

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ОДЕССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Т.Е. Расторгуева, Е.А. Галич, Н.А. Ткаченко

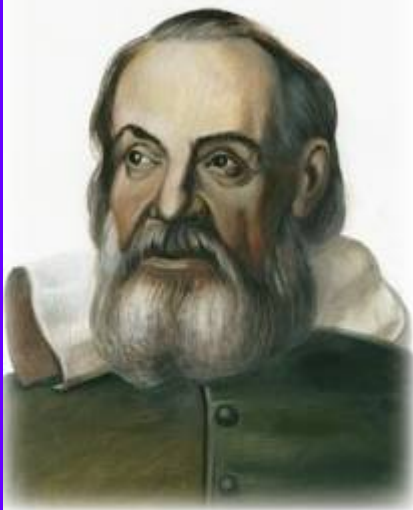
# ФИЗИКА

Конспект лекций

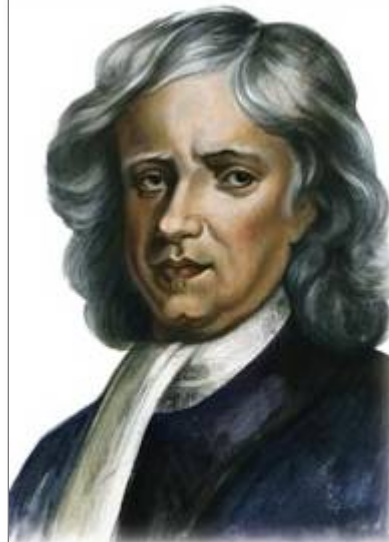
(для иностранных слушателей подготовительного отделения)



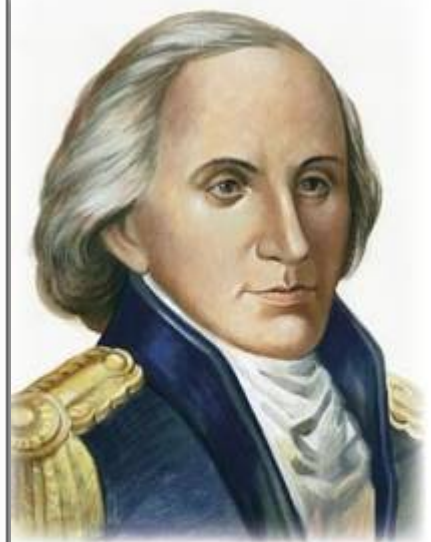
Одесса 2013



Галилео Галилей  
(1564-1642)



Исаак Ньютон  
(1642-1727)



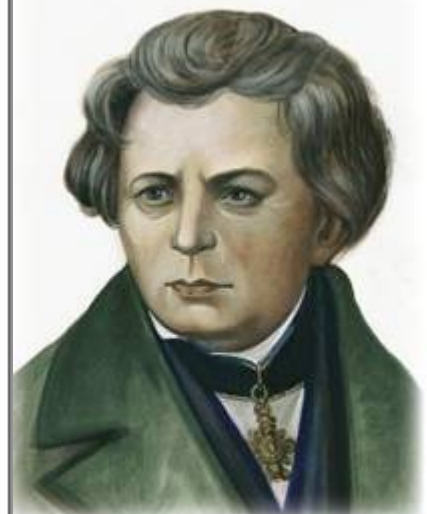
Кулон Шарль Огюстен  
(1736-1806)



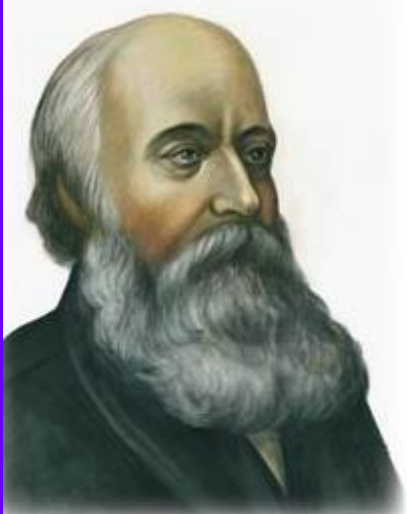
Алессандро Вольта  
(1745-1827)



Андре-Мари Ампер  
(22.01.1775 - 10.06.1836)



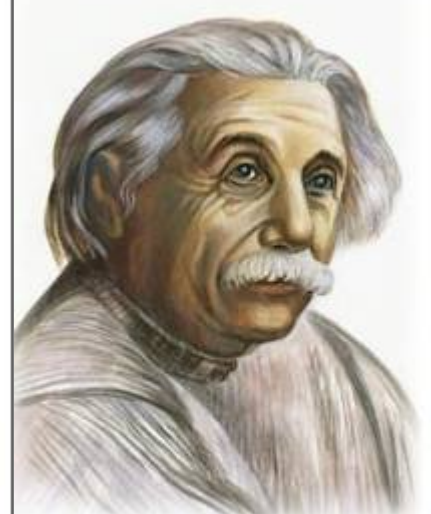
Георг Ом  
(1787-1854)



Джеймс Джоуль  
(1818-1889)



Генрих Герц  
(1857-1894)



Альберт Эйнштейн  
(1879-1955)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ОДЕССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

## **ФИЗИКА**

Конспект лекций

(для иностранных слушателей подготовительного отделения)

Одесса 2013

ББК 22.3  
Р 24  
УДК 53

Печатается по решению Ученого Совета Одесского Государственного  
экологического университета  
(протокол № 10 от 29.11.2012 г.)

Расторгуева Т.Е., Галич Е.А., Ткаченко Н.А.  
Физика. Конспект лекций (для иностранных слушателей  
подготовительного отделения)

В конспекте лекций содержится необходимый объем учебной информации, обеспечивающий усвоение основ курса физики на русском языке и углубление знаний в области тех явлений и законов физики, которые необходимы иностранным студентам при обучении в вузе. Структура и содержание конспекта соответствует “Программе по дисциплине “Физика” (довузовская подготовка иностранных граждан) Киев, 2005”, [14].

Соответственно программа конкретизация целей и задач преподавания представлена на основе специфических особенностей системы обучения, преемственности в обучении на подготовительных факультетах и первых курсов вузов. Для обеспечения доступности усвоения учебного материала иностранными слушателями тексты лекций адаптированы и содержат необходимый объем лексики конструкций научного стиля речи в соответствии с “Программой по русскому языку для студентов – иностранцев (довузовская подготовка иностранных граждан), Киев, 2005”, [14].

Первый раздел “Кинематика” адаптирован максимально и рассчитан на начало изучения физики после прохождения вводно – грамматического и вводно - фонетического курсов русского языка. В конспекте широко представлен наглядный материал: структурно – логические схемы, таблицы, графики, рисунки. Включены вопросы для самопроверки.

Содержание конспекта соответствует “Программе внешнего независимого тестирования по физики”, Киев, 2011г., [16].

Конспект также может быть использован для довузовской подготовки украинских учащихся.

Одесский государственный  
экологический университет, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b> .....	8
<b>1 Основные понятия физики. Разделы физики</b> .....	11
1.1 Физические величины. Единицы измерения физических величин.....	13
1.2 Скалярные и векторные физические величины.....	15
1.2.1 Общие понятия.....	15
1.2.2 Операции с векторами.....	16
<b>2 Механика</b> .....	22
2.1 Основные понятия механики. Основная задача механики.....	22
<b>3 Кинематика материальной точки</b> .....	25
3.1 Основные понятия и параметры кинематики.....	25
3.2 Прямолинейное движение материальной точки (по оси $Ox$ ).....	34
3.2.1 Прямолинейное равнопеременное движение материальной точки.....	37
3.2.2 Прямолинейное равномерное движение материальной точки.....	41
3.2.3 Прямолинейное равномерное движение относительно разных систем отсчета.....	42
3.2.4 Свободное падение.....	44
3.3 Кинематика криволинейного движения материальной точки.....	48
3.3.1 Движение материальной точки под углом к горизонту.....	48
3.3.2 Вращательное движение.....	51
3.3.3 Равномерное движение по окружности.....	51
<b>4 Динамика материальной точки</b> .....	56
4.1 Основные законы динамики.....	56
4.1.1 Понятие силы.....	56
4.1.2 Первый закон Ньютона. Масса тела.....	57
4.1.3 Второй закон Ньютона в классической и релятивистской механике.....	59
4.1.4 Третий закон Ньютона.....	60
4.2 Силы в механике.....	63
4.2.1 Гравитационные силы.....	63
4.2.2 Движение искусственных спутников Земли.....	65
4.2.3 Силы упругости.....	66
4.2.4 Силы трения.....	68
4.3 Движение тел под действием системы сил.....	73
4.3.1 Поступательное движение тела под действием системы сил.....	73
4.3.2 Равномерное движение тел по окружности под действием системы сил.....	75
4.4 Динамика твердого тела.....	79
4.4.1 Общие понятия.....	79
4.4.2 Элементы статики. Условия и виды равновесия твердого тела....	82

<b>5</b>	<b>Законы сохранения в механике</b>	85
5.1	Закон сохранения импульса	85
5.2	Энергия. Виды энергии. Закон сохранения энергии	90
5.2.1	Механическая энергия. Механическая работа	91
5.2.2	Виды механической энергии и связь их с работой	92
5.2.3	Закон сохранения механической энергии	97
5.2.4	Мощность	99
5.2.5	Простые механизмы	100
<b>6</b>	<b>Элементы механики жидкостей и газов</b>	105
6.1	Статика жидкостей и газов	105
6.1.1	Основные понятия	105
6.1.2	Закон Паскаля	106
6.1.3	Гидростатическое давление жидкости	106
6.1.4	Закон Архимеда	109
6.1.5	Атмосферное давление	112
6.2	Гидродинамика	114
6.2.1	Уравнение неразрывности струи	114
6.2.2	Давление движущейся жидкости	115
<b>7</b>	<b>Молекулярная физика и термодинамика</b>	118
7.1	Основные положения молекулярно-кинетической теории	118
7.1.1	Основные параметры молекулярно-кинетической теории	119
7.1.2	Тепловые явления. Температура	120
7.1.3	Особенности теплового движения частиц	123
7.1.4	Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа (уравнение Клаузиуса)	124
7.2	Основы кинетической теории газов	127
7.2.1	Уравнение состояния идеального газа (уравнение Клайперона - Менделеева)	127
7.2.2	Газовые законы	127
7.2.3	Закон Дальтона	131
7.3	Основы термодинамики	133
7.3.1	Внутренняя энергия и ее изменение при теплопередаче и совершении работы	134
7.3.2	Первый закон термодинамики. Адиабатический процесс	140
7.3.3	Второй закон термодинамики	142
<b>8</b>	<b>Агрегатное состояние вещества. Свойства вещества в различных агрегатных состояниях</b>	148
8.1	Агрегатное состояние вещества	148
8.2	Тепловое расширение твердых и жидких тел	149
8.3	Фазовые переходы	150
8.4	Свойства твердых тел	153
8.5	Свойства жидкостей	154
8.6	Свойства пара	157

<b>9</b>	<b>Основы электродинамики</b>	162
9.1	Электростатика	162
9.1.1	Электрический заряд. Электризация тел. Закон сохранения заряда	162
9.1.2	Взаимодействие зарядов. Закон Кулона	163
9.1.3	Электрическое поле. Электростатическое поле. Напряженность электрического поля. Принцип суперпозиции полей	164
9.1.4	Работа в электростатическом поле. Потенциал поля. Разность потенциалов двух точек поля. Напряжение	167
9.1.5	Электрическое поле в веществе	171
9.1.6	Электрическая емкость. Конденсаторы. Энергия электрического поля	174
9.2	Постоянный электрический ток	179
9.2.1	Электрический ток. Сила тока. Плотность тока	179
9.2.2	Сопротивление металлических проводников. Проводимость	180
9.2.3	Электродвижущая сила (ЭДС)	181
9.2.4	Электрическая цепь	182
9.2.5	Закон Ома	183
9.2.6	Способы соединения проводников	184
9.2.7	Соединение источников электропитания (источников ЭДС)	187
9.2.8	Работа и мощность тока. Закон Джоуля-Ленца	188
9.3	Токи проводимости	191
9.3.1	Электрический ток в металлах. Контактная разность потенциалов	191
9.3.2	Электрический ток в электролитах. Законы электролиза	191
9.3.3	Электрический ток в газах. Газовый разряд. Понятие о плазме	193
9.3.4	Электрический ток в вакууме (ток переноса)	195
9.3.5	Электрический ток в полупроводниках	197
<b>10</b>	<b>Электромагнетизм</b>	202
10.1	Магнитное поле. Магнитная индукция	202
10.1.1	Магнитная индукция прямого, кругового тока и соленоида	203
10.1.2	Действие магнитного поля на проводник с током	204
10.1.3	Закон взаимодействия параллельных токов	205
10.1.4	Действие магнитного поля на движущийся заряд (сила Лоренца)	207
10.1.5	Магнитный поток	208
10.1.6	Магнитное поле в веществе	209
10.2	Электромагнитная индукция	211
10.2.1	Явление электромагнитной индукции	211
10.2.2	Самоиндукция. Индуктивность. Взаимная индукция. Энергия магнитного поля	212

