки использовалась кристаллическая решетка никеля, расстояние между атомами которого $d \approx 2 \cdot 10^{-10}$ м. Пучок ускоренных электрическим полем электронов с длиной волны $\lambda \approx 10^{-10}$ м направлялся под углом φ на поверхность кристалла никеля. Полученная дифракционная картина явилась доказательством наличия у электронов волновых свойств.



Основные формулы по теме

«Корпускулярно-волновой дуализм»

- $\varepsilon = h\nu$ — энергия кванта
- $I_{нас} = \frac{q_{max}}{t} = \frac{n \cdot e}{t}$ — ток насыщения
- $eU_{зап} = \frac{mv_{max}^2}{2}$ — работа задерживающего поля
- $\nu_{кр} = \frac{A_{вых}}{h}, \lambda_{кр} = \frac{hc}{A_{вых}}$ — «красная граница» фотоэффекта
- $h\nu = A_{вых} + \frac{mv_{max}^2}{2}$ — уравнение Эйнштейна для фотоэффекта
- $m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$ — масса фотона
- $E = h\nu, E = \frac{hc}{\lambda}$ — энергия фотона
- $p = \frac{h\nu}{c}, p = \frac{h}{\lambda}$ — импульс фотона

5.2. ФИЗИКА АТОМА

Для изучения атома и атомного ядра используются специальные *методы наблюдения и регистрации элементарных частиц*.

Принцип действия приборов для регистрации элементарных частиц

В основе методов обнаружения и изучения характеристик частиц — ионизирующее и фотохимическое действия частиц, отклонение частиц в магнитном поле. Регистрирующий прибор — это сложная макроскопическая система, которая находится в неустойчивом состоянии. При движении частицы в ней начинается процесс перехода в устойчивое состояние. Этот процесс позволяет регистрировать частицу.

Выбор регистрирующего устройства определяется целью эксперимента и условиями его проведения.

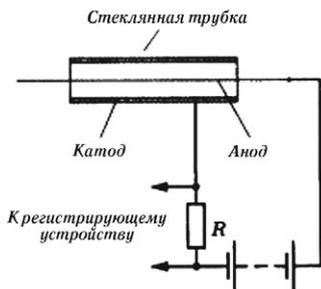
Метод сцинтилляций (сцинтилляционные счетчики частиц). В основе метода — способность частиц вызывать вспышки на экране, покрытом слоем специального вещества. Этот метод дает возможность счета частиц и позволяет фиксировать их распределение по энергиям.

Газоразрядный счетчик Гейгера

Счетчик Гейгера применяется для регистрации электронов и γ -квантов.

Счетчик состоит из стеклянной трубки, покрытой изнутри металлическим слоем (катод), и тонкой металлической нити, идущей вдоль оси трубки (анод). Трубка заполняется инертным газом, аргоном. Действие счетчика основано на ударной ионизации. Заряженная частица, влетая в счетчик, ионизирует молекулы газа, создавая положительные ионы и электроны. Электрическое поле между анодом и катодом ускоряет электроны до энергий, при которых начинается ударная ионизация. Скорость электронов, движущихся к аноду, возрастает, и они, взаимодействуя с молекулами газа, создают лавину ионов. Ток через счетчик резко возрастает. На нагрузочном резисторе R образуется импульс напряжения, который подается в регистрирующее устройство.

Для того чтобы счетчик мог регистрировать частицу, лавинный разряд необходимо погасить. Это происходит автоматически: в момент появления импульса тока падение напряжения на нагрузочном резисторе R велико, напряжение между анодом и катодом резко уменьшается, и разряд прекращается.

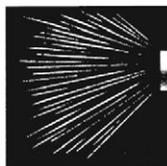
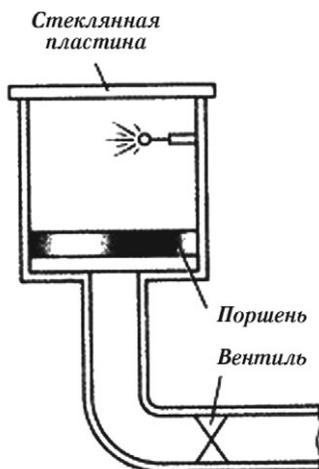


Камера Вильсона

Принцип действия камеры Вильсона основан на конденсации перенасыщенного пара на ионах с образованием капелек жидкости. Эти ионы создает вдоль своей траектории движущаяся заряженная частица. Видимый след из капелек жидкости, который оставляет заряженная частица, называется *трек*.

Камера Вильсона представляет собой герметически закрытый сосуд, заполненный парами воды или спирта, близкими к насыщению. При резком опускании поршня, вызванном уменьшением давления под ним, пар в камере адиабатно расширяется, охлаждается и становится перенасыщенным. Это — неустойчивое состояние пара: он легко конденсируется, если в сосуде появляются центры конденсации. Центрами конденсации становятся ионы, которые образует в рабочем пространстве камеры пролетевшая частица.

Затем камера возвращается в исходное состояние, и ионы удаляются электрическим полем. Если поместить камеру Вильсона в однородное магнитное поле, то в результате действия силы Лоренца треки частиц искривляются. Это позволяет определить удельный заряд частицы (по радиусу кривизны трека и скорости частицы). Если удельный заряд частицы известен, то по радиусу кривизны трека можно определить энергию и скорость частицы.



Пузырьковая камера

В 1952 г. американский ученый Д. Глейзер предложил использовать для обнаружения треков частиц перегретую жидкость. В такой жидкости на ионах (центрах парообразования), образующихся при движении быстрой заряженной частицы, появляются пузырьки пара, дающие видимый трек. Это устройство получило название «пузырьковая камера».

В исходном состоянии жидкость в камере находится под высоким давлением при температуре выше температуры кипения при атмосферном давлении. При резком понижении давления жидкость оказывается

перегретой и будет находиться в неустойчивом состоянии. Заряженные частицы, пролетающие в это время, вызывают появление треков, состоящих из пузырьков пара. В качестве жидкости используются жидкий водород и пропан.

Преимущество пузырьковой камеры перед камерой Вильсона — большая плотность рабочего вещества. Пробеги частиц вследствие этого оказываются достаточно короткими. Это позволяет регистрировать частицы с большой энергией и наблюдать серию последовательных превращений частицы и вызываемые ею реакции.

Метод толстослойных фотоэмульсий основан на фотохимическом действии быстрых заряженных частиц, проходящих через фотоэмульсию. Толщина слоя фотоэмульсии составляет от 0,5 до 1 мм. Быстрая заряженная частица ионизирует атомы фотоэмульсии и оставляет скрытое изображение. После обработки это изображение становится видимым и может изучаться.

5.2.1. Планетарная модель атома

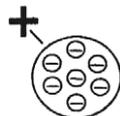
Английский ученый Томсон в 1903 году предложил первую модель атома.

Положительный заряд атома занимает весь объем атома и распределен в этом атоме с постоянной плотностью, а внутри него находятся электроны.

Модель атома Томсона сравнивают с «булочкой с изюмом», в которой роль изюминок играют электроны.

Атом водорода, согласно этой модели, представляет собой положительно заряженный шар радиусом 10^{-8} м, внутри которого находится электрон. У более сложных атомов внутри положительно заряженного шара находятся несколько электронов.

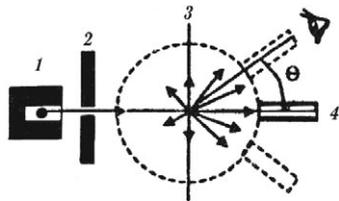
Модель атома Томсона не получила экспериментального подтверждения.



Опыт Резерфорда по рассеянию α -частиц

В начале XX века английский ученый Э. Резерфорд исследовал прохождение узкого пучка α -частиц через золотую фольгу толщиной около $4 \cdot 10^{-7}$ м.

Для изучения строения атома Резерфорд предложил зондирование атома с помощью α -частиц, которые испускались радиоактивным элементом 1, помещенным внутри свинцового цилиндра, погло-

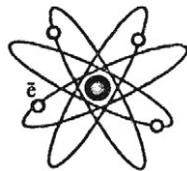


шающего все α -частицы, кроме тех, которые проходили через узкий канал 2. Узкий пучок α -частиц попадал на фольгу из золота 3. Рассеянные после взаимодействия с золотом α -частицы регистрировались визуальным с помощью светочувствительного экрана и микроскопа 4.

В результате опыта было обнаружено, что, хотя большая часть α -частиц проходила сквозь тонкий слой вещества, почти не отклоняясь от первоначального направления, очень небольшая доля этих частиц отклонялась на большие углы. Это возможно только под действием большой кулоновской силы, которая является результатом лобового столкновения положительно заряженной α -частицы с положительным зарядом в атоме. Размеры этого заряда очень малы. Резерфорд назвал его «ядро атома» и в 1911 году предложил планетарную модель атома.

Планетарная модель атома

Резерфорд предположил, что атом представляет собой миниатюрную планетарную систему, в которой действуют электрические силы притяжения. В центре каждого атома находится положительно заряженное ядро. Вокруг ядра по эллиптическим орбитам вращаются отрицательно заряженные электроны.