<b>11</b>	<b>Физика колебаний</b> .....	217
11.1	Колебательное движение.....	217
11.1.1	Основные понятия.....	217
11.1.2	Гармонические колебания. Уравнения гармонических колебаний.....	217
11.2	Механические колебания и волны.....	219
11.2.1	Свободные колебания.....	219
11.2.2	Затухающие колебания. Вынужденные колебания. Резонанс.....	221
11.3	Механические волны.....	222
11.3.1	Продольные и поперечные волны. Луч. Длина волны. Фронт волны .....	222
11.3.2	Звук. Звуковые волны. Скорость звука. Интенсивность, высота и тембр звука.....	223
11.4	Электромагнитные колебания и волны.....	226
11.4.1	Колебательный контур. Свободные электромагнитные колебания.....	226
11.4.2	Вынужденные электрические колебания. Переменный ток... ..	228
11.4.3	Электромагнитные волны.....	231
<b>12</b>	<b>Оптика</b> .....	235
12.1	Геометрическая оптика.....	235
12.1.1	Прямолинейное распространение света в однородной среде..	235
12.1.2	Законы отражения света.....	236
12.1.3	Законы преломления света. Полное отражение света.....	236
12.1.4	Сферические линзы. Основные понятия.....	237
12.2	Волновая оптика.....	240
12.2.1	Монохроматический свет. Преломление света.....	240
12.2.2	Дисперсия света.....	241
12.2.3	Интерференция света.....	241
12.2.4	Дифракция света.....	242
12.2.5	Поляризация света.....	243
<b>13</b>	<b>Специальная теория относительности (Частная теория относительности)</b> .....	245
13.1	Постулаты СТО. Преобразования Лоренца. Выводы СТО.....	245
13.3	Релятивистский закон сложения скорости.....	246
13.4	Импульс тела и масса в СТО.....	246
13.5	Закон взаимосвязи массы и энергии.....	247
<b>14</b>	<b>Квантовая оптика</b> .....	248
14.1	Теория Планка. Импульс фотона.....	248
14.2	Фотоэффект и его законы.....	248
14.3	Фотоэлементы и их применение.....	249
14.4	Световое давление.....	250
<b>15</b>	<b>Атом и атомное ядро</b> .....	252
15.1	Физика атома.....	252



15.1.1 Планетарная модель атома Розерфорда.....	252
15.1.2 Постулаты Бора. Теория атома водорода.....	253
15.1.3 Поглощение и излучение света атомом.....	257
15.1.4 Лазер.....	259
15.2 Физика атомного ядра.....	262
15.2.1 Открытие протона и нейтрона.....	262
15.2.2 Теория строения ядра.....	263
15.2.3 Энергия связи ядра. Дефект массы .....	264
15.2.4 Ядерные реакции.....	266
15.2.5 Естественная радиоактивность.....	267
15.2.6 Закон радиоактивного распада.....	267
15.2.7. Правило смещения.....	268
15.2.8 Искусственная радиоактивность. Ядерный реактор .....	269
15.2.9 Методы регистрации ионизирующих излучений.....	271
<b>Литература</b> .....	<b>274</b>
<b>Приложение</b> .....	<b>276</b>

## ВВЕДЕНИЕ

*Физика* – важнейшая наука, изучающая самые глубокие законы природы. Она изучает простейшие и вместе с тем наиболее общие свойства окружающего нас материального мира. Поэтому понятия физики и ее законы лежат в основе любого раздела естествознания.

Современная физическая картина мира – квантово-полевая.

Теоретическая основа – квантово-релятивистская.

Разделение материи на вещество и поле условно.

Корпускулярно-волновой дуализм присущ всем видам материи.

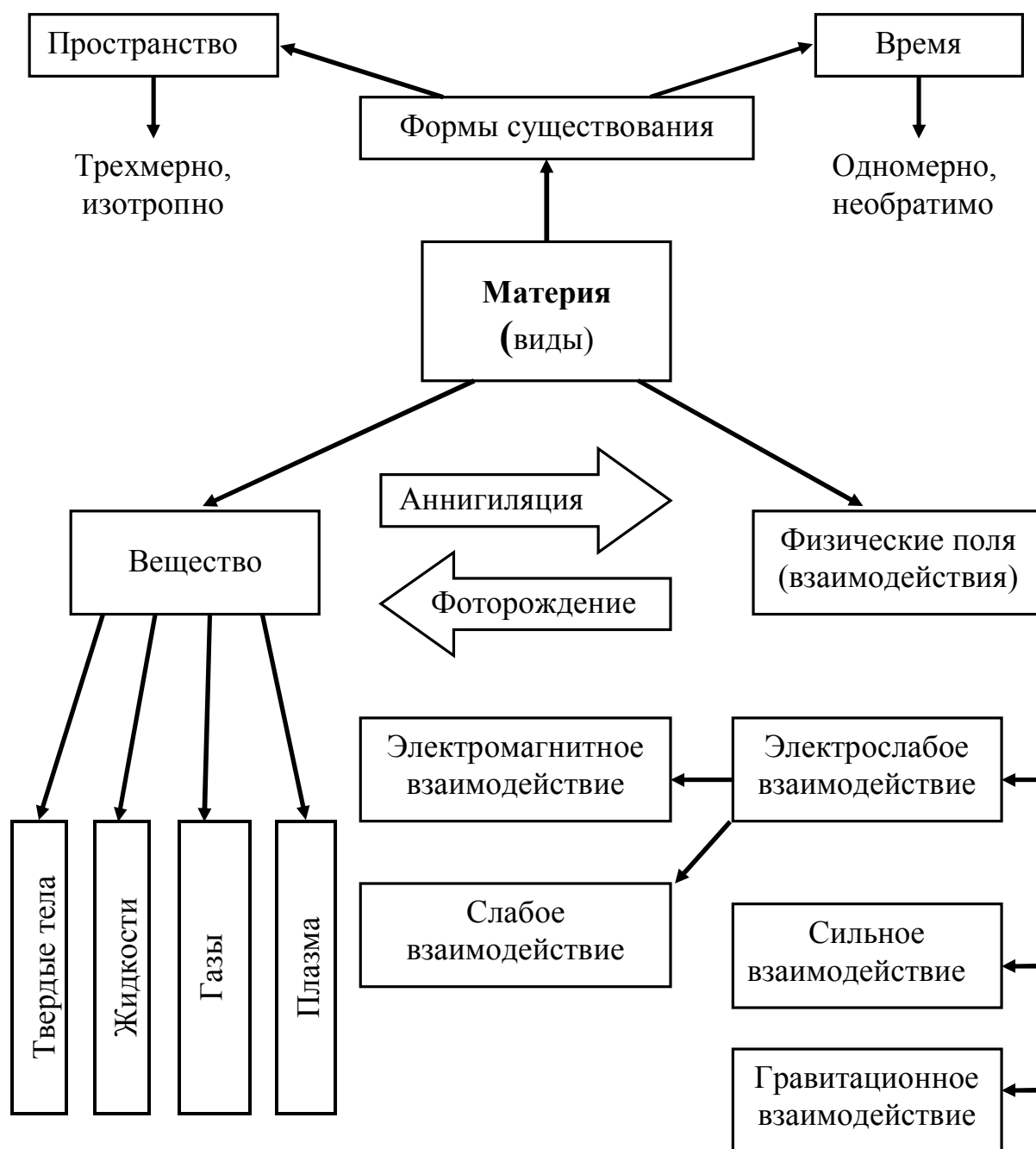


Рис. В-1 Физическая картина мира

**Материя** – это категория философии, которая обозначает объективную реальность. Все объекты природы – это **материальные объекты**.

Есть два вида материи – вещество и поле. Например, вода – это вещество, свет – это поле.

**Вещество** – это материальный объект, который имеет массу покоя.

**Поле** – это материальный объект, который не имеет массы покоя.



Рис. В-2 Общие свойства и формы движения материи

Любое изменение материи (в пространстве и во времени) называется **движением**. Материя существует только в движении и не может существовать без него.

Изменение состояния (свойства, движения) материальных объектов вызывается взаимодействием этих объектов.

Физика изучает физические свойства материальных объектов и физические формы движения материи (физические явления).

## *Новые слова, словосочетания и языковые конструкции*

аннигиляция	изотропно	поле
вид	изучать	природа
вещество	масса	пространство
взаимодействие	материя	свойство
время	материальный объект	существовать
движение	наука	физика
естествознание	обратимо	форма
изменение	объективная реальность	фоторождение
	покой	

1. **Что - это что.**

**Вода – это вещество, свет – это поле.**

2. **Что называется (назвать) чем.**

**Любое изменение материи называется движением.**

3. **Что существует как**

**Материя существует только в движении.**

4. **Что изучает что.**

**Физика изучает физические свойства материальных объектов и физические формы движения материи.**

### *Контрольные вопросы*

1. Что такое материя?
2. Назовите виды материи.
3. Что такое вещество?
4. Что такое поле?
5. Назовите общие свойства материи.
6. Что такое движение?
7. Какие формы движения материи вы знаете?
8. Как существует материя?
9. Что изучает физика?

# 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ФИЗИКИ. РАЗДЕЛЫ ФИЗИКИ



Рис. 1.1 Физические виды взаимодействия. Разделы физики

Свойства материального объекта характеризуют его общность или различие с другими объектами. Свойства материальных объектов можно познать только при сравнении с другими объектами.

Примеры **частных** физических свойств вещества: размер, форма, цвет, запах, масса, твёрдость, упругость, агрегатное состояние.