В ядре сосредоточена практически вся масса атома, но оно занимает ничтожно малую часть его объема. Электронная оболочка занимает большую часть объема атома, но ее масса мала.

В целом атом нейтрален, т. к. суммарный отрицательный заряд электронов равен положительному заряду атомного ядра.

Планетарная модель атома Резерфорда не смогла объяснить ряд важнейших свойств атомов. В частности, атом, согласно классической механике, должен излучать электромагнитные волны, т. к. электроны движутся с ускорением (центростремительным). Это должно приводить к уменьшению энергии атома, а следовательно, к падению электрона на ядро. Однако атомы обычно не излучают электромагнитные волны и устойчивы.

5.2.2. Постулаты Бора

Датский ученый Н. Бор, развивая идеи Резерфорда, в 1913 году утверждал, что законы движения микрочастиц сильно отличаются от законов движения в макромире. По его мнению, законы микромира — квантовые законы, которые в то время еще не были установлены наукой. Н. Бор положил в основу своей теории следующие постулаты.

Постулаты Бора

Постулат стационарных состояний:

атом может находиться лишь в определенных стационарных состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия. В стационарных состояниях атом не излучает энергию.

Условие квантования круговых орбит:

каждому стационарному состоянию соответствует строго определенная энергия. Двигаясь по круговым орбитам, электроны обладают квантованными значениями момента импульса:

$$mvr = \frac{n\hbar}{2\pi},$$

где $n = 1; 2; 3...$ — номер стационарной орбиты, r — радиус стационарной орбиты, \hbar — постоянная Планка.

Правило частот:

излучение или поглощение энергии атомом происходит при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое. Энергия излученного или поглощенного кванта электромагнитного излучения при переходе атома из одного стационарного состояния с энергией E_m в другое стационарное состояние с энергией E_n равна разности энергий атома в этих состояниях:

$$h\nu = E_m - E_n,$$

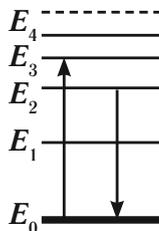
где m и n — номера стационарных состояний.

Говорят, что энергия атома квантуется, а при переходе с одной стационарной орбиты на другую атом теряет или поглощает квант энергии. Поэтому теория атома Бора была названа квантовой теорией.

Стационарное состояние с минимальным запасом энергии называется **основным состоянием**, а все остальные стационарные состояния называются **возбужденными состояниями**.

Стационарные состояния представляют с помощью энергетической диаграммы. На ней состояния атома обозначаются горизонтальными линиями — энергетическими уровнями.

Переход атома из стационарного состояния с меньшей энергией в состояние с большей энергией сопровождается поглощением энергии и обозначается стрелкой, направленной вверх. Переход атома из стационарного состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией сопровождается выделением энергии и обозначается стрелкой, направленной вниз.



Используя постулаты и планетарную модель атома, Бор разработал количественную теорию атома водорода.

Применяя классические представления о движении электрона по круговой орбите под действием кулоновской силы притяжения между ядром и электроном, он получил выражение для радиусов орбит, соответствующих стационарным состояниям атома водорода, и для энергетических уровней.

При движении по круговой орбите кулоновская сила обеспечивает электрону *центростремительное ускорение*:

$$\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{mv^2}{r}.$$

Для водорода $Z = 1$; $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = mv^2$ или $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 v} = mvr$, $mvr = \frac{nh}{2\pi}$.

Скорость электрона на стационарных круговых орбитах:

$$v = \frac{e^2}{2\epsilon_0 nh},$$

где $n = 1; 2; 3 \dots$ — номер стационарной круговой орбиты,

$$v = \frac{e^2}{2\epsilon_0 nh} \quad \text{и} \quad v = \frac{nh}{2\pi \cdot mr}.$$

Радиус стационарных круговых орбит:

$$r = \frac{\epsilon_0 n^2 h^2}{\pi \cdot me^2}.$$

Радиус первой боровской орбиты: $r_1 = 0,528 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

Двигаясь по каждой из разрешенных стационарных круговых орбит, электрон обладает определенным запасом *кинетической и потенциальной энергий*:

$$E_{\text{кин}} = \frac{me^4}{8n^2 \epsilon_0^2 h^2}, \quad E_{\text{пот}} = -\frac{me^4}{4n^2 \epsilon_0^2 h^2}.$$

Полная энергия электрона на стационарной орбите равна сумме кинетической и потенциальной энергий:

$$E_{\text{пол}} = -\frac{me^4}{8n^2 \epsilon_0^2 h^2}.$$

Согласно постулату Бора энергия излучения: $h\nu = E_m - E_n$,

$$\nu = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right).$$

$$R = \frac{m e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^3} = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1} \text{ — постоянная Ридберга,}$$

$$\nu = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right).$$

Серии спектральных линий излучения, возникающих при переходе атома водорода из возбужденных состояний, принято объединять в группы.

Спектральные серии атома водорода

• Серия Лаймана

Если атом водорода перейдет с возбужденных стационарных уровней в основное состояние, то он излучит невидимые ультрафиолетовые лучи с набором соответствующих частот:

$$\nu = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{m^2} \right), \text{ где } m = 2; 3; 4 \dots$$

• Серия Бальмера

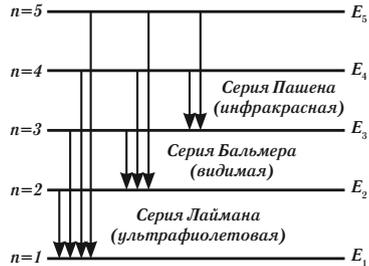
Если атом водорода перейдет с возбужденных стационарных уровней на второй уровень, то он излучит видимый свет с набором соответствующих частот:

$$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right), \text{ где } m = 3; 4; 5 \dots$$

• Серия Пашена

Если атом водорода перейдет с возбужденных стационарных уровней на третий уровень, то он излучит невидимые инфракрасные лучи с набором соответствующих частот:

$$\nu = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{m^2} \right), \text{ где } m = 4; 5; 6 \dots$$



5.2.3. Линейчатые спектры

Спектр — это набор частот, излучаемых нагретым телом.

Виды спектров

- *Непрерывные (сплошные) спектры* дают нагретые тела в твердом и жидком состоянии, а также в сжатом газообразном.

- *Линейчатые спектры* дают раскаленные газы в атомарном состоянии под сравнительно небольшим давлением.
- *Полосатые спектры* дают газы в молекулярном состоянии.

Различают линейчатые спектры испускания и поглощения.

Спектры испускания дают нагретые до высокой температуры тела. Эти спектры состоят из узких линий разного цвета.

Для получения линейчатого спектра излучения вещества, находящегося в обычных условиях в твердом состоянии, его надо нагреть до высокой температуры, при которой оно перейдет в атомарное газообразное состояние.

Спектры поглощения возникают при пропускании лучей сплошного спектра через менее нагретый газ. На фоне сплошного спектра обнаруживаются узкие темные полосы.

Линейчатый спектр у каждого химического элемента свой, не совпадающий со спектром другого химического элемента.

Зная линейчатые спектры различных химических элементов, можно определить химический состав неизвестного газа. Для этого необходимо сравнить линейчатый спектр данного газа со спектрами известных элементов.

По рисунку видно, что газ состоит из магния и азота, т. к. в его спектре присутствуют только линии, принадлежащие этим газам.

Линии спектра поглощения расположены в тех местах спектра, в которых находятся линии спектра излучения того же газа.

Спектральный анализ — метод определения химического состава тел по их спектру испускания или поглощения.

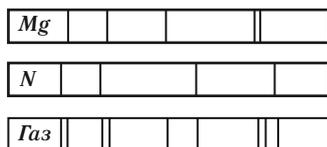
Спектральный анализ основывается на двух положениях:

- каждый химический элемент или химическое соединение характеризуется определенным спектром;
- интенсивность линий и полос в спектре зависит от концентрации того или иного элемента в веществе.

Спектроскоп — прибор для разложения сложного света и наблюдения спектров.

Спектроскоп состоит из двух труб — коллиматорной (1) и зрительной (4), укрепленных на подставке (2), и стеклянной призмы под крышкой (3).

Параллельный пучок света, выходящий из коллиматора, попадает на грань стеклянной призмы.



Так как показатель преломления зависит от длины волны, то пучок света, состоящий из волн с разной длиной волны, разлагается на параллельные пучки света разного цвета. Линза зрительной трубы фиксирует каждый пучок и дает разноцветные изображения щели, образуя разноцветную полоску — спектр.

5.2.4. Лазер

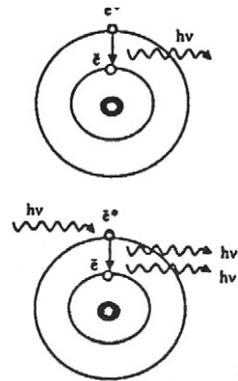
◆ **Лазер** — это оптический квантовый генератор, создающий мощные, узконаправленные, когерентные пучки монохроматического излучения.

Излучение может быть спонтанным (самопроизвольным) или индуцированным (вынужденным).

◆ **Спонтанное излучение** — испускание атомом фотона в результате самопроизвольного перехода электрона из возбужденного состояния в основное.

◆ **Индукцированное излучение** — переход электрона из возбужденного состояния в основное под действием электромагнитного излучения.

Фотон-«катализатор» попадает в возбужденный электрон и, стимулируя его переход в основное состояние, не теряет своей энергии. В результате из атома испускаются два фотона.



Основные компоненты лазера:

- активная среда — среда, в которой создаются состояния с инверсной заселенностью, т. е. заселенностью, при которой число атомов в возбужденных состояниях больше, чем их число в основном состоянии;
- система накачки — устройство для создания инверсной заселенности уровней в активной среде;
- оптический резонатор — устройство, выделяющее в пространство избирательно направленный поток фотонов и формирующее выходящий световой пучок.

Классификация лазеров

- По типу активной среды — твердотельные, газовые, полупроводниковые, жидкостные.
- По методу накачки — оптические, тепловые, химические, электроионизационные и др.

- По режиму генерации — непрерывного действия, импульсного действия.

Устройство рубинового лазера

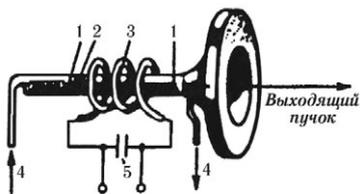
1 — *система зеркал*; состоит из двух строго параллельных друг другу плоских зеркал, расположенных возле торцов рубинового стержня. Используется для того, чтобы заставить световой пучок многократно проходить через рубиновый стержень. Одно из зеркал полностью отражает свет, а другое полупрозрачно, т. е. частично отражает, а частично пропускает свет;

2 — *рубиновый стержень*; представляет собой цилиндр, длина которого в 8–10 раз превышает его диаметр;

3 — *газоразрядная лампа*; имеет вид спирали и охватывает рубиновый стержень. Ее используют для возбуждения ионов хрома в рубине;

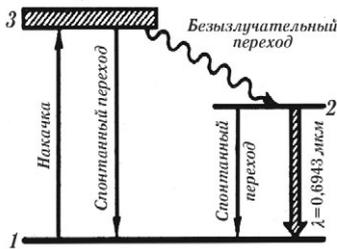
4 — *система охлаждения*; охлаждает рубиновый стержень при работе лазера;

5 — *батарея конденсаторов*.



Принцип работы рубинового лазера

При облучении рубина сине-зеленым светом ионы хрома возбуждаются и из основного состояния (уровень 1) переходят в возбужденное состояние (уровень 3). Через короткий промежуток времени ($\approx 10^{-8}$ с) большинство ионов хрома спонтанно переходят с уровня 3 на метастабильный энергетический уровень 2, в котором они могут находиться $\approx 10^{-3}$ с, т. е. в 100 тысяч раз дольше, чем на обычном возбужденном уровне. Таким образом, создается «перенаселение» уровня 2, т. е. число возбужденных электронов больше числа невозбужденных электронов. Переход ионов с энергетического уровня 3 на метастабильный уровень 2 происходит без излучения света. Высвобождающаяся при таком переходе энергия передается кристаллической решетке рубина.



Под действием электромагнитных волн, облучающих рубин, или под действием фотонов, появляющихся в самом веществе при спонтанных переходах атомов на уровень 2, происходит переход ионов хрома с метастабильного уровня 2 на уровень 1, и возникает вынужденное излучение света.

Свойства лазерного излучения:

- временная и пространственная когерентность;
- строгая монохроматичность;
- большая плотность потока энергии;
- очень малое угловое расхождение в пучке.

Применение лазеров:

- передача информации; связь (особенно в космосе);
- точное определение расстояний;
- трассировка туннелей; геологические измерения;
- определение курса и скорости кораблей, самолетов, ракет;
- в голографии для получения объемных изображений предметов;
- точечная сварка при изготовлении микросхем;
- осуществление управления термоядерными реакциями;
- в хирургии для разрезания, сшивания, стерилизации живых тканей, для приваривания отслоившейся сетчатки глаза.

Основные формулы по теме «Физика атома»

$$mvr = \frac{nh}{2\pi} \quad \text{— квантованные значения момента импульса}$$

$$h\nu = E_m - E_n \quad \text{— правило частот}$$

$$r = \frac{\varepsilon_0 n^2 h^2}{\pi \cdot m e^2} \quad \text{— радиус стационарных круговых орбит}$$

$$E_{\text{кин}} = \frac{m e^4}{8 n^2 \varepsilon_0^2 h^2} \quad \text{— кинетическая энергия}$$

$$E_{\text{пот}} = - \frac{m e^4}{4 n^2 \varepsilon_0^2 h^2} \quad \text{— потенциальная энергия}$$

$$E_{\text{пол}} = - \frac{m e^4}{8 n^2 \varepsilon_0^2 h^2} \quad \text{— полная энергия}$$

$$\nu = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad \text{— частота поглощаемого или испускаемого фотона}$$

$$\nu = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad \text{— серия Лаймана}$$

$$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad \text{— серия Бальмера}$$

$$\nu = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad \text{— серия Пашена}$$

5.3. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

5.3.1. Радиоактивность. Альфа-распад. Бета-распад. Гамма-излучение

Радиоактивность — способность некоторых атомных ядер самопроизвольно превращаться в другие ядра с испусканием различных видов радиоактивных излучений.

Виды радиоактивности:

- *естественная радиоактивность* — это радиоактивность, которая наблюдается у неустойчивых изотопов, существующих в природе и имеющих в таблице Менделеева порядковый номер больше 83;
- *искусственная радиоактивность* — это радиоактивность, которая наблюдается у изотопов, полученных посредством ядерных реакций в лабораторных условиях.

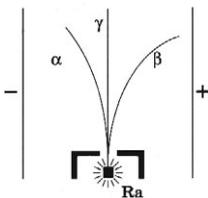
Явление естественной радиоактивности открыл в 1896 году французский физик А. Беккерель. Проводя опыты с солями урана, он заметил, что они самопроизвольно испускают лучи неизвестной природы, которые проходят через бумагу, дерево, металлические пластины и делают воздух проводником электричества.

Радиоактивность данного химического элемента не зависит от того, является ли химический элемент чистым или входит в состав какого-либо химического соединения. Радиоактивность не зависит от внешних условий: температуры, освещения, давления. Это означает, что радиоактивность представляет собой внутреннее свойство атомов радиоактивного элемента.

Виды радиоактивных излучений

Излучение радиоактивных веществ имеет сложный характер и состоит из трех видов излучений. Если радиоактивное излучение пропустить через электрическое и магнитное поля, то оно распадается на три части, две из них отклоняются в противоположные стороны, а третий не отклоняется.

- α -излучение представляет собой ядра атомов гелия ${}^4_2\text{He}$, движущиеся со скоростью $10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, несет положительный заряд;
- β -излучение представляет собой поток быстрых электронов, движущихся со скоростями, близкими к скорости света, несет отрицательный заряд;



- γ -излучение представляет собой электромагнитное излучение с длиной волны 10^{-12} м, заряда не имеет.

При одинаковой энергии частиц разные виды излучений неодинаково взаимодействуют с веществом.

Вследствие сильного ионизирующего действия глубина проникновения α -частиц в твердых телах обычно очень мала. β -частицы менее эффективно взаимодействуют с атомами вещества, поэтому их проникающая способность больше, чем у α -частиц. γ -кванты взаимодействуют с электронными оболочками атомов и имеют самую большую проникающую способность. Для защиты от γ -излучения необходимы защитные стены или оболочки толщиной несколько десятков сантиметров или даже метров.

◆ **Радиоактивный распад** — самопроизвольный распад атомов радиоактивного вещества, в результате которого ядра одних химических элементов превращаются в ядра других химических элементов.

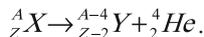
Превращения атомных ядер, которые сопровождаются испусканием α - и β -частиц, называются соответственно α - и β -распадом. Термина « γ -распад» не существует, так как α - и β -распад сопровождаются γ -излучением.

Распадающееся ядро X называется материнским ядром, ядро продукта распада Y — дочерним ядром.

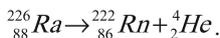
Правила радиоактивного смещения

Это правила, позволяющие установить, какое ядро возникает в результате распада данного материнского ядра.

- α -распад:



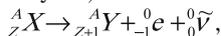
Если при радиоактивном превращении испускаются α -частицы, то в результате такого превращения образуется ядро элемента, находящегося в таблице Менделеева на две клетки раньше исходного ядра плюс ядро атома гелия ${}^4_2 He$ (или α -частица):



- β -распад.