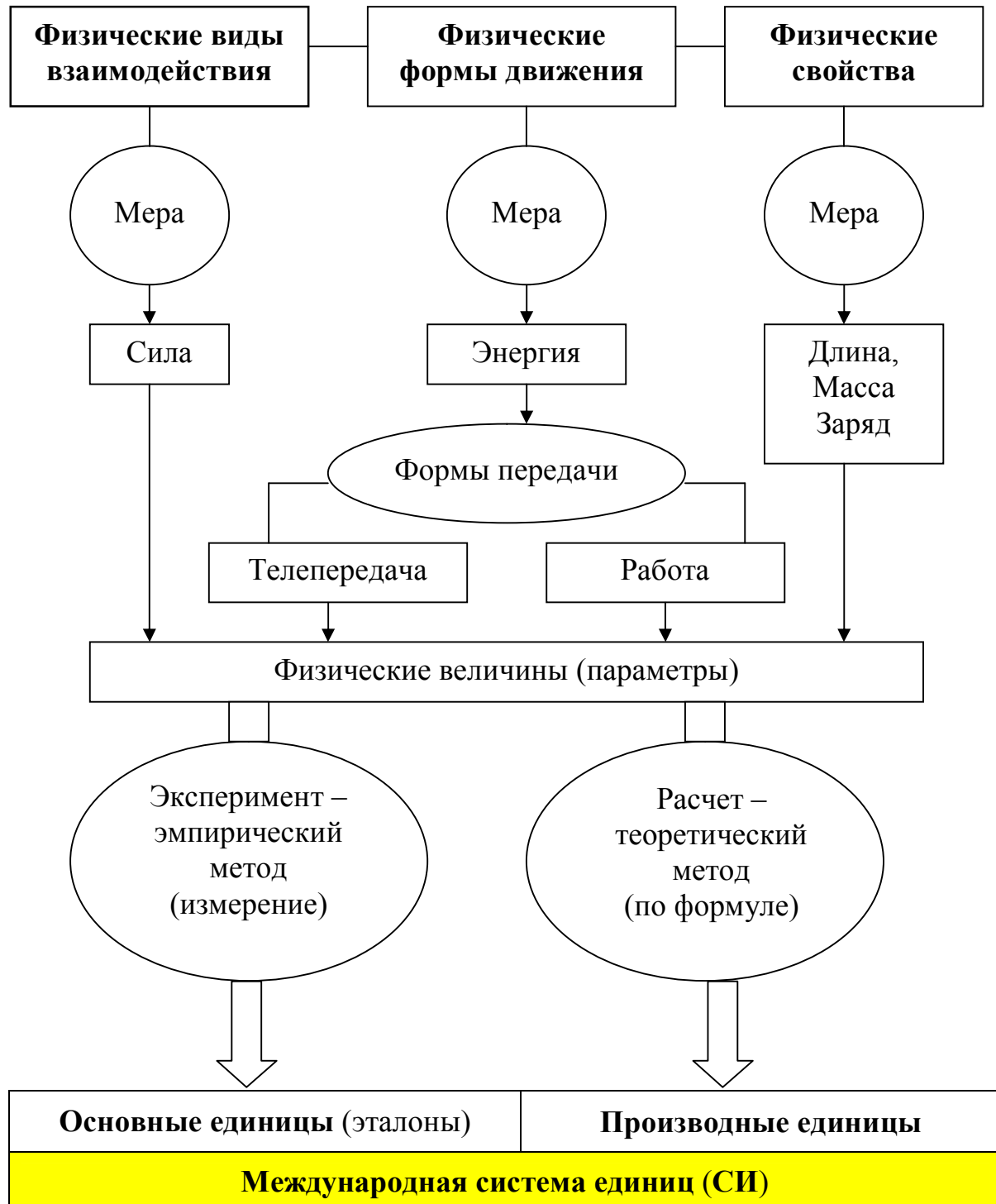


Рис. 1.2 Основные понятия физики

## 1.1 Физические величины. Единицы измерения физических величин

Физика изучает физические формы движения и свойства объектов при помощи наблюдений и опытов (экспериментов).

Физика – точная наука, т.е. в ее основе лежит изучение не только качественных, но и количественных соотношений, поэтому любой физический опыт связан с измерениями.

*Характеристика (мера) физического явления или свойства объекта, которую можно измерить называется **физической величиной (параметром)**.*

*Измерить физическую величину – значит сравнить ее с единицей этой величины (эталоном).*

Очевидно, что для каждой физической величины должна быть своя единица измерения. *Число, полученное в результате измерения, называется **числовым значением физической величины***. Числовые значения обязательно надо записывать с размерностью (например, 5 м, 7 кг), чтобы было ясно, с какой единицей измерения производилось сравнение.

Наличие различных единиц измерения в отдельных странах тормозило развитие науки и мешало торговле. Поэтому в 1889 г. была создана Международная Генеральная конференция по мерам и весам, которая для всех стран установила одинаковые единицы измерения. Были установлены единицы измерения важнейших физических величин: длины, массы, силы и времени. Для двух первых были изготовлены образцы. Так, образец метра был изготовлен в виде стержня из сплава платины и иридия. *Образец единицы измерения, который условились считать единственно подлинным, называется **международным эталоном данной единицы измерения***. Однако международные эталоны единиц измерения не являются вечными. Так, в настоящее время в качестве эталона длины принят **метр** – длина, равная 1 650 763,73 длин световых волн в вакууме определенной оранжевой линии в спектре излучения атома криптона -86.

В качестве эталона времени принята **секунда** – промежуток времени, равный 9192631770 периодам электромагнитного излучения, соответствующего определенному переходу в атоме цезия - 133. Не исключено, что технический прогресс приведет к точности, которая и эти новые эталоны заменит на более совершенные. (Ранее 1 секунда определялась как 1/86400 часть средних солнечных суток.)

Для каждой физической величины существует своя единица измерения.

Единицы разделяют на два вида: основные и производные. Размер основной единицы выбирают независимо от размеров других величин.

Размер производной единицы определяется математической зависимостью с другими величинами (по формулам).

Совокупность основных и производных единиц составляет систему единиц измерения физических величин. В 1961 г. в СССР была принята международная система единиц – **СИ (система интернациональная)** (табл. 1.1 и табл. 1.2).

Таблица 1.1 – Единицы измерения физических величин в СИ

Величина		Единица	
Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
<b>Основные</b>			
Длина	$l$	Метр	м
Масса	$m$	Килограмм	кг
Время	$t$	Секунда	с
Температура	$T$	Кельвин	К
Сила тока	$I$	Ампер	А
Сила света	$J$	Кандела	кд
Количество вещества	$\nu$	Моль	моль
<b>Дополнительные</b>			
Плоский угол	$\varphi$	Радиян	рад
Телесный угол	$\Omega$	Стерadian	ср

Таблица 1.2 – Производные единицы, имеющие специальное название

Наименование величины	Единица		
	Наименование	Обозначение	Соотношение с единицами СИ
Частота	Герц	Гц	$1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$
Сила, вес	Ньютон	Н	$1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2$
Давление, (механическое) напряжение, модуль упругости	Паскаль	Па	$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н} / \text{м}^2$
Энергия, работа, количество теплоты	Джоуль	Дж	$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$
Мощность, поток излучения	Ватт	Вт	$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж} / \text{с}$
Электрический заряд, количество электричества	Кулон	Кл	$1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$



Продолжение таблицы 1.2

Электрический потенциал, разность потенциалов, (электрическое) напряжения, электродвижущая сила	Вольт	В	1 В = 1 Вт/А
Электрическая емкость	Фарад	Ф	1 Ф = 1 Кл/В
Электрическое сопротивление	Ом	Ом	1 Ом = 1 В/А
Электрическая проводимость	Сименс	См	1 См = 1 Ом <sup>-1</sup>
Магнитный поток (поток магнитной индукции)	Вебер	Вб	1 Вб = 1 В·с
Магнитная индукция, плотность магнитного потока	Тесла	Тл	1 Тл = 1 Вб/м <sup>2</sup>
Индуктивность, взаимная индуктивность	Генри	Гн	1 Гн = 1 Вб/м
Световой поток	Люмен	лм	1 лм = 1 кд·ср
Освещенность	Люкс	лк	1 лк = 1 лм/м <sup>2</sup>

## 1.2 Скалярные и векторные физические величины

### 1.2.1 Общие понятия

**Скалярная величина (скаляр)** – это величина, которая имеет только **численное значение** (положительное или отрицательное).

Например: время ( $t$ ), масса ( $m$ ), температура ( $T$ ).

Скалярные величины складывают алгебраически

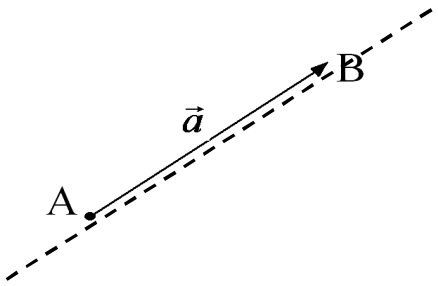
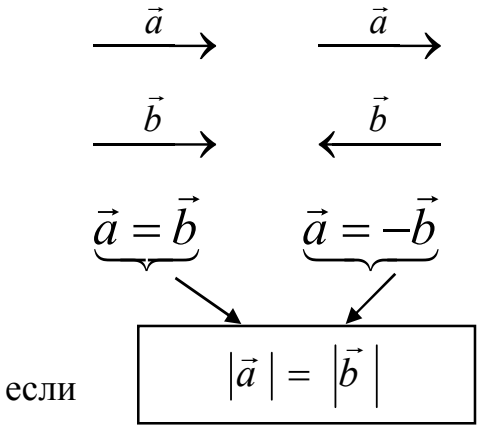
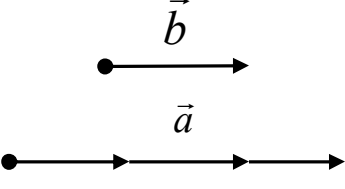
$$a + b = c \quad (1.1)$$

Например:  $3 + 5 = 8$ ;  $3 - 5 = -2$ .

**Векторная величина (вектор  $\vec{a}$ )** – это величина, которая имеет **численное значение – модуль** (положительное) и **направление** в пространстве.

Например: сила ( $\vec{F}$ ), скорость ( $\vec{v}$ ), ускорение ( $\vec{a}$ ) и т.д.

Таблица 1.3 – Векторные величины

	<p><math>\vec{a}</math> – это <u>вектор</u>.          А – начало вектора <math>\vec{a}</math>.          В – конец вектора <math>\vec{a}</math>.  <math> \vec{a}  = a</math> – это <u>модуль</u> вектора (длина вектора)          - - - - - линия действия вектора <math>\vec{a}</math>.</p>
 <p>если <math> \vec{a}  =  \vec{b} </math></p>	<p><math>\vec{a} \parallel \vec{b}</math> – <u>параллельные</u> векторы.  <math>\vec{a} \uparrow \vec{b}</math> – <u>сонаправленные</u> векторы  <math>\vec{a} \updownarrow \vec{b}</math> – <u>противонаправленные</u> векторы.</p>
	<p><math>\vec{a} = k\vec{b}</math>,          если <math>k = 3</math>,          тогда <math>\vec{a} = 3\vec{b}</math></p> <p>При умножении вектора на скаляр (<math>k</math>) - получим вектор, параллельный данному, линейные размеры которого изменены в <math>k</math> раз.</p>

### 1.2.2 Операции с векторами

**Свободные векторы** – это векторы которые **не изменяют результат действия при параллельном переносе**. Их можно переносить параллельно. Например: вектор скорости  $\vec{v}$ , ускорения  $\vec{a}$ .

**Связанные векторы** – это векторы, которые **изменяют результат действия при параллельном переносе**. Их нельзя переносить параллельно, можно – только по линии действия.

Например: вектор силы  $\vec{F}$ .

- **Сложение векторов.** Векторные величины складывают геометрически:

$$\vec{a} + \vec{b} = \vec{c}, \quad (1.2)$$

где  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  – составляющие векторы;

$\vec{c}$  – результатирующий вектор.

Векторные величины складывают по двум правилам:

- по правилу треугольника, многоугольника (только для свободных векторов) (табл. 1.4);
- по правилу параллелограмма (для всех векторов) (табл. 1.5).