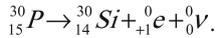
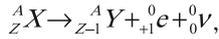
Если при радиоактивном превращении испускаются β -частицы, то в результате такого превращения образуется ядро элемента, находящегося в таблице Менделеева:

- при β^- -распаде в следующей после исходного ядра клетке плюс электрон и антинейтрино (частица, не имеющая заряда и масса покоя которой равна нулю):





- при β^+ -распаде в предшествующей исходному ядру клетке плюс позитрон и нейтрино (частица, не имеющая заряда и масса покоя которой равна нулю):



γ -излучение сопровождает α - и β -распады, а также возникает при ядерных реакциях, торможении частиц, их распаде и т. д.

γ -излучение испускается дочерним ядром, которое в момент своего образования оказывается в возбужденном состоянии, а затем переходит в невозбужденное состояние.

Спектр γ -излучения является линейчатым.

Биологическое действие радиоактивных излучений

При облучении вещества α -, β -, γ -частицами происходит возбуждение или ионизация атомов вещества. При этом сами частицы могут тормозиться, что сопровождается рентгеновским излучением. Кроме того, частицы могут упруго или неупруго соударяться с атомами вещества. Все это может привести к изменению свойств облучаемого вещества и к отрицательному воздействию на живые организмы. Вредное действие излучений на организм связано с образованием свободных химических радикалов и с мутацией в клетках, которые могут оказывать влияние на потомство, приводить к лучевой болезни и образованию злокачественных опухолей.

Методы защиты от внешнего радиоактивного облучения:

- удаление от источника излучения на большое расстояние;
- ограничение времени пребывания на загрязненной местности или вблизи радиоактивных источников;
- ограждение радиоактивных источников экранами из материалов, эффективно поглощающих радиоактивные излучения (графит, свинец, кадмий, бор).

Методы защиты от внутреннего радиоактивного облучения:

- дозиметрический контроль воздуха, осадков в близлежащей местности;
- дозиметрический контроль продуктов питания;
- применение веществ, ослабляющих воздействие радиоактивных излучений на организм.

В дозиметрии различают поглощенную и эквивалентную дозы.

Поглощенная доза равна энергии радиоактивного излучения, поглощенного единицей массы вещества.

Обозначение – D , единица измерения в СИ – *грей* (Гр).

$$D = \frac{E}{m},$$

где E – энергия излучения; m – масса вещества.

Для характеристики биологического воздействия на организм используется коэффициент качества излучения (k), или коэффициент относительной биологической активности.

$k = 1$ для γ -квантов, $k = 3$ для тепловых нейтронов, $k = 10$ для нейтронов с энергией порядка $0,5 \text{ МэВ}$.

◆ **Эквивалентная доза** равна произведению коэффициента качества излучения и поглощенной дозы.

Обозначение – H , единица измерения в СИ – *зиверт* (Зв).

$$H = kD.$$

1 *зиверт* – это эквивалентная доза, при которой поглощенная доза равна 1 Гр при коэффициенте качества, равном 1.

Естественный фон составляет 2 мЗв за год.

Предельно допустимая доза – 5 мЗв за год.

При дозе $0,5 \text{ Зв}$ наступает острое лучевое поражение организма.

При дозе $3\text{--}5 \text{ Зв}$ – смертельный исход.

Допустимая доза облучения за среднее время жизни человека (70 лет) составляет $0,35 \text{ Зв}$.

5.3.2. Закон радиоактивного распада

Если имеется большое количество одинаковых радиоактивных ядер, то вероятность распада каждого из них в любой момент времени одинакова. Радиоактивный распад любого ядра является случайным процессом, поэтому момент его распада предсказать невозможно.

Однако для большого числа частиц, находящихся в образце вещества, выполняется статистический закон радиоактивного распада.

Закон радиоактивного распада:

число нераспавшихся атомных ядер при естественном радиоактивном распаде экспоненциально уменьшается с течением времени.

Период полураспада – это время, в течение которого распадается половина способных к распаду ядер.

В начальный момент времени $t = 0$, число атомных ядер N_0 .

Через промежуток времени, равный периоду полураспада

$$t = T_{1/2}, \text{ число атомных ядер } N = \frac{N_0}{2}.$$

Через промежуток времени, равный двум периодам полураспада

$$t = 2 T_{1/2}, \text{ число атомных ядер } N = \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^2}.$$

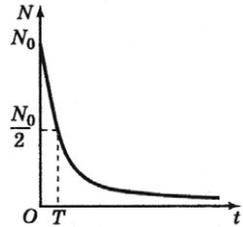
Через промежуток времени, равный n периодам полураспада

$$t = n T_{1/2}, \text{ число атомных ядер } N = \frac{N_0}{2^n}.$$

$$n = \frac{t}{T_{1/2}}, \quad N = \frac{N_0}{2^{\frac{t}{T_{1/2}}}}, \quad N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}},$$

где N — число нераспавшихся атомных ядер к моменту времени t ; N_0 — начальное число атомных ядер; $T_{1/2}$ — период полураспада.

На рисунке период полураспада соответствует времени, в течение которого число радиоактивных ядер (активность) уменьшается вдвое.



5.3.3. Нуклонная модель ядра. Заряд ядра. Массовое число ядра

Элементарные частицы:

- **протон**

Обозначение — p , заряд $q_p = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$,
масса $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

- **нейтрон**

Обозначение — n , заряд отсутствует, масса $m_n = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

- **электрон**

Обозначение — e , заряд $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$,
масса $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$.

Нуклон — это частица, входящая в состав атомного ядра.

Атомное ядро любого химического элемента состоит из протонов и нейтронов.

Массовое число — это число, которое определяет количество протонов и нейтронов в ядре и равно округленному до целого значению массы атомного ядра в а.е.м.

Обозначение — A , единица измерения — 1 атомная единица массы (а.е.м.).

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

Массовое число равно сумме количества протонов и нейтронов в ядре:

$$A = Z + N,$$

где A — массовое число; Z — количество протонов в ядре; N — количество нейтронов в ядре.

Зарядовое число — это число, которое показывает количество протонов в ядре.

Зарядовое число равно сумме зарядов протонов, входящих в состав ядра, выраженной в элементарных электрических зарядах.

Элементарный электрический заряд равен заряду электрона:

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

Z — порядковый номер химического элемента в периодической таблице Менделеева.

Если некоторый химический элемент обозначить ${}^A_Z X$, это означает, что в его ядре Z — протонов и $N=A-Z$ — нейтронов.

Измерения массы атомов показали, что практически все химические элементы имеют изотопы.

Изотопы — это атомы одного и того же химического элемента, имеющие одинаковое количество протонов, но отличающиеся количеством нейтронов в ядре.

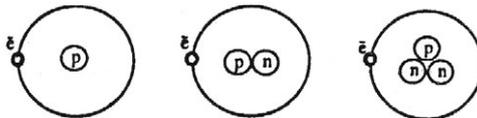
Изотопы имеют:

- одинаковый атомный номер Z (одинаковое число протонов);
- различные массовые числа A (различное число нуклонов);
- одинаковое строение электронных оболочек;
- близкие химические свойства.

Изотопы бывают:

- *стабильные* — это изотопы, которые сохраняются сколь угодно долго;
- *радиоактивные* — это изотопы, которые превращаются в ядра других элементов с течением времени.

Изотопы водорода: водород имеет два стабильных изотопа — водород ${}^1_1 H$, дейтерий ${}^2_1 H$ и один радиоактивный изотоп тритий ${}^3_1 H$.



5.3.4. Энергия связи нуклонов в ядре. Ядерные силы

Между нуклонами ядра действуют самые мощные силы природы — ядерные силы.

◆ **Ядерные силы** — это силы притяжения, связывающие протоны и нейтроны в атомном ядре и обеспечивающие существование устойчивых ядер.

Свойства ядерных сил:

- являются силами притяжения;
- являются короткодействующими силами (действуют на малых расстояниях, не превышающих $2 \cdot 10^{-15}$ м; на таком расстоянии ядерные силы больше кулоновских приблизительно в 100 раз);
- обладают свойством зарядовой независимости (ядерные силы, действующие между двумя протонами, двумя нейтронами и между протоном и нейтроном, одинаковы);
- имеют свойство насыщения (каждый нуклон взаимодействует только с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов, а не со всеми нуклонами ядра);
- не являются центральными (не действуют по линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов).

Массу ядра можно точно определить с помощью масс-спектрографов, которые разделяют заряженные частицы с разными удельными зарядами с помощью электрических и магнитных полей.

Опытным путем было установлено, что благодаря действию сил притяжения масса ядра всегда меньше суммы масс протонов и масс нейтронов, входящих в состав этого ядра:

$$M < Z \cdot m_p + N \cdot m_n, \quad \text{где } M \text{ — масса ядра.}$$

Дефект масс — это величина, равная разности суммы масс входящих в ядро нуклонов и массы ядра:

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M, \quad \text{где } \Delta m \text{ — дефект масс.}$$

Благодаря ядерным силам ядра атомов обладают огромной энергией связи.

Энергия связи — это энергия, которую необходимо затратить, чтобы разделить ядро на составляющие его нуклоны, или энергия, которая выделяется при образовании ядра из отдельных нуклонов:

$$\Delta E_{св} = \Delta m \cdot c^2,$$

где $\Delta E_{св}$ — энергия связи, c — скорость света.