Таблица 1.4 – Правило треугольника (многоугольника)

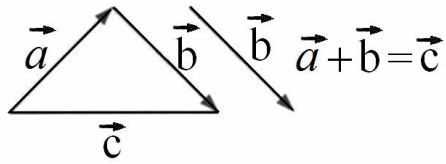
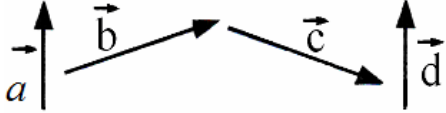
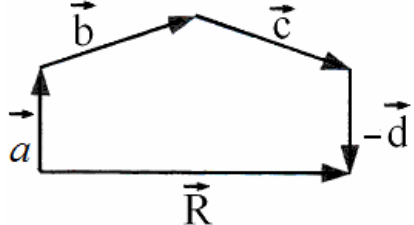
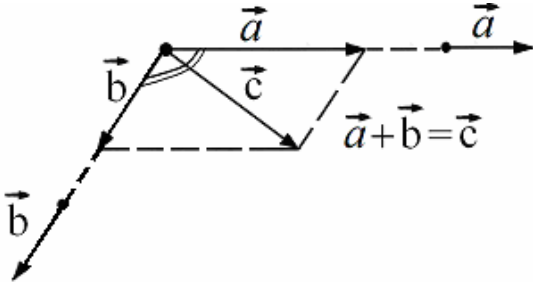
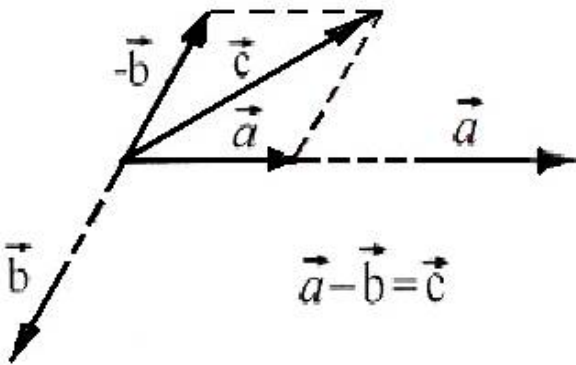
	<p>Все векторы переносят параллельно заданным.</p> <p>Чтобы найти результирующий вектор <math>\vec{c}</math>, нужно перенести начало вектора <math>\vec{b}</math> в конец вектора <math>\vec{a}</math>.</p> <p>Вектор <math>\vec{c}</math> соединяет начало вектора <math>\vec{a}</math> и конец вектора <math>\vec{b}</math>.</p>
<p>Пример сложения нескольких векторов: (правило многоугольника)</p>	
<p>Даны свободные векторы:</p>  <p>Найти: <math>\vec{R} = \vec{a} + \vec{b} + \vec{c} - \vec{d}</math></p>	<p>Чтобы найти <u>результирующий</u> вектор <math>\vec{R}</math>, нужно перенести начало вектора <math>\vec{b}</math> в конец вектора <math>\vec{a}</math>, затем начало вектора <math>\vec{c}</math> в конец вектора <math>\vec{b}</math>, начало вектора <math>\vec{d}</math> с противоположным направлением (<math>-\vec{d}</math>) в конец вектора <math>\vec{c}</math>.</p>
	<p><math>\vec{R}</math> – результирующий вектор, соединяет начало вектора <math>\vec{a}</math> и конец вектора <math>-\vec{d}</math>.</p>

Таблица 1.5 – Правило параллелограмма

	<p>Чтобы найти результирующий вектор <math>\vec{c}</math>, нужно соединить начало вектора <math>\vec{a}</math> с началом вектора <math>\vec{b}</math>, перемещая вдоль линий действия.</p> <p>Векторы <math>\vec{a}</math> и <math>\vec{b}</math> – это стороны параллелограмма. Вектор <math>\vec{c}</math> – это <u>диагональ</u> параллелограмма.</p>
---	--

	<p>Соединяем начало вектора <math>\vec{a}</math> с началом вектора <math>-\vec{b}</math>, перемещая их вдоль линий действия (- - -). Вектор <math>-\vec{b}</math> по модулю равен вектору <math>\vec{b}</math>, но имеет <u>противоположное направление</u>.</p> <p>На векторах <math>\vec{a}</math> и <math>-\vec{b}</math> строим <u>параллелограмм</u>. <u>Диагональ</u> параллелограмма <math>\vec{c}</math> – <u>резльтирующий вектор</u>.</p>
<p>Численное значение (модуль) вектора <math>c</math> определяется</p> $ \vec{c}  = c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \alpha},$ <p>где <math>\alpha = (\vec{a}, \vec{b})</math> – угол между векторами <math>\vec{a}</math> и <math>\vec{b}</math>.</p>	

■ Разложение вектора на составляющие (компоненты)

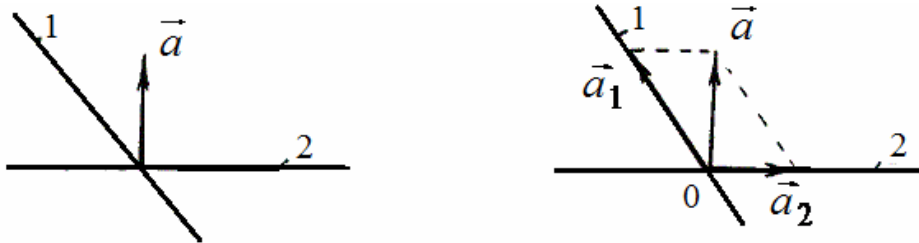
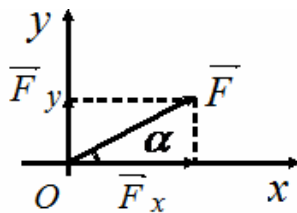


Рис. 1.1 Разложение вектора по заданным направлениям

Разложение вектора  $\vec{a}$  на компоненты по заданным направлениям 1 и 2 проводят по правилу параллелограмма, т. к.  $\vec{a}_1 + \vec{a}_2 = \vec{a}$ , где  $\vec{a}_1, \vec{a}_2$  – составляющие вектора  $\vec{a}$ .



$$\vec{F} = \vec{F}_x + \vec{F}_y,$$

$$\vec{F}_x = \vec{F} \cdot \cos \alpha,$$

$$\vec{F}_y = \vec{F} \cdot \sin \alpha.$$

Рис. 1.2 Разложение вектора по осям  $Ox, Oy$

■ Проекция вектора на ось координат:

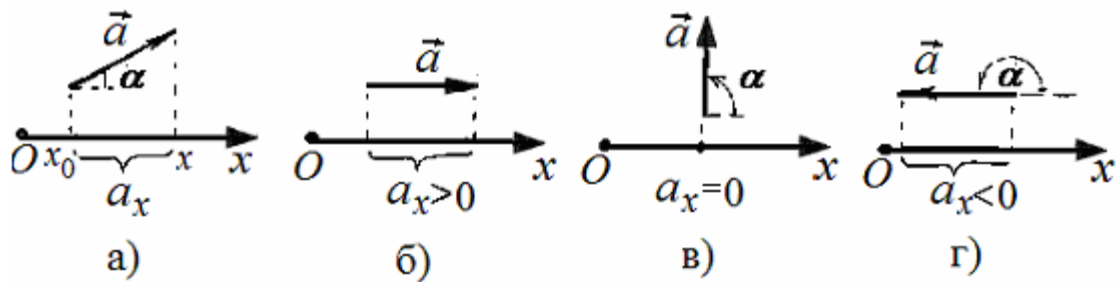


Рис. 1.3 Проекция вектора на ось  $Ox$ : а)  $\alpha > 0$ ; б)  $\alpha = 0$ ; в)  $\alpha = 90^\circ$ ;  
г)  $\alpha = 180^\circ$

*Проекция вектора на ось – это скаляр, который можно определить по формулам:*

$$a_x = a \cdot \cos \alpha, \quad (1.3)$$

где  $a \equiv |\vec{a}|$ ,  $\alpha = (\vec{a}, Ox)$ ;

или

$$a_x = x - x_0, \quad (1.4)$$

где  $x_0, x$  – координаты начала и конца вектора  $\vec{a}$ .

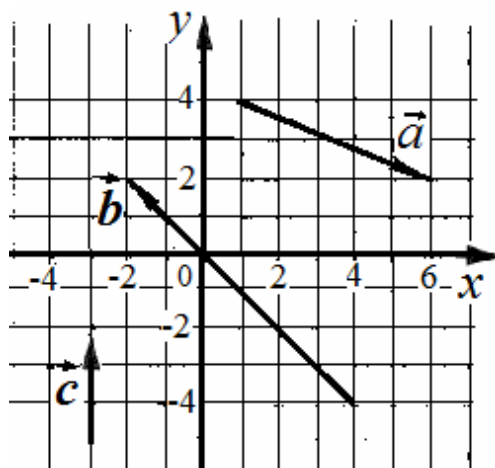
Если  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\cos \alpha = 1$ , тогда  $a_x = a > 0$ ,  $\vec{a} \uparrow \uparrow [Ox)$ ;

$\alpha = 90^\circ$ ,  $\cos \alpha = 0$ , тогда  $a_x = 0$ ,  $\vec{a} \perp [Ox)$ ;

$\alpha = 180^\circ$ ,  $\cos \alpha = -1$ , тогда  $a_x = -a < 0$ ,  $\vec{a} \downarrow \uparrow [Ox)$ .

**Примеры:**

1) На координатной плоскости  $xOy$  даны векторы  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$ . Найти проекции этих векторов на оси координат  $Ox$ ,  $Oy$  и их модули.



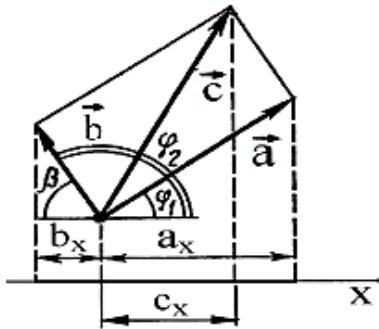
$$a_x = x - x_0 = 6 - 1 = 5;$$

$$a_y = y - y_0 = 2 - 4 = -2;$$

$$|\vec{a}| = a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2};$$

$$a = \sqrt{5^2 + (-2)^2} = \sqrt{29} \approx 5,385.$$

2) Проекция результирующего вектора  $\vec{c}$  на ось  $Ox$  равна алгебраической сумме проекций составляющих векторов на эту ось.



$$\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}; \quad c_x = a \cos \varphi_1 + b \cos \varphi_2.$$

Так как  $\cos \varphi_2 = -\cos \beta$ ,

тогда  $c_x = a \cos \varphi_1 - b \cos \beta$ .

Но  $b \cos \beta$  численно равно  $b_x$ ,

следовательно,  $c_x = a_x - b_x$  – это арифметическое равенство.

Рис. 1.4 Проекция результирующего вектора  $\vec{c}$  на ось  $Ox$

■ **Скалярное произведение двух векторов:**

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos \alpha, \quad (1.5)$$

где  $\alpha = (\vec{a}, \vec{b})$  – угол между направлениями векторов.

**Будем обозначать:**

$\vec{a}$  – вектор;

$|\vec{a}|$  или  $a$  – модуль вектора  $\vec{a}$ ;

$\vec{a}_x$  – составляющая (компонента) вектора  $\vec{a}$  в направлении оси  $Ox$ ;

$a_x$  – проекция вектора  $\vec{a}$  на ось координат  $Ox$ .

***Новые слова, словосочетания и языковые конструкции***

вектор  
величина  
геометрически  
диагональ  
единица  
зависимость  
заряд  
измерение  
инертность  
интернациональный  
квант  
колебание  
компонента  
координата  
мера  
механика

модуль  
молекулярный  
наблюдение  
оптика  
опыт (эксперимент)  
основной  
параллелограмм  
параметр  
продолжительность  
размерность  
проекция  
производный  
протяженность  
работа  
раздел  
разложение

результат  
свободный  
связанный  
сила  
система  
скаляр  
совокупность  
составлять  
сравнить  
теплота  
термодинамика  
формула  
электродинамика  
энергия  
эталон  
явление

**1. Что характеризует что.**

**Свойства материального объекта характеризуют его общность и различие с другими объектами.**

**2. Что изучает как.**

**Физика изучает физические формы движения и физические свойства объектов при помощи наблюдений и опытов (экспериментов).**

**3. Инфинитив - значит + инфинитив.**

**Измерить физическую величину – значит сравнить ее с единицей этой величины (эталоном).**

**4. В качестве чего принято что.**

**В качестве эталона длины принят метр.**

**5. Что разделяют на что.**

**Единицы разделяют на два вида: основные и производные.**

**6. Что составляет что.**

**Совокупность основных и производных единиц составляет систему единиц измерения физических величин.**

**7. Что складывают как.**

**Скалярные величины складывают арифметически, векторные величины – геометрически.**

***Контрольные вопросы***

1. Назовите физические формы движения материи. Приведите примеры.
2. Что такое физические явления?
3. Что характеризует свойство материального объекта?
4. Назовите общие физические свойства материальных объектов.
5. Приведите примеры конкретных физических свойств вещества.
6. Как изучают физические явления и физические свойства?
7. Что такое физическая величина?
8. Что значит измерить физическую величину?
9. Какие бывают единицы? Как определяют размер единиц?
10. Что составляет международную систему единиц (СИ)?
11. Какие физические величины называют скалярными? Приведите примеры.
12. Какие физические величины называют векторными? Приведите пример.
13. По каким правилам складывают (раскладывают) векторные величины?
14. Что такое проекция вектора на ось?

## 2 МЕХАНИКА

*Механика – раздел физики, который изучает законы механического движения.*

### **Разделы механики:**

- кинематика материальной точки;
- динамика материальной точки;
- динамика твердого тела. Элементы статики;
- законы сохранения в механике;
- элементы механики жидкостей и газов.

### **2.1 Основные понятия механики. Основная задача механики**

***Механическое движение** – это изменение положения физического тела относительно других тел в пространстве с течением времени.*

***Физическое тело** – это материальный объект, который имеет форму и размеры. Например, самолёт, Солнце, Земля.*

***Абсолютно твердое тело** – тело которое ни при каких условиях не может деформироваться и при всех условия расстояние между двумя точками тела остается постоянным.*

***Материальная точка** – это модель (абстракция) тела, размеры и форму которого можно не учитывать в данной задаче. В одной задаче тело может быть материальной точкой, в другой оно не является материальной точкой. Например, при движении Земли относительно Солнца. Земля – материальная точка. В задаче о движении самолёта из Одессы в Москву материальная точка – это самолёт, но не Земля.*

***Основная задача механики** – определить положение тела в пространстве в любой момент времени по заданным начальным условиям – координатам, скорости и действующим на него силам.*

Для решения этой задачи нужно выбрать систему отсчета (рис. 2.1):

- 1) тело отсчета;
- 2) систему координат  $(x, y, z)$ ;
- 3) способ измерения: координат, времени.

***Тело отсчета** – тело, относительно которого определяют положение других тел.*

***Траектория** – это линия, которую описывает точка в пространстве при движении (табл. 2.1).*



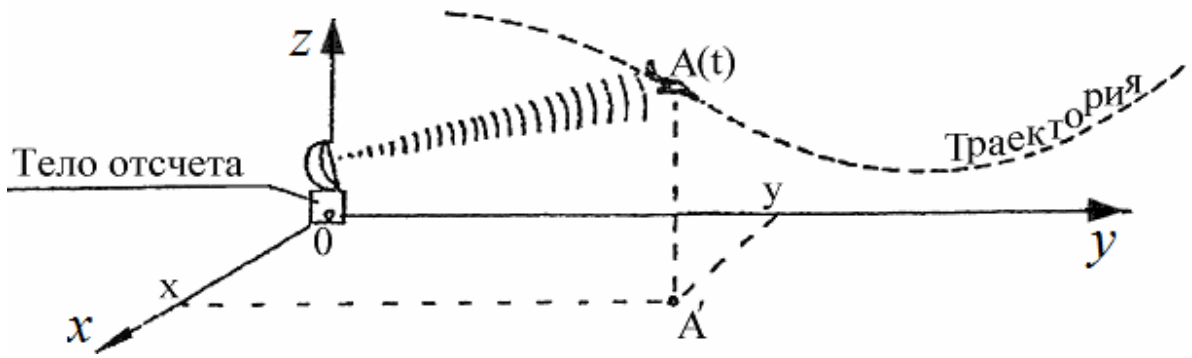
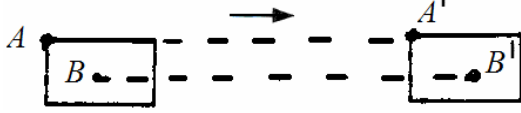
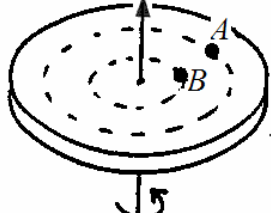


Рис. 2.1 Основные понятия механики

Таблица 2.1 – Виды механического движения по форме траектории

Для точки	1) Траектория – <u>прямая линия</u>	
		↓
	Прямолинейное движение.	
	2) Траектория – <u>кривая линия</u>	
		↓
	Криволинейное движение.	

Для тела	1) Траектории всех точек тела – <u>конгруэнтные (одинаковые)</u> :  Поступательное движение.
	2) Траектории всех точек тела – <u>окружности</u> с центрами на одной оси:  Вращательное движение.

Механическое движение, покой и форма траектории – понятия относительные, т.к. зависят от выбора тела отсчета:



Рис. 2.2 Относительность механического движения

**Новые слова, словосочетания и языковые конструкции**

абстракция	начало	скорость
вращательное (вращение)	окружность	система
динамика	описывать	скорость
задано	определить	сохранить
задача	ось	способ
закон	относительно	статика
кинематика	отсчет	течение
кривая	положение	траектория
линия	поступательное	учитывать
модель	прямая	центр
материальная точка	размер	элемент

**1. Что это что.**

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

**2. Что определяют относительно чего.**

Положение тела в пространстве определяют относительно тела отсчета.

### 3. Для чего нужно это.

Для решения основной задачи механики нужно выбрать систему отсчета.

#### Контрольные вопросы

1. Что изучает механика?
2. Что такое механическое движение?
3. Что такое физическое тело?
4. Что такое материальная точка? Приведите пример.
5. Относительно чего определяют изменение положения тела?
6. Что такое тело отсчета?
7. Как можно определить положение тела в пространстве?
8. Что составляет систему отсчета?
9. Что называют траекторией?

## 3 КИНЕМАТИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

**Кинематика** – часть механики, которая изучает механическое движение (не интересуясь причинами изменения механического состояния объектов) без учета сил, которые приложены к движущимся объектам.

**Задача кинематики** – определить положение материальной точки  $A$  в любой момент времени  $t$ , т.е. найти конкретный вид зависимости  $\vec{r}(t)$  или  $x(t), y(t), z(t)$ .

Кинематика отвечает на вопрос: как движется тело?

### 3.1 Основные понятия и параметры кинематики

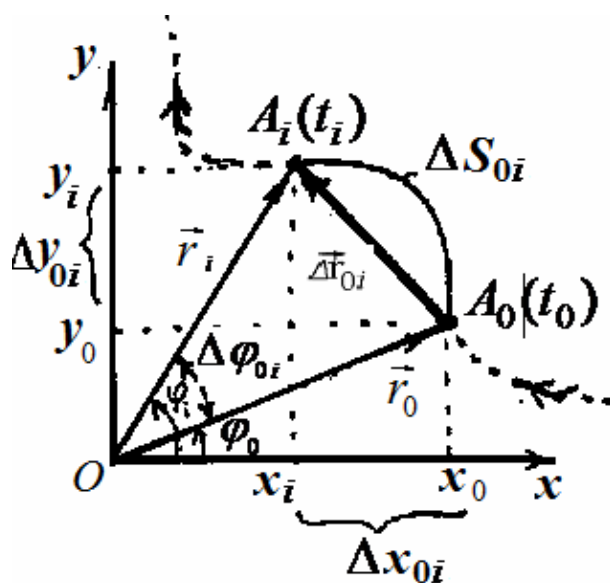


Рис. 3.1 Движение материальной точки в плоскости координат  $xOy$

- 1)  $A_0(t_0)$  – **начальное положение** точки в момент времени  $t_0$ .
- 2)  $A_i(t_i)$  – **конечное (новое) положение** точки в новый момент времени  $t_i$ .
- 3)  $t_i - t_0 = \Delta t_{0i}$  – **промежуток (интервал) времени** (время движения).
- 4) **Радиус-вектор** ( $\vec{r}$ ) – вектор, который показывает положение точки в пространстве относительно начала отсчета ( $O$ ).
- 5) **Перемещение** ( $\Delta \vec{r} = \vec{r}_i - \vec{r}_0$ ) – вектор, который показывает новое положение точки относительно ее начального положения.
- 6) **Координаты точки A** ( $x, y, z$ ) – расстояния на осях координат  $Ox, Oy, Oz$  (проекции радиус-вектора на эти оси):

$$\left. \begin{aligned} x_0 = r_{0x} &= |\vec{r}_0| \cdot \cos \varphi_0 \\ y_0 = r_{0y} &= |\vec{r}_0| \cdot \sin \varphi_0 \end{aligned} \right\} \text{Начальные координаты точки } A_0(x_0, y_0, z_0, t_0).$$

$$\left. \begin{aligned} x_i = r_{ix} &= |\vec{r}_i| \cdot \cos \varphi_i \\ y_i = r_{iy} &= |\vec{r}_i| \cdot \sin \varphi_i \end{aligned} \right\} \text{Конечные (новые) координаты точки } A_i(x_i, y_i, z_i, t_i)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{0i} &= x_i - x_0 \\ \Delta y_{0i} &= y_i - y_0 \\ \Delta z_{0i} &= z_i - z_0 \end{aligned} \right\} \text{Изменение координат точки за время движения } \Delta t_{0i}$$

Модуль вектора перемещения равен:

$$|\Delta \vec{r}_{0i}| = \sqrt{\Delta r_x^2 + \Delta r_y^2 + \Delta r_z^2} = \sqrt{\Delta x_{0i}^2 + \Delta y_{0i}^2 + \Delta z_{0i}^2}, [\Delta r] = 1 \text{ м}. \quad (3.1)$$

7) **Длина пути** ( $\Delta S_{0i} = S_i - S_0$ ) – длина отрезка траектории, который проходит точка за время движения  $\Delta t_{0i}$ .

$\Delta S_{0i}$  - скалярная величина, всегда  $\Delta S_{0i} \geq 0$ ,  $[\Delta S] = 1 \text{ м}$

Длина пути и перемещение – разные параметры:

$$\Delta S_{0i} \neq |\Delta \vec{r}_{0i}|, \quad \Delta S_{0i} \geq |\Delta \vec{r}_{0i}|.$$

8)  $\varphi_i - \varphi_0 = \Delta \varphi_{0i}$  – **угол поворота** радиус-вектора за время  $\Delta t_{0i}$ ,  $[\varphi] = 1 \text{ рад}$ .

9) **Скорость** ( $v$ ) – это параметр, который показывает, как быстро движется материальная точка;  $[v] = 1 \text{ м/с}$ , (табл. 3.1).

▪ **Средняя скорость** ( $v_{cp}$ ) – это такая постоянная скорость, при которой материальная точка может пройти тот же путь за то же время, как при реальной переменной скорости (рис. 3.2).  $v_{cp}$  – не является физической величиной, это – техническая характеристика.

▪ **Средняя линейная скорость прохождения пути** ( $v_{cp}$ ) за промежуток времени  $\Delta t_{0i}$  равна отношению длины пройденного пути  $\Delta S_{0i}$  к этому промежутку времени,  $v_{cp}$  – величина скалярная.

▪ **Средняя линейная скорость перемещения** ( $\vec{v}_{cp}$ ) за время  $\Delta t_{0i}$  равна отношению перемещения  $\Delta \vec{r}_{0i}$  к этому промежутку времени,  $\vec{v}_{cp}$  – величина векторная.

В общем случае  $v_{cp} \neq |\vec{v}_{cp}|$ , так как  $\Delta S_{0i} \neq |\Delta \vec{r}_{0i}|$  (рис. 3.3).

▪ **Средняя угловая скорость**  $\omega_{cp}$  за время  $\Delta t_{0i}$  равна отношению угла поворота  $\Delta \varphi_{0i}$  к этому промежутку времени,  $[\omega] = 1 \text{ рад/с}$ .

**Задача.** Автомобиль проехал 30 км со скоростью 15 м/с, затем 40 км - за 1 ч. Какова средняя скорость движения автомобиля на всем пути?

**Решение**

<p><b><u>Дано:</u></b>  <math>l_1 = 30 \text{ км};</math>  <math>v_1 = 15 \text{ м/с};</math>  <math>l_2 = 40 \text{ км};</math>  <math>t_2 = 1 \text{ ч}.</math></p>	<p><b><u>СИ:</u></b>  <math>l_1 = 3 \cdot 10^4 \text{ м};</math>  <math>v_1 = 15 \text{ м/с};</math>  <math>l_2 = 4 \cdot 10^4 \text{ м};</math>  <math>t_2 = 3,6 \cdot 10^3 \text{ с}</math></p>	<p>Движение автомобиля неравномерно, так как он изменил свою скорость. Обозначим пройденный путь, скорость и время движения на первом участке соответственно <math>l_1</math>, <math>v_1</math>, и <math>t_1</math>, на втором <math>l_2</math>, <math>v_2</math>, и <math>t_2</math>. Запишем условие задачи:</p> $v_{cp} = \frac{l}{t} = \frac{l_1 + l_2}{t_1 + t_2}.$
<p><math>v_{cp} - ?</math></p>		

Из формулы средней скорости, видим, что нам неизвестно  $t_1$ . Найдем его по известным  $l_1$  и  $v_1$ :  $t_1 = \frac{l_1}{v_1}$

и подставим в формулу средней скорости:  $v_{cp} = \frac{l_1 + l_2}{\frac{l_1}{v_1} + t_2}$ .