Если в формуле энергии связи массы протона и нейтрона выражены в килограммах, а скорость света — в метрах в секунду, то энергия связи будет измерена в джоулях. Однако в физике атома и атомного ядра энергию ядер и элементарных частиц чаще выражают в *мегаэлектронвольтах (МэВ)*.

Энергетический эквивалент 1 а.е.м.

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

$$E = mc^2; E = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)^2 \approx 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ Дж};$$

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж};$$

$$E = \frac{1,5 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}}{1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{Дж}}{\text{эВ}}} = 931,5 \text{ МэВ};$$

$$1 \text{ а.е.м.} \rightarrow 931,5 \text{ МэВ}.$$

Поэтому энергию связи можно рассчитать следующим образом:

$$E_{\text{св}} = 931,5 \cdot \Delta m.$$

В этом случае энергия связи измеряется в *мегаэлектронвольтах (МэВ)*.

Для характеристики прочности ядра используется величина, которая называется удельной энергией связи.

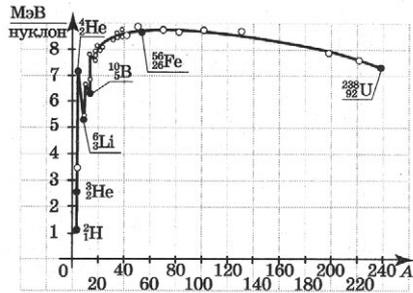
Удельная энергия связи — это энергия связи ядра, приходящаяся на один нуклон ядра:

$$\varepsilon_{\text{св}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}, \text{ где } A \text{ — массовое число.}$$

Удельная энергия связи неодинакова для разных химических элементов и даже для изотопов одного и того же химического элемента. Удельная энергия связи нуклона в ядре меняется в среднем в пределах от 1 МэВ у легких ядер до 8,6 МэВ у ядер средней массы (с массовым числом $A \approx 100$). У тяжелых ядер ($A \approx 200$) удельная энергия связи нуклона меньше, чем у ядер средней массы, приблизительно на 1 МэВ, так что их превращение в ядра среднего веса (деление на 2 части) сопровождается выделением энергии в количестве около 1 МэВ на нуклон, или около 200 МэВ на ядро. Превращение легких ядер в более тяжелые ядра дает еще больший энергетический выигрыш в расчете на нуклон.

Зависимость удельной энергии связи от массового числа установили экспериментально. Из рисунка хорошо видно, что, не считая самых легких ядер, удельная энергия связи примерно постоянна и рав-

на 8 МэВ/нуклон . Отметим, что энергия связи электрона и ядра в атоме водорода, равная энергии ионизации, почти в миллион раз меньше этого значения. Кривая на рисунке имеет слабо выраженный максимум. Максимальную удельную энергию связи ($8,6 \text{ МэВ/нуклон}$) имеют элементы с массовыми числами от 50 до 60, т. е. железо и близкие к нему по порядковому номеру элементы. Ядра этих элементов наиболее устойчивы.



У тяжелых ядер удельная энергия связи уменьшается за счет возрастающей с увеличением Z кулоновской энергии отталкивания протонов. Кулоновские силы стремятся разорвать ядро.

5.3.5. Ядерные реакции. Деление и синтез ядер

Атомные ядра при взаимодействиях испытывают превращения. Эти превращения сопровождаются увеличением или уменьшением кинетической энергии участвующих в них частиц.

◆ **Ядерные реакции** — это изменения атомных ядер при взаимодействии их с элементарными частицами или друг с другом.

Ядерные реакции происходят, когда частицы вплотную приближаются к ядру и попадают в сферу действия ядерных сил. Одноименно заряженные частицы отталкиваются друг от друга, поэтому сближение положительно заряженных частиц с ядрами (или ядер друг с другом) возможно, если этим частицам (или ядрам) сообщена достаточно большая кинетическая энергия. Эта энергия сообщается протонам, ядрам дейтерия, α -частицам и другим более тяжелым ядрам с помощью ускорителей.

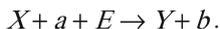
Для осуществления ядерных реакций такой метод гораздо эффективнее, чем использование ядер гелия, испускаемых радиоактивными элементами. Во-первых, с помощью ускорителей частицам может быть сообщена энергия порядка 10^5 МэВ , т. е. гораздо большая той, которую имеют α -частицы (максимально 9 МэВ). Во-вторых, можно использовать протоны, которые в процессе радиоактивного распада не появляются (это целесообразно потому, что заряд протонов вдвое меньше заряда α -частиц, и поэтому действующая на них сила отталкивания со стороны ядер тоже в 2 раза меньше). В-третьих, можно ускорить ядра более тяжелые, чем ядра гелия.

Наиболее распространенный вид ядерной реакции:



где X и Y – исходное и конечное ядра; a и b – бомбардирующая и испускающая частицы.

Эндотермическая реакция – это реакция с поглощением энергии:



Экзотермическая реакция – это реакция с выделением энергии:



При ядерных реакциях выполняются следующие законы.

- **Закон сохранения электрического заряда:**

сумма электрических зарядов атомных ядер и частиц до реакции равна сумме электрических зарядов атомных ядер и частиц после реакции:

$$\sum Z = \sum Z'.$$

- **Закон сохранения массового числа:**

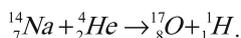
сумма нуклонов атомных ядер и частиц до реакции равна сумме нуклонов атомных ядер и частиц после реакции:

$$\sum M = \sum M'.$$

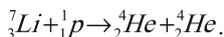
- **Закон сохранения энергии.**

Примеры ядерных реакций

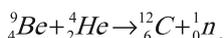
- Первое наблюдавшееся превращение ядра (Ю. Резерфорд, 1919):



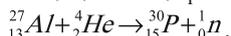
- Первая ядерная реакция на быстрых протонах (1932):



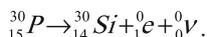
- Открытие нейтрона (Дж. Чедвик, 1932):



- Первое искусственное получение радиоактивного распада и открытие позитрона. Радиоактивный распад под действием α -частиц наблюдал Ф. Жолио-Кюри:



Изотоп фосфора оказался радиоактивным: его ядро распадается с испусканием позитрона и нейтрино:



Классификация ядерных реакций

Ядерные реакции классифицируются:

- по роду участвующих в них частиц — реакции под действием нейтронов, заряженных частиц, γ -квантов;
 - по энергии вызывающих их частиц — реакции при малых, средних, высоких энергиях;
 - по роду участвующих в них ядер — реакции на легких ядрах ($A < 50$), средних ядрах ($50 < A < 100$) и тяжелых ядрах ($A > 100$);
 - по характеру происходящих ядерных превращений — реакции с испусканием нейтронов, заряженных частиц, реакции захвата.
- ◆ **Деление ядер** — это деление атомного ядра урана на несколько более легких ядер (осколков), чаще всего на два ядра, близких по массе.
- Делиться могут только ядра некоторых тяжелых элементов.
 - При делении ядер испускаются нейтроны и γ -лучи.
 - При делении ядер выделяется большая энергия.

Механизм деления ядер (капельная модель)

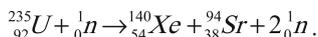
В тяжелых ядрах действуют значительные ядерные силы, которые удерживают ядро от распада. Под влиянием поглощенного нейтрона ядро возбуждается и начинает деформироваться, приобретая вытянутую форму. Оно растягивается до тех пор, пока силы отталкивания половинок ядра не начинают преобладать над силами притяжения, действующими в перешейке. В результате ядро разрывается на два осколка X и Y.



Под действием сил кулоновского отталкивания осколки разлетаются со скоростью, равной приблизительно $1/30$ скорости света. Одновременно испускается излучение высокой частоты.

- ◆ **Цепная ядерная реакция** — ядерная реакция деления тяжелых ядер нейтронами, в результате которой число нейтронов возрастает и поэтому может возникнуть самоподдерживающийся процесс деления.

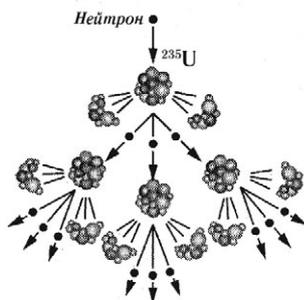
В 1939 году было обнаружено, что при попадании нейтрона в ядро изотопа урана-235 происходит деление ядра на два или три осколка с испусканием 2–3 нейтронов:



Эти нейтроны способны вызвать деление 2–3 новых ядер урана с испусканием 4–9 новых нейтронов и т. д., процесс может продолжаться самостоятельно, вовлекая все большее число новых ядер.