**Вычисления:**

$$v_{cp} = \frac{(3 \cdot 10^4 + 4 \cdot 10^4) \text{ м}}{\left(\frac{3 \cdot 10^4}{15} + 3,6 \cdot 10^3\right) \text{ с}} = \frac{7 \cdot 10^4 \text{ м}}{(2 \cdot 10^3 + 3,6 \cdot 10^3) \text{ с}} = \frac{7 \cdot 10^4 \text{ м}}{5,6 \cdot 10^3 \text{ с}} = 12,5 \text{ м/с}$$

**Ответ:**  $v_{cp} = 12,5 \text{ м/с}$ .

▪ **Мгновенная скорость**  $\vec{v}_i$  – это скорость в данный момент времени  $t_i$  в данной точке траектории. Это скорость при  $\Delta t_{0i} \rightarrow 0$ .

Мгновенная линейная скорость  $\vec{v}_i$  – это физическая величина, которая имеет две характеристики: числовое значение (скаляр) и направление (вектор). Так как при  $\Delta t_{0i} \rightarrow 0$   $\Delta S_{0i} = |\Delta \vec{r}_{0i}|$  скаляр мгновенной скорости равен модулю вектора мгновенной скорости:  $v_i = |\vec{v}_i|$ .

Таблица 3.1 – Скорость

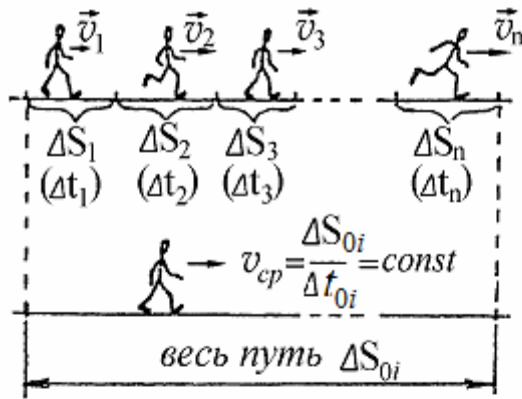


Рис. 3.2

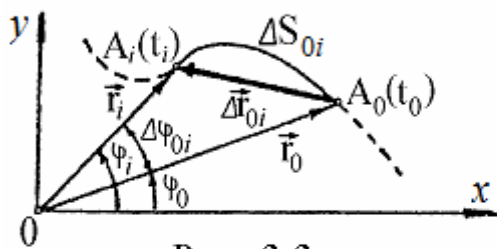


Рис. 3.3

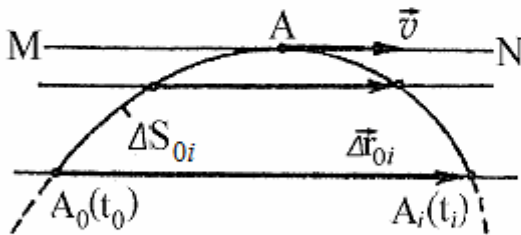


Рис. 3.4

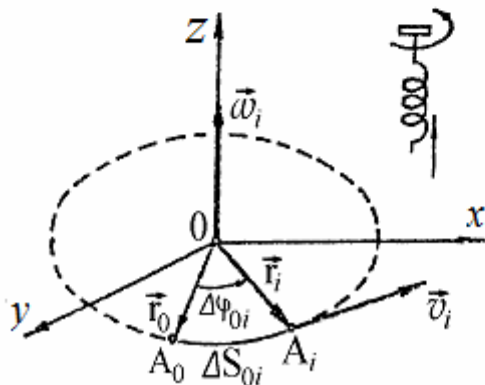


Рис. 3.5

Если  $\Delta t_{0i} = t_i - t_0, i = 1, 2, 3, \dots, n$ , тогда

➤ средняя линейная скорость прохождения пути:

$$v_{cp} = \frac{\text{весь путь}}{\text{всё время}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta S_i}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i} = \frac{\Delta S_{0i}}{\Delta t_{0i}} = \text{const};$$

➤ средняя линейная скорость перемещения:

$$v_{cp} = \frac{\text{перемещение}}{\text{всё время}} = \frac{\Delta \vec{r}_{0i}}{\Delta t_{0i}} = \frac{\vec{r}_i - \vec{r}_0}{t_i - t_0}.$$

Обратите внимание!

$$\Delta S_{0i} \neq |\Delta \vec{r}_{0i}|; \Delta v_{cp} \neq |\Delta \vec{v}_{cp}|.$$

➤ средняя угловая скорость:

$$\vec{\omega}_{cp} = \frac{\text{угол поворота}}{\text{всё время}} = \frac{\Delta \vec{\varphi}_{0i}}{\Delta t_{0i}} = \frac{\vec{\varphi}_i - \vec{\varphi}_0}{t_i - t_0}.$$

Если  $t_i \rightarrow t_0, \Delta t_{0i} \rightarrow 0$ , то  $\Delta S_{0i} = |\Delta \vec{r}_{0i}|$

➤ мгновенная линейная скорость:

$$\left. \begin{aligned} \text{предел } v_{cp} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S_{0i}}{\Delta t_{0i}} = v_i \\ \text{предел } \vec{v}_{cp} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}_{0i}}{\Delta t_{0i}} = \vec{v}_i \end{aligned} \right\} v_i = |\vec{v}_i|.$$

➤ мгновенная угловая скорость:

$$\text{предел } \vec{\omega}_{cp} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{\varphi}_{0i}}{\Delta t_{0i}} = \vec{\omega}_i.$$

Обратите внимание!

$\vec{r}_i \perp \vec{v}_i \perp \vec{\omega}_i$  — взаимно перпендикулярные векторы

Вектор  $\vec{v}$  мгновенной линейной скорости направлен по касательной  $MN$  к траектории (рис. 3.4).

Вектор мгновенной угловой скорости направлен по оси вращения. Направление вектора  $\vec{\omega}$  определяют по правилу винта (рис. 3.5).

**10) Ускорение** ( $\vec{a}$ ) – это параметр, который показывает, как быстро изменяется скорость при движении,  $[a] = 1 \text{ м/с}^2$  (табл. 3.2).

- **Средним ускорением** ( $\vec{a}_{cp}$ ) за промежуток времени  $\Delta t_{0i}$  называется физическая величина, численно равная отношению изменения скорости  $\Delta \vec{v}_{0i}$  к этому промежутку времени (рис. 3.6).

- **Мгновенным ускорением** ( $\vec{a}_i$ ) называется физическая величина, численно равная пределу, к которому стремится среднее ускорение за бесконечно малый промежуток времени  $\Delta t \rightarrow 0$ , т.е. производная от вектора скорости по времени.

Вектор  $\vec{a}_i$  можно разложить на две составляющие: тангенциальную  $\vec{a}_\tau$ , которая направлена по касательной к траектории ( $\vec{a}_\tau \parallel \vec{v}_i$ ), и нормальную  $\vec{a}_n$ , которая перпендикулярна к касательной ( $\vec{a}_n \perp \vec{v}_i$ ) (рис. 3.7).  $\vec{a}_\tau$  показывает изменение линейной скорости только по модулю,  $\vec{a}_n$  – изменение линейной скорости только по направлению.

Модуль вектора нормального ускорения  $\vec{a}_n$  прямо пропорционален квадрату модуля линейной скорости  $v_i^2$ , и обратно пропорционален радиусу кривизны  $R_i$  траектории движения точки;

$$\vec{a}_n = \frac{v_i^2}{R_i}. \quad (3.2)$$

Модуль вектора мгновенного ускорения  $\vec{a}_i$  можно определить по теореме Пифагора

$$|\vec{a}_i| = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}. \quad (3.3)$$

- **Мгновенное угловое ускорение** ( $\vec{\varepsilon}_i$ ) численно равно пределу, к которому стремится среднее угловое ускорение  $\vec{\varepsilon}_{cp}$  за бесконечно малый промежуток времени  $\Delta t \rightarrow 0$ ,  $[\varepsilon] = 1 \text{ рад/с}^2$ .

Направление вектора углового ускорения  $\vec{\varepsilon}_i$  совпадает с направлением вектора изменения угловой скорости  $\Delta \vec{\omega}$  (рис. 3.8).

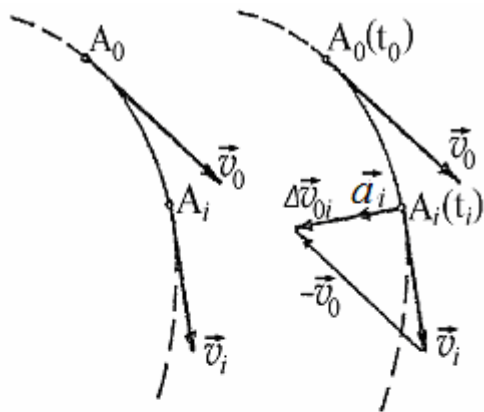


Рис. 3.6



Рис. 3.7

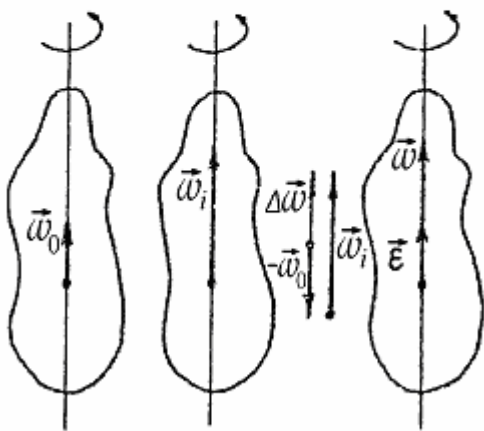


Рис. 3.8

Таблица 3.2 – Ускорение

Если  $\Delta t_{0i} = t_i - t_0, i = 1, 2, 3, \dots, n$ , тогда

➤ среднее линейное ускорение:

$$\vec{a}_{cp} = \frac{\Delta \vec{v}_{0i}}{\Delta t_{0i}} = \frac{\vec{v}_i - \vec{v}_0}{t_i - t_0},$$

где  $\Delta \vec{v}_{0i}$  - вектор изменения линейной скорости за время  $\Delta t_{0i}$ .

Если  $t_i \rightarrow t_0, \Delta t_{0i} \rightarrow 0$ , тогда

➤ мгновенное линейное ускорение:

$$\text{предел } \vec{a}_{cp} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}_{0i}}{\Delta t_{0i}} = \vec{a}_i.$$

Обратите внимание!

Направления векторов  $\Delta \vec{v}_{0i}$  и  $\vec{a}_i$  совпадают.

Составляющие мгновенного линейного ускорения:

$$\vec{a}_i = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n;$$

$$\vec{a}_\tau \parallel \vec{v}_i, \vec{a}_n \perp \vec{v}_i, \alpha = \left( \vec{a}_i, \vec{v}_i \right)$$

$$a_\tau = |\vec{a}_i| \cdot \cos \alpha, \quad a_n = |\vec{a}_i| \cdot \sin \alpha;$$

$$|\vec{a}_n| = \frac{v_i^2}{R_i}, \quad |\vec{a}_i| = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}.$$

Если  $\Delta t_{0i} = t_i - t_0$ , тогда

➤ среднее угловое ускорение:

$$\vec{\epsilon}_{cp} = \frac{\Delta \vec{\omega}_{0i}}{\Delta t_{0i}} = \frac{\vec{\omega}_i - \vec{\omega}_0}{t_i - t_0},$$

где  $\Delta \vec{\omega}_{0i}$  - вектор изменения угловой скорости за время  $\Delta t_{0i}$ .

Если  $t_i \rightarrow t_0, \Delta t_{0i} \rightarrow 0$ , тогда

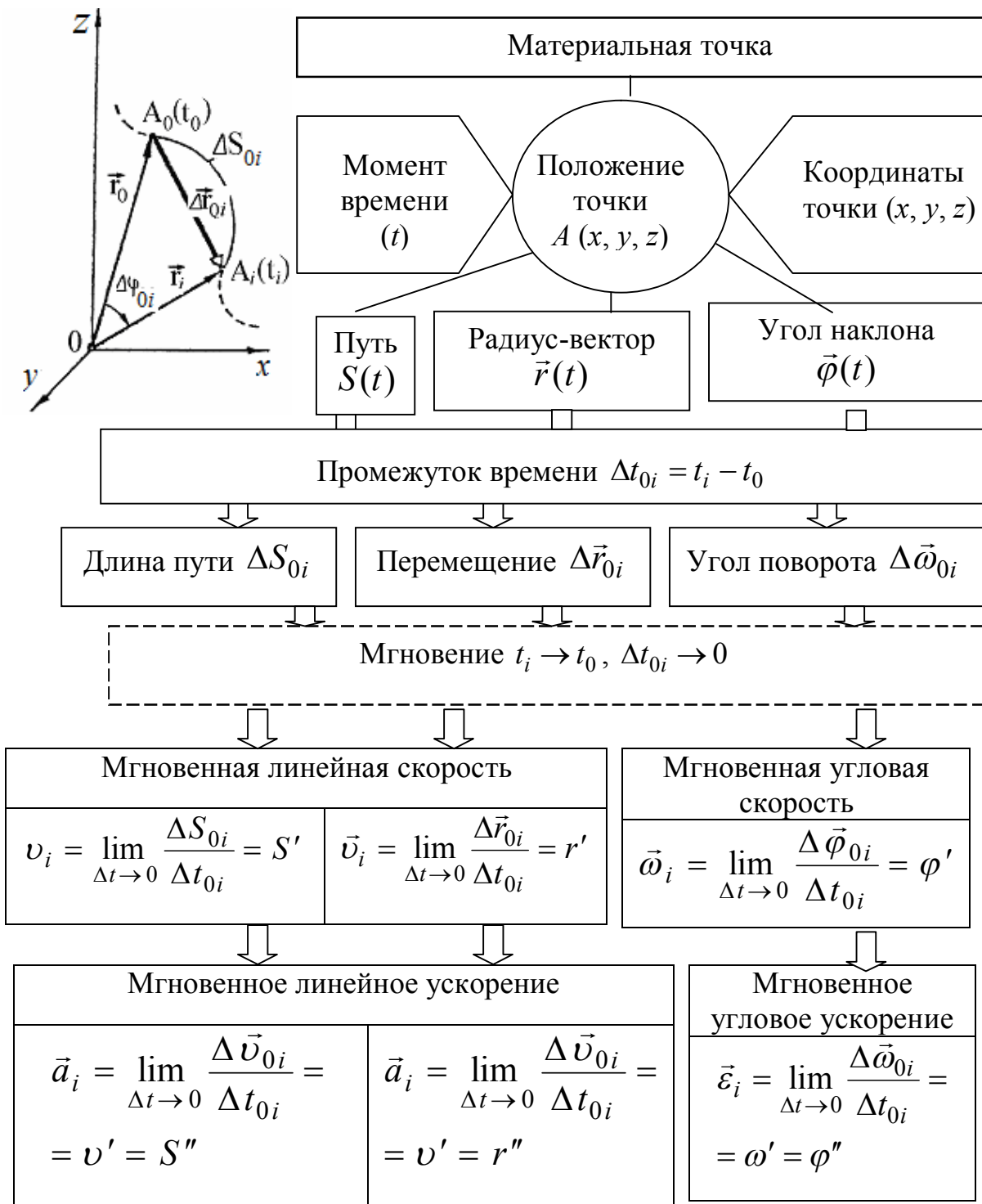
➤ мгновенное угловое ускорение:

$$\text{предел } \vec{\epsilon}_{cp} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{\omega}_{0i}}{\Delta t_{0i}} = \vec{\epsilon}_i$$

Обратите внимание!

Направления векторов  $\Delta \vec{\omega}_{0i}$  и  $\vec{\epsilon}_i$  совпадают.





знаки (') и (") в схеме - первая и вторая производные

Рис. 3.9 Параметры кинематики

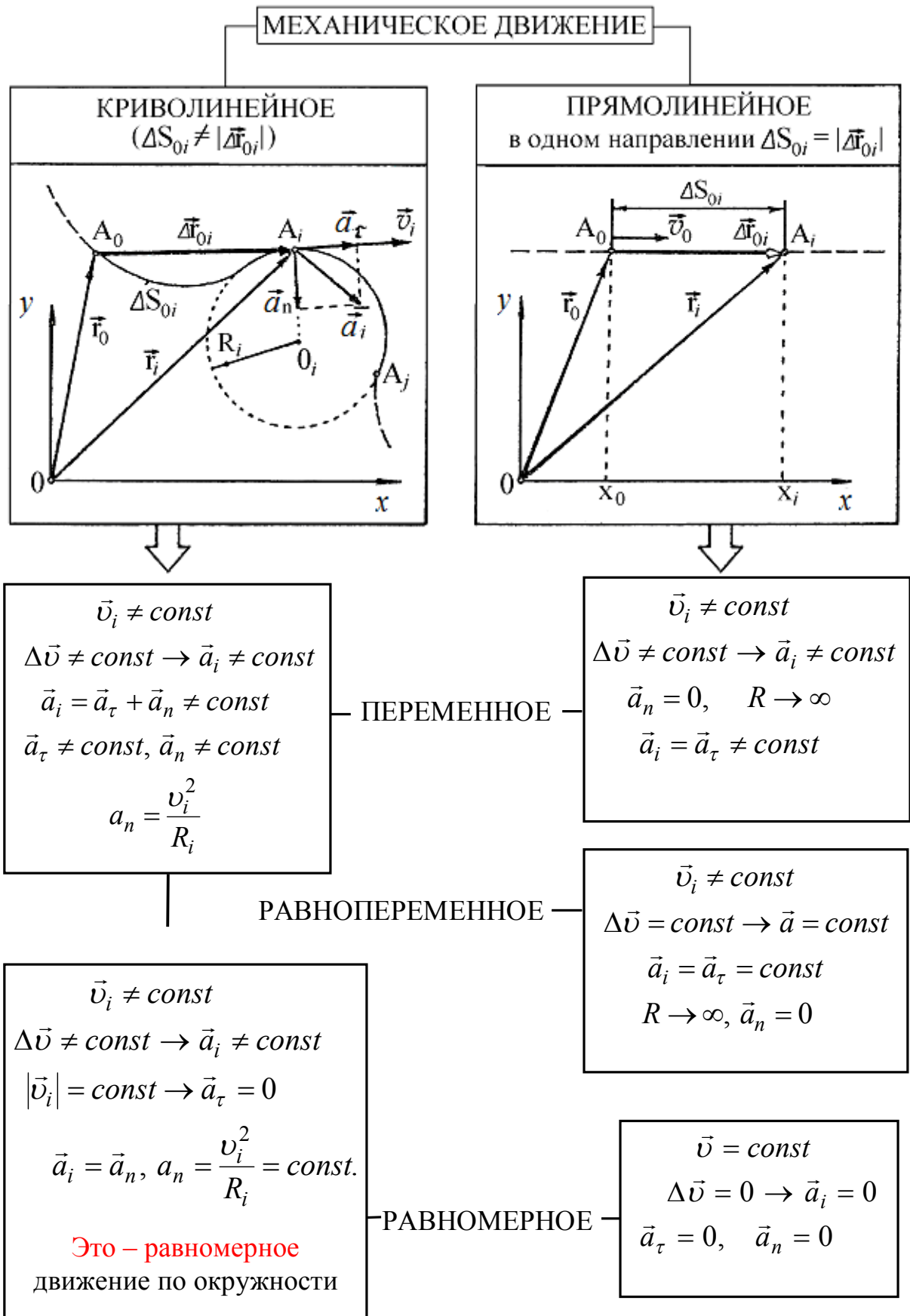


Рис. 3.10 Зависимость вида механического движения от его параметров

### ***Новые слова, словосочетания и языковые конструкции***

интервал (промежуток)	отношение	путь (длина пути)
касательная	отрезок	радиус - вектор
конец	параметр	различие
конкретный	перемещение	скорость
кривизна	перпендикулярно	совпадать
линейный	понятие	средняя
малый	правило	стремиться
мгновенный	предел	тангенциально
момент	производная	теорема
начало	промежуток (интервал)	угол поворота
нормальный	пропорционально	ускорение
обратно	прямо	характеристика
		число

1. **Что показывает что.**

**Скорость** – это **параметр**, который **показывает как быстро движется** материальная точка

2. **Что направлено как.**

**Вектор мгновенной линейной скорости** **направлен по касательной** к траектории.

3. **Что определяют как.**

**Направление вектора мгновенной угловой скорости** **определяют по правилу винта**

4. **Что равно чему.**

**Модуль средней линейной скорости** ( $v_{cp}$ ) **равен всему пути** ( $\Delta s_{0i}$ ) **деленному на все время движения** ( $\Delta t_{0i}$ )

### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое кинематика? Что она изучает?
2. Что называют параметрами кинематики?
3. Что такое радиус-вектор?
4. Что такое промежуток времени?
5. Что такое длина пути (путь)?
6. Что такое перемещение?

7. Как определить модуль вектора перемещения?
8. Чем отличаются параметры длина пути  $\Delta S_{0i}$  и перемещение  $\Delta \vec{r}_{0i}$ ?
9. Что называют углом поворота?
10. Что такое скорость? Что такое средняя скорость?
11. Как определить среднюю линейную скорость прохождения пути?
12. Как определить среднюю линейную скорость перемещения?
13. Чем отличаются  $v_{cp}$  и  $\vec{v}_{cp}$ ?
14. Как определить среднюю угловую скорость?
15. Что такое мгновенная скорость?
16. Какие характеристики имеет мгновенная линейная скорость?
17. Как направлен вектор  $\vec{v}$ ?
18. Как направлен вектор  $\vec{\omega}$ ?
19. Что такое ускорение?
20. Что называется средним ускорением?
21. Что называется мгновенным ускорением?
22. Как можно разложить вектор линейного мгновенного ускорения?
23. Что показывают составляющие  $\vec{a}_\tau$  и  $\vec{a}_n$ ?
24. Как определить модуль  $\vec{a}_i$  по его составляющим?
25. Чему равен модуль вектора нормального ускорения?
26. Чему равно мгновенное угловое ускорение?
27. Как направлен вектор углового ускорения?
28. Как зависит вид механического движения от его параметров?

### 3.2 Прямолинейное движение материальной точки (по оси $Ox$ )

Если совместить одну из осей координат (например  $Ox$ ) с прямолинейной траекторией движения (рис. 3.11), то координата  $y = const = 0$ ,  $z = const = 0$ ,  $x(t)$ ;  $\vec{a}_n = \vec{0}$ ;  $\vec{a}_i = \vec{a}_\tau$ .



Рис. 3.11 а) движение по оси  $Ox$ ; б) движение против оси  $Ox$

$$\Delta \vec{r} \parallel \vec{v}_i \parallel \vec{a}_i \parallel [Ox) \Rightarrow \begin{cases} |\Delta \vec{r}_{0i}| = |\Delta r_x| = |\Delta x_{0i}| = \Delta S_{0i}; \\ |\vec{v}_i| = |v_x| = v_i; \\ |\vec{a}_i| = |a_x| = a_i. \end{cases} \quad (i = 0 \dots n). \quad (3.4)$$

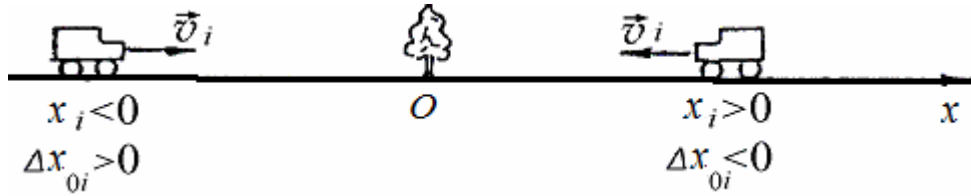


Рис. 3.12

Если точка движется в одном направлении, то  $\Delta S_{0i} = |\Delta x_{0i}|$ .