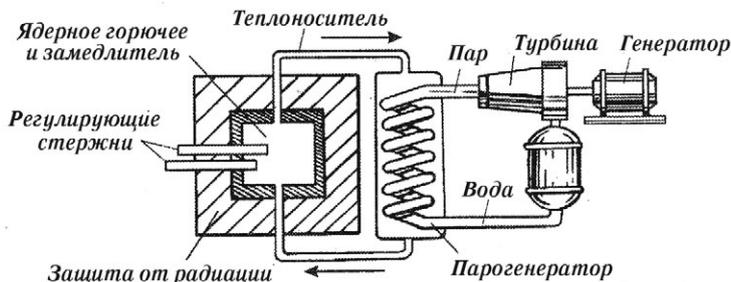
Условия протекания цепной ядерной реакции:

- должны отсутствовать примеси, поглощающие нейтроны;
- количество вещества, способного делиться, должно быть достаточным для того, чтобы образующиеся нейтроны могли соударяться с другими ядрами, не покидая объем, не испытывая взаимодействия;
- скорость нейтронов должна быть достаточной, чтобы вызвать деление ядер.



Минимальное количество вещества, необходимое для осуществления цепной ядерной реакции, называется *критической массой*.

Устройства, в которых осуществляются управляемые цепные ядерные реакции, называются *ядерными реакторами*.



Основные элементы ядерного реактора:

- Ядерное горючее (сырьевые и делящиеся вещества в реакторах — изотопы урана, плутоний, торий).
- Замедлитель и отражатель нейтронов, которые способствуют увеличению числа медленных нейтронов, наиболее эффективных для развития цепной реакции деления (графит, тяжелая или обычная вода).
- Регулирующие стержни, которые вводят в активную зону реактора для поддержания стационарного режима реактора, так как быстрое развитие реакции сопровождается выделением боль-

шого количества тепла и перегревом реактора; стержни выполнены из материалов, сильно поглощающих тепловые нейтроны (из бора, кадмия).

- Теплоноситель, который необходим для отвода тепла, образующегося в реакторе (вода, жидкий натрий и др.).
- Защитные устройства, которые применяют для защиты персонала, обслуживающего реактор, от действия на организм нейтронных потоков и γ -лучей.

Термоядерный синтез

График зависимости удельной энергии связи нуклонов в ядре от массового числа показывает, что кроме реакции деления тяжелых ядер с выделением энергии идут реакции синтеза легких ядер.

Синтез ядер — это слияние ядер в одно ядро, сопровождающееся выделением энергии.

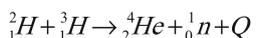
Для осуществления реакции синтеза легких ядер требуются высокие энергии сливающихся частиц, так как необходимо преодолеть кулоновское отталкивание. Этого можно достичь за счет высокой температуры вещества.

Термоядерная реакция — это реакция синтеза легких атомных ядер в более тяжелые, происходящая при сверхвысоких температурах (порядка 10^7 К и выше).

В природе термоядерные реакции происходят в недрах звезд.

При термоядерном синтезе энергетический выход на единицу массы топлива оказывается выше, чем при реакции деления тяжелых ядер урана.

Пример реакции синтеза:



Синтез гелия из тяжелых изотопов водорода — дейтерия и трития — происходит при температуре около $5 \cdot 10^7$ К.

При синтезе 1 г гелия из дейтерия и трития выделяется $4,2 \cdot 10^{11}$ Дж — такая же энергия выделяется при сгорании 10 т дизельного топлива.

Термоядерный синтез может стать одним из возможных альтернативных источников энергии. Поиск таких источников энергии важен, так как запасы нефти и газа на Земле ограничены.

В настоящее время ведется испытание установок для осуществления управляемых термоядерных реакций синтеза гелия из водорода. Запасы водорода на Земле практически неисчерпаемы. Количество дейтерия в океанической воде составляет примерно $4 \cdot 10^{11}$ т, чему соответствует энергетический запас 10^{17} МВт·год. Наиболее заманчивой является возможность извлечения энергии дейтерия, содержащегося в обычной воде.

Основные формулы по теме «Физика атомного ядра»

$${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 He \quad - \alpha\text{-распад}$$

$${}^{226}_{88} Ra \rightarrow {}^{222}_{86} Rn + {}^4_2 He \quad - \beta\text{-распад}$$

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e + {}^0_0 \tilde{\nu} \quad - \gamma\text{-распад}$$

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \quad - \text{закон радиоактивного распада}$$

$$A = Z + N \quad - \text{массовое число}$$

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M \quad - \text{дефект масс}$$

$$\Delta E_{cb} = \Delta m \cdot c^2, \quad E_{cb} = 931,5 \cdot \Delta m \quad - \text{энергия связи}$$

$$\varepsilon_{cb} = \frac{E_{cb}}{A} \quad - \text{удельная энергия связи}$$

МЕТОДЫ НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ

Одной из наук о природе является физика. Физика — это наука о наиболее простых и вместе с тем наиболее общих законах окружающего мира.

Эксперимент и теория в физическом познании мира

Познание окружающего мира с помощью научного метода заключается в следующем: опираясь на опыт, установить количественные законы природы и проверить их с помощью эксперимента.

Научный метод познания природы состоит из следующих этапов:

- наблюдение;
- установление закономерностей явления, определение причин и следствий этого явления;
- создание модели явления;
- выдвижение гипотезы для объяснения закономерностей явления;
- экспериментальная проверка выдвинутой гипотезы;
- создание теории;
- объяснение других явлений на основе выдвинутой теории.

В физике используют два метода научного познания: экспериментальный и теоретический.

По мере изучения какого-либо явления перед человеком все больше открываются его свойства и связи с другими явлениями. Такой процесс познания называют постижением истины.

Наблюдения позволяют накопить фактический материал. Для объяснения данных, полученных при наблюдениях, необходимо провести рассуждения, выдвинуть научную гипотезу. Гипотеза — предположение о причинах наблюдаемых явлений.

Научная гипотеза проверяется физическим экспериментом.

Эксперимент — это научный или лабораторный опыт, результатом которого может быть определение величин или зависимостей, опровержение или подтверждение теории или гипотезы, открытие нового явления. На основе результатов физических экспериментов формулируются физические законы.

В результате эксперимента могут быть выявлены определенные закономерности. Гипотеза может выступать основанием для построения на основе накопленных экспериментальных данных физической теории.

Теория — это система основных идей в данной области знаний.

Критерий истинности и основа развития теории — практика (физический эксперимент). Цель теории — формулировка законов природы, объяснение на их основе существующих и предсказание новых явлений.

Научная теория содержит постулаты, определения, гипотезы и законы, объясняющие наблюдаемые явления. В самом общем виде структуру любой теории можно представить в виде схемы:

Основание	Наблюдения, опыты Модели Система основных понятий
Ядро	Система законов Фундаментальные постоянные
Следствия	Объяснение фактов Практическое применение законов Предсказание нового

Любая теория является некоторым приближением к реальности. Результаты теории проверяются экспериментом, являющимся критерием ее истинности. Расхождение теории с поставленным экспериментом приводит к совершенствованию старой или созданию принципиально новой теории, дающей уточненные законы и более глубокое понимание физической реальности. Таким образом, любая теория рассматривается как верная для определенного круга явлений, т. е. имеет границы применимости. Существующие физические теории формируют *физическую картину мира*.

При расхождении новых экспериментальных данных и существующих законов и теорий ученые выдвигают новые гипотезы и физические теории. Однако любая новая физическая теория, претендующая на более глубокое и широкое описание явлений окружающего мира, чем старая, должна включать последнюю в качестве предельного случая. Это важнейшее требование, предъявляемое ко всякой новой физической теории, называют *принципом соответствия*. Например, специальная теория относительности при описании движения тел со скоростями, гораздо меньшими скорости света, переходит в классическую механику.

Моделирование явлений и объектов природы в физической науке. Роль математики в физике

Модель — абстрактная система, являющаяся упрощенной копией исследуемой реальной физической системы.

Модельная система должна:

- иметь область применимости, в которой свойства модели с заданной точностью совпадают со свойствами реальной системы;
- допускать достаточно простое математическое описание.

Модель тем лучше, чем шире область ее применимости и чем проще ее описание. Механика основана на двух моделях: материальной точки и абсолютно твердого тела.

Для выражения количественных закономерностей в физике широко применяется математический аппарат. При этом использование того или иного раздела математики в конечном счете диктуется опытными фактами.

Понятие о физических законах и границах их применимости

Физические законы отражают связь между физическими величинами. Физические законы, имеющие наиболее обширные области применимости, называются **фундаментальными**. Например, законы Ньютона, закон сохранения энергии, закон Кулона.

Каждый физический закон имеет границы применимости.

Границы применимости физического закона определяются:

- указанием допустимых пределов изменения физических величин, входящих в формулировку закона;
- точностью изменения этих величин;
- обширностью круга физических явлений, для которых закон имеет смысл.

Внутри своей области применимости закон выполняется для любых физических явлений.

Принцип причинности

Принцип причинности — один из наиболее общих принципов, устанавливающий допустимые пределы влияния физических событий друг на друга.

Принцип причинности исключает влияние данного события на все прошедшие события («будущее не влияет на прошедшие события», «событие — причина предшествует событию — следствию»).

Измерение физических величин. Погрешность измерений

Измерение физических величин – совокупность действий, выполненных с помощью средств измерения (приборов) для нахождения численных значений физических величин.

При измерении физическая величина сравнивается с однородной величиной, принятой за единицу.

Основные единицы Международной системы единиц СИ

Величина	Наименование единицы СИ	Обозначение
Длина	<i>метр</i>	<i>м</i>
Масса	<i>килограмм</i>	<i>кг</i>
Время	<i>секунда</i>	<i>с</i>
Электрический ток	<i>Ампер</i>	<i>А</i>
Термодинамическая температура	<i>Кельвин</i>	<i>К</i>
Количество вещества	<i>моль</i>	<i>моль</i>
Сила света	<i>кандела</i>	<i>кд</i>

Единицы, используемые в СИ, и их значения в единицах СИ

Наименование	Обозначение	Значение в единицах СИ
Минута	<i>мин</i>	$1 \text{ мин} = 60 \text{ с}$
Час	<i>ч</i>	$1 \text{ ч} = 60 \text{ мин} = 3600 \text{ с}$
День	<i>сут</i>	$1 \text{ сут} = 24 \text{ ч} = 86400 \text{ с}$
Литр	<i>л</i>	$1 \text{ л} = 10^{-3} \text{ м}^3$
Тонна	<i>т</i>	$1 \text{ т} = 10^3 \text{ кг}$
Квадратный сантиметр	<i>см²</i>	$1 \text{ см}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$
Кубический сантиметр	<i>см³</i>	$1 \text{ см}^3 = 10^{-6} \text{ м}^3$
Электронвольт	<i>эВ</i>	$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$
Атомная единица массы	<i>а.е.м.</i>	$1 \text{ а.е.м.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

Производные единицы СИ, выраженные через основные единицы

Величина	Наименование единицы СИ	Обозначение
Скорость	метр в секунду	$м/с$
Ускорение	метр на секунду в квадрате	$м/с^2$
Плотность	килограмм на кубический метр	$кг/м^3$
Плотность тока	Ампер на квадратный метр	$А/м^2$
Площадь	квадратный метр	$м^2$
Объем	кубический метр	$м^3$

Производные единицы СИ со специальными наименованиями, выраженные через основные единицы СИ

Величина	Наименование единицы СИ	Обозначение	Выражение через основные единицы СИ
Частота	Герц	$Гц$	$с^{-1}$
Сила	Ньютон	$Н$	$\frac{кг \cdot м}{с^2}$
Давление, напряжение	Паскаль	$Па$	$\frac{Н}{м^2} = \frac{кг}{м \cdot с^2}$
Момент силы	Ньютон-метр	$Н \cdot м$	$\frac{кг \cdot м^2}{с^2}$
Энергия, работа, количество теплоты	Джоуль	$Дж$	$Н \cdot м = \frac{кг \cdot м^2}{с^2}$
Мощность	Ватт	$Вт$	$\frac{Дж}{с} = \frac{кг \cdot м^2}{с^3}$
Удельная теплоемкость	Джоуль на килограмм-Кельвин	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$	$\frac{Дж}{кг \cdot К} = \frac{м^2}{К \cdot с^2}$
Электрический заряд, количество электричества	Кулон	$Кл$	$А \cdot с$
Электрический потенциал, разность потенциалов, электродвижущая сила	Вольт	$В$	$\frac{Дж}{Кл} = \frac{кг \cdot м^2}{А \cdot с^3}$

Величина	Наименование единицы СИ	Обозначение	Выражение через основные единицы СИ
Электрическая емкость	Фарад	Φ	$\frac{Кл}{В} = \frac{А^2 \cdot с^4}{кг \cdot м^2}$
Напряженность электрического поля	Вольт на метр	$\frac{В}{м}$	$\frac{В}{м} = \frac{кг \cdot м}{А \cdot с^3}$
Электрическое сопротивление	Ом	$Ом$	$\frac{В}{А} = \frac{кг \cdot м^2}{А^2 \cdot с^3}$
Магнитный поток	Вебер	$Вб$	$Тл \cdot м^2 = \frac{кг \cdot м^2}{А^2 \cdot с^2}$
Магнитная индукция	Тесла	$Тл$	$\frac{Н}{А \cdot м} = \frac{кг}{А \cdot с^2}$
Индуктивность	Генри	$Гн$	$\frac{Вб}{А} = \frac{кг \cdot м^2}{А^2 \cdot с^2}$
Активность (радионуклида)	Беккерель	$Бк$	$с^{-1}$
Поглощенная доза	Грей	$Гр$	$Дж/кг$
Эквивалентная доза	Зиверт	$Зв$	$Дж/кг$

Приставки СИ

Множитель	Приставка	Обозначение
10^{18}	<i>экса</i>	<i>Э</i>
10^{15}	<i>пета</i>	<i>П</i>
10^{12}	<i>тера</i>	<i>Т</i>
10^9	<i>гига</i>	<i>Г</i>
10^6	<i>мега</i>	<i>М</i>
10^3	<i>кило</i>	<i>к</i>
10^2	<i>гекто</i>	<i>г</i>
10^1	<i>дека</i>	<i>да</i>
10^{-1}	<i>деци</i>	<i>д</i>
10^{-2}	<i>санти</i>	<i>с</i>
10^{-3}	<i>милли</i>	<i>м</i>
10^{-6}	<i>микро</i>	<i>мк</i>
10^{-9}	<i>нано</i>	<i>н</i>

Множитель	Приставка	Обозначение
10^{-12}	<i>пико</i>	<i>п</i>
10^{-15}	<i>фемто</i>	<i>ф</i>
10^{-18}	<i>атто</i>	<i>а</i>

Измерения бывают:

- *прямые* — это такие измерения, выполняя которые, измеряемую величину получают непосредственно путем сравнения с величиной, принятой за единицу измерения;
- *косвенные* — это такие измерения, при которых значение величины определяется по известной зависимости (правилу, закону) между этой величиной и другими, определяемыми напрямую.

Выполняемые измерения величин не являются абсолютно точными. Даже основные физические константы измерены с погрешностью. Различают абсолютную и относительную погрешности измерений.

Абсолютная погрешность измерения:

$$\Delta x = x_{\text{изм}} - x_{\text{истинное}}$$

В ряде случаев при многократных измерениях используют

$$\Delta x = x_{\text{изм}} - x_{\text{ср}},$$

где $x_{\text{ср}} = \sum \frac{x_i}{N}$, где N — количество измерений, i — номер измерения.

Предполагают, что $x_{\text{ср}}$ в наибольшей степени соответствует истинному значению измеряемой величины.

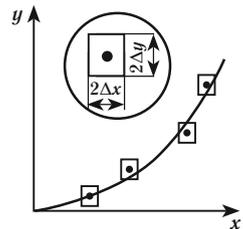
После того как вычислена граница абсолютной погрешности, ее значение обычно округляется до одной значащей цифры. Затем результат измерения записывается с числом десятичных знаков, которых не больше, чем в абсолютной погрешности.

Относительная погрешность измерения:

$$\delta = \frac{\Delta x}{x_{\text{ист}}} \cdot 100\%.$$

Построение графиков по результатам эксперимента

В простейших случаях обработки экспериментальных данных измеряемую величину определяют несколько раз. При построении графиков следует иметь в виду, что по результатам опытов мы получаем не точку, а прямоугольник со сторонами $2\Delta x$ и $2\Delta y$. Поэтому при построении графиков необходимо проводить плавную линию так, чтобы по



разные стороны от кривой оказалось примерно одинаковое число точек. Тогда кривая зависимости $x(y)$ будет лежать в «коридоре ошибок», проведенном по крайним точкам этих интервалов.

Физическая картина мира

Современная физика содержит небольшое число фундаментальных физических теорий, которые, однако, вместе с данными о характере физических процессов и явлений дают приближенное, но наиболее полное отображение различных форм движения материи (тепловая, механическая, электромагнитная).

Развитие представлений о физической картине мира

Время создания	Физическая картина мира	Ученые	Основные теории, законы
XVI–XVIII вв.	Механическая	Галилей, Ньютон, Декарт	Принцип относительности, классическая механика (законы динамики), законы сохранения
XIX–XX вв. (начало)	Электродинамическая	Фарадей, Максвелл, Эйнштейн	Закон Кулона, закон электромагнитной индукции, уравнения Максвелла, специальная теория относительности
XX в.	Квантово-полевая	Планк, Эйнштейн, Резерфорд, Бор, де Бройль, Гейзенберг	Квантовая гипотеза Планка, соотношение неопределенностей, корпускулярно-волновой дуализм, квантовая механика

Материя состоит из вещества и поля. Четкой границы между веществом и полем нет. Всем формам материи присущ корпускулярно-волновой дуализм. Законы движения всех микрочастиц носят статистический характер, для описания которых применяют принципы квантовой теории.

Единство мира проявляется в единстве строения материи и взаимодействий.

Существует четыре типа фундаментальных взаимодействий: сильные, электромагнитные, гравитационные, слабые.

Окружающий нас мир — вечно движущаяся и развивающаяся материя, которая изменяется, но не исчезает.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Классификация элементарных частиц

Все элементарные частицы можно разделить на три группы:

- **фотоны** — это группа элементарных частиц, которая состоит из одной частицы — фотона;
- **лептоны** — это группа элементарных частиц, к которой относятся электроны, мюоны, тау-лептоны, электронное нейтрино, мюонное нейтрино, таонное нейтрино и их античастицы;
- **адроны** — самая большая группа, к которой относятся нуклоны, пионы, каоны, гипероны и их античастицы.

Лептоны участвуют только в электромагнитном и слабом взаимодействии. Адроны обладают сильным взаимодействием наряду с электромагнитным и слабым.

Частица	Анти-частица	Обозначения	Электрический заряд, Кл	Масса, МэВ	Время жизни, с	Спин, \hbar
Фотон		γ	0	0	∞	1
<i>Лептоны</i>						
Электрон	Позитрон	e^-, e^+	$\pm 1,6 \cdot 10^{-19}$	0,511	∞	1/2
Нейтрино (электронное)	Антинейтрино	$\nu_e, \bar{\nu}_e$	0	0	∞	1/2
<i>Адроны</i>						
<i>Мезоны</i>						
π -мезоны (пионы)		π^+, π^-, π^0	$\pm 1,6 \cdot 10^{-19}$ 0	139,6 135,0	$2,5 \cdot 10^{-8}$ $2 \cdot 10^{-16}$	0
<i>Барионы</i>						
Протон	Антипротон	p, \bar{p}	$\pm 1,6 \cdot 10^{-19}$	938,26	$\rightarrow \infty$	1/2

Принцип зарядового сопряжения

Для каждой элементарной частицы должна существовать античастица. Из общих принципов квантовой теории следует, что частицы и античастицы должны иметь одинаковую массу, одинаковое время жизни в вакууме, одинаковые по модулю, но противоположные по знаку элек-

трические заряды (и магнитные моменты), а также одинаковые остальные характеристики, приписываемые элементарным частицам.

Эксперименты показывают, что за немногим исключением (γ -квантов, π^0 -мезонов, η^0 -мезонов) действительно каждой частице соответствует античастица.

Типы взаимодействий элементарных частиц

Различают следующие типы взаимодействий:

- *сильное взаимодействие* (интенсивность ≈ 1 , радиус действия $\approx 10^{-16}$ м);
- *электромагнитное взаимодействие* (интенсивность $1/137$, радиус действия ∞);
- *слабое взаимодействие* (интенсивность $\approx 10^{-10}$, радиус действия $\approx 10^{-18}$ м);
- *гравитационное взаимодействие* (интенсивность $\approx 10^{-38}$, радиус действия ∞).

Сильное взаимодействие обуславливает связь протонов и нейтронов в ядрах атомов и обеспечивает исключительную прочность ядер, лежащих в основе стабильности вещества.

Электромагнитное взаимодействие характерно для всех элементарных частиц, за исключением нейтронов, антинейтрино и фотона. Оно ответственно за существование атомов и молекул, обуславливая взаимодействие в них положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов.

Слабое взаимодействие ответственно за взаимодействие частиц, происходящее с участием нейтрино и антинейтрино, а также за безнейтринные процессы распада, характеризующиеся довольно большим временем жизни распадающихся частиц.

Гравитационное взаимодействие присуще всем без исключения частицам, но из-за малости масс элементарных частиц оно пренебрежимо мало и в процессах микромира несущественно.

Кварки

Развитие работ по классификации элементарных частиц сопровождалось поисками новых, более фундаментальных частиц, которые могли бы служить базисом для построения всех адронов. Эти частицы были названы *кварками*.

Согласно модели Гелл-Манна—Цвейга, все известные адроны можно было построить, постулировав существование кварков и соответствующих антикварков, если им приписать дробные электрические заряды.

Каждый тип кварка имеет еще одно квантовое число — цвет, которое может принимать три значения: красный, синий и зеленый. Кварки являются фермионами, по современным представлениям они бесструктурны.

Кварки имеют внутренние квантовые числа. Совокупность этих внутренних квантовых чисел, характеризующих определенный тип кварка, называется также «ароматом» кварка.

Барионы (фермионы с барионным числом $B = 1$) строятся из трех кварков; антибарионы (фермионы с барионным числом $B = -1$) строятся из трех антикварков; мезоны (бозоны с барионным числом $B = 0$) строятся из кварка и антикварка. Известные барионы и мезоны — бесцветны.

Кварки в адронах связаны глюонами.

Кварки участвуют в электромагнитных взаимодействиях, излучая или поглощая γ -квант, при этом не изменяется ни цвет, ни тип (аромат) кварков. Кварки также участвуют в сильных и слабых взаимодействиях.

Частицы, связывающие кварки в адроны, называются глюонами.

Характеристики кварков

Характеристика	Тип кварка					
	d	u	s	c	b	t
Электрический заряд, Q	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3
Масса в составе адрона, ГэВ	0,31	0,31	0,51	1,8	5	180
Масса «свободного» кварка, ГэВ	~0,006	~0,003	0,08–0,15	1,1–1,4	4,1–4,9	174±5

Фундаментальное свойство элементарных частиц — их взаимопревращаемость.

Для всех типов взаимодействия элементарных частиц выполняются законы сохранения энергии, импульса, момента импульса и электрических зарядов.

В настоящее время считается, что истинно элементарными частицами являются шесть лептонов и шесть антилептонов. Адроны, согласно современным представлениям, состоят из кварков и антикварков.

ЛИТЕРАТУРА

Балаш В. А. Задачи по физике и методы их решения: пособие для учителей. Изд. 3-е, перераб. и испр. М.: Просвещение, 1974.

Балыева С. А., Углова А. Н. Физика в вопросах и ответах: учеб. пособие. М.: ТК Велби, Проспект, 2003.

Гурский И. П. Элементарная физика с примерами решения задач. Изд. 3-е, перераб. М.: Наука (Главная редакция физико-математической литературы), 1984.

Единый государственный экзамен: Физика: Репетитор / В. А. Грибов, Н. К. Ханнанов. М.: Просвещение, Эксмо, 2006.

Кабрадин О. Ф. Физика: справ. матер.: учеб. пособие для учащихся. М.: Просвещение, 1991.

Касаткина И. Л. Физика: полный курс подготовки: разбор реальных экзаменационных заданий. М.: АСТ: Астрель, 2008.

Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б., Сотский Н. Н. Физика: учебник для 10 класса общеобразовательных учреждений. М.: Просвещение, 2009.

Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б., Чаругин В. М. Физика: учебник для 11 класса общеобразовательных учреждений. М.: Просвещение, 2009.

Трофимова Т. И. Справочник школьника по физике: 7–11 классы. М.: Изд. дом ОНИКС 21 век: Мир и образование, 2002.

Учебное пособие

+ 12

**Полный курс подготовки к ЕГЭ +
мультимедийный репетитор Яндекс**

**Мария Владимировна БОЙДЕНКО
Ольга Николаевна МИРОШКИНА**

ФИЗИКА
Полный курс подготовки к ЕГЭ (+CD)

Редактор, корректор Т. В. Чупина
Технический редактор Т. Ю. Лахнова

Подписано в печать 25.02.2014.
Формат 60 x 90/16.
Гарнитура Литературная. Усл. п. л. 16.
Тираж экз. Зак.

ООО «Издательство АСТ»
129085, г. Москва, Звездный бульвар, 21, строение 3, комната 5
www.ast.ru

«АВАНТА» И ЯНДЕКС ПРЕДСТАВЛЯЮТ: НОВЫЙ МУЛЬТИМЕДИЙНЫЙ РЕПЕТИТОР для подготовки к ЕГЭ

Это пособие поможет школьнику в самостоятельной подготовке к ЕГЭ. Оно содержит теорию, включающую в себя удобные для запоминания таблицы и примеры, и составлено с учетом обязательной программы по данному предмету. Это пособие – ваш персональный репетитор, который поможет не только изучить и понять материал, но и научит правильно и без боязни обращаться с заданиями, представленными в тестовой форме.



К ПОСОБИЮ
ПРИЛАГАЕТСЯ
КОМПАКТ-ДИСК,
КОТОРЫЙ ВКЛЮЧАЕТ
В СЕБЯ:

- ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ЗАДАНИЯ ПО КАЖДОЙ ГЛАВЕ ПОСОБИЯ;
- ПРОБНЫЕ ВАРИАНТЫ ЕГЭ для подготовки к экзаменам.

В СЕРИЮ

ПОЛНЫЙ КУРС
ПОДГОТОВКИ К **ЕГЭ**

ВХОДЯТ ОБУЧАЮЩИЕ ПОСОБИЯ ПО СЛЕДУЮЩИМ
ПРЕДМЕТАМ:

- РУССКИЙ ЯЗЫК
- ФИЗИКА
- МАТЕМАТИКА
- ОБЩЕСТВОЗНАНИЕ
- ЛИТЕРАТУРА
- БИОЛОГИЯ
- ХИМИЯ

ISBN 978-5-17-079488-1



9 785170 794881 >

Аванта