**Правило знаков:**

Всегда  $t_i \geq 0, S_0 \geq 0, \Delta S_{0i} \geq 0$ . Но  $x_0, x_i, \Delta x_{0i}, v_x, a_x$  могут быть положительными и отрицательными. Здесь нужно учитывать направление движения и положение точки относительно тела отсчёта ( $O$ ) (рис. 3.12).

Проекции векторов  $\vec{v}_i$  и  $\vec{a}_i$  на ось  $Ox$ :

$$v_x = \begin{cases} +v_i, & \text{если } \vec{v}_i \uparrow\uparrow [Ox); \\ -v_i, & \text{если } \vec{v}_i \downarrow\uparrow [Ox); \end{cases} \quad a_x = \begin{cases} +a_i, & \text{если } \vec{a}_i \uparrow\uparrow [Ox); \\ -a_i, & \text{если } \vec{a}_i \downarrow\uparrow [Ox). \end{cases} \quad (3.5)$$

Если:

$\vec{v}_0$  - начальная скорость (когда  $t_0$ );

$\vec{v}_i$  - конечная (новая) скорость (когда  $t_i$ ).

Возможны два случая:

$\vec{a} \uparrow\uparrow \vec{v} \Rightarrow \Delta v_{0i} > 0 \Rightarrow v_i > v_0$  - модуль скорости возрастает (увеличивается)  
 $\Rightarrow$  ускоренное движение.

$\vec{a} \downarrow\uparrow \vec{v} \Rightarrow \Delta v_{0i} < 0 \Rightarrow v_i < v_0$  - модуль скорости убывает (уменьшается)  
 $\Rightarrow$  замедленное движение.

**Задача.** Определите путь, который прошло тело за 4 с, мгновенную скорость в момент времени  $t_4=4$  с и мгновенное ускорение, если известно, что путь изменяется по закону  $S = 4t^2 + 2t$ . Задайте значения аргумента  $t_i = 0, 1, 2, 3$  с и для этих значений аргумента рассчитайте функции  $S(t), v(t), a(t)$ . Результаты расчета запишите в таблицу. Выберите масштаб функции и аргумента. По расчетным значениям (по точкам) постройте графики этих зависимостей.

### Решение

Дано:

$$S = 4t^2 + 2t$$

$$t_0 = 0;$$

$$t_1 = 1 \text{ с};$$

$$t_2 = 2 \text{ с};$$

$$t_3 = 3 \text{ с};$$

$$t_4 = 4 \text{ с}.$$

$$S_4 - ? \quad v_4 - ? \quad a_4 - ?$$

$$S(t) - ? \quad v(t) - ? \quad a(t) - ?$$

1) Для того, чтобы определить путь за время  $t_i$ , нужно в формулу пути подставить соответствующее значение времени  $t_i = t_4$ :

$$S_4 = 4t_4^2 + 2t_4. \quad (3.6)$$

2) Чтобы определить мгновенную скорость, нужно взять первую производную пути по времени ( $'$ ), продифференцировать функцию  $S(t)$ . Тогда получим закон изменения скорости:

$$v_4 = S' = (4t^2 + 2t)' = (8t + 2) \text{ м/с}. \quad (3.7)$$

3) Чтобы определить мгновенное ускорение, нужно взять первую производную скорости по времени или вторую производную пути по времени, тогда получим закон изменения ускорения:

$$a_4 = v' = S'' = (8t + 2)' = 8 \text{ м/с}^2. \quad (3.8)$$

Ускорение – постоянная величина (равнопеременное движение).

### Вычисления:

$$1) S_4 = 4 \cdot 16 + 2 \cdot 4 = 72 \text{ м};$$

$$2) v_4 = 8 \cdot 4 + 2 = 34 \text{ м/с};$$

$$3) a = 8 \text{ м/с}^2.$$

Для построения графиков составим таблицу при значениях аргумента  $t_i = 0, 1, 2, 3, 4$  с:

$t_i, \text{ с}$	$S_i = 4t_i^2 + 2t_i, \text{ м}$	$v_i = 8t_i + 2, \text{ м/с}$	$a, \text{ м/с}^2$
0	0	2	8
1	6	10	8
2	20	18	8
3	42	26	8
4	72	34	8

По данным таблицы построим графики (рис. 3.13).

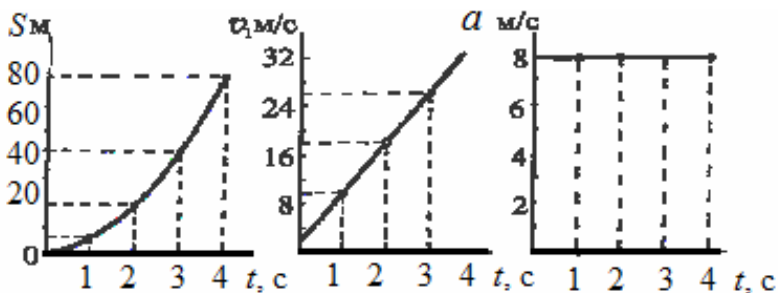


Рис. 3.13

Ответ: 1)  $S_4 = 72 \text{ м}$ ; 2)  $v_4 = 34 \text{ м/с}$ ; 3)  $a = 8 \text{ м/с}^2$ .

### 3.2.1 Прямолинейное равнопеременное движение материальной точки

*Прямолинейное равнопеременное движение* – это движение по прямой линии с постоянным ускорением (рис. 3.14):

$$\vec{a} = \text{const} \Rightarrow \begin{cases} |\vec{a}_i| \equiv a = \text{const} \\ a_x = \pm a = \text{const} \end{cases} \quad (3.9)$$

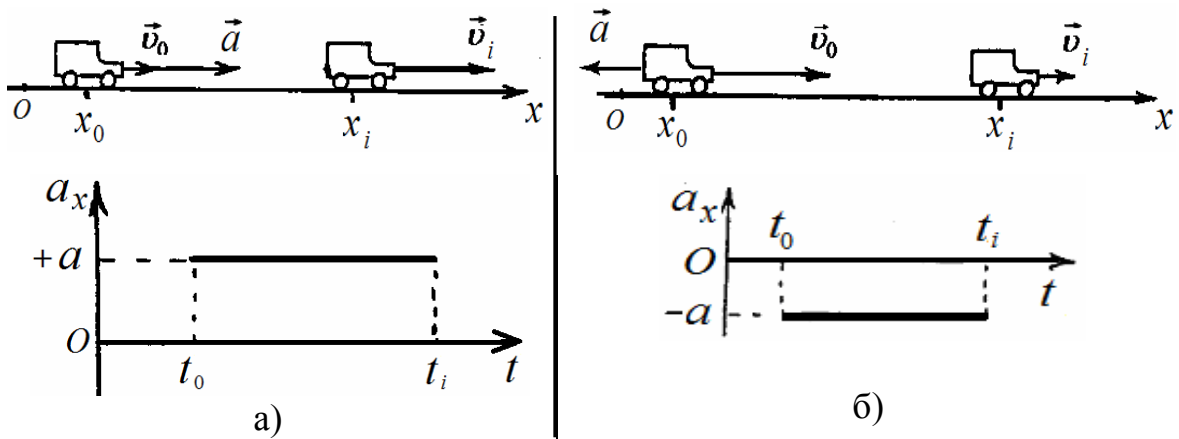


Рис. 3.14

- а) Равноускоренное ( $\vec{a} \uparrow \vec{v}$ )  $v_i > v_0 \Rightarrow \Delta v_{0i} > 0 \Rightarrow a_x > 0$ ;  
 б) Равнозамедленное ( $\vec{a} \downarrow \vec{v}$ )  $v_i < v_0 \Rightarrow \Delta v_{0i} < 0 \Rightarrow a_x < 0$ .

$$\vec{a}_i = \frac{\vec{v}_i - \vec{v}_0}{\Delta t_{0i}},$$

или проекция 
$$a_x = \frac{v_{ix} - v_{0x}}{t_i - t_0}. \quad (3.10)$$

Видно, что  $v_{ix} - v_{0x} = a_x \cdot \Delta t_{0i}$  - зависимость проекции скорости тела от времени:  $v_x(t)$ .

$$v_{ix} = v_{0x} + a_x(t_i - t_0) \quad (3.11)$$

Так как  $v_{0x}$  - линейная функция, то зависимость  $v_x(t)$  – линейная, её график – прямая (рис. 3.15).

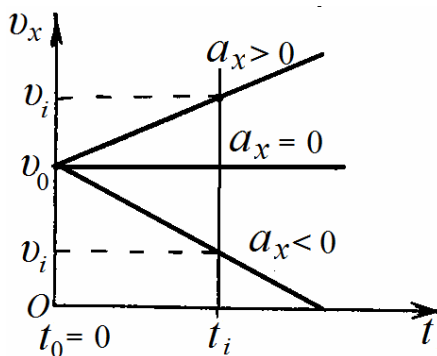


Рис. 3.15

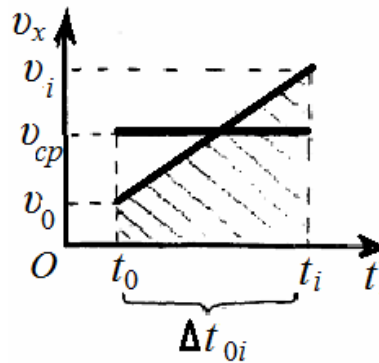


Рис. 3.16

Для равнопеременного прямолинейного движения в одном направлении можно получить формулы:

$$v_{cp} = \frac{v_{ix} + v_{0x}}{2}; \quad (3.12)$$

$$\Delta S_{0i} = v_{cp} \Delta t_{0i} = \frac{v_{ix} + v_{0x}}{2} \Delta t_{0i} \quad (3.13)$$

Уравнение 3.13 – это площадь прямоугольной трапеции (рис. 3.16).

Длина пути  $\Delta S_{0i}$ , который проходит точка за время  $\Delta t_{0i}$ , численно равна площади фигуры под графиком скорости (рис. 3.16).

**Уравнения прямолинейного равнопеременного движения материальной точки по оси Oх**

$$1) \quad \boxed{a_x = \frac{v_{ix} - v_{0x}}{\Delta t_{0i}}}; \quad (3.14)$$

$$2) \quad \boxed{v_{ix} = v_{0x} + a_x \Delta t_{0i}}; \quad (3.15)$$

$$\Delta x_{0i} = v_{cp} \Delta t_{0i} = \frac{v_{ix} + v_{0x}}{2} \Delta t_{0i} = \frac{v_{0x} + a_x \Delta t_{0i} + v_{0x}}{2} \Delta t_{0i};$$

$$3) \quad \boxed{\Delta x_{0i} = v_{0x} \Delta t_{0i} + \frac{a_x \Delta t_{0i}^2}{2}}; \quad (3.16)$$

$$\Delta x_{0i} = v_{0x} \Delta t_{0i} = \frac{v_{ix} + v_{0x}}{2} \cdot \frac{v_{ix} - v_{0x}}{a_x} \Rightarrow;$$

$$4) \quad \boxed{\Delta x_{0i} = \frac{v_{ix}^2 - v_{0x}^2}{2a_x}}; \quad (3.17)$$

$$5) \quad \boxed{\Delta x_{0i} = x_i - x_0 \Rightarrow x_i = x_0 + \Delta x_{0i}}; \quad (3.18)$$

$$6) \quad \Delta S_{0i} = S_i - S_0 = |\Delta x_{0i}|;$$

$$\boxed{S_i = S_0 + |\Delta x_{0i}|}. \quad (3.19)$$

где  $S(t)$ ,  $x(t)$  - квадратичные функции, графики которых имеют вид параболы.

Форма параболы, графика  $x(t)$  – **зависит от вида движения:**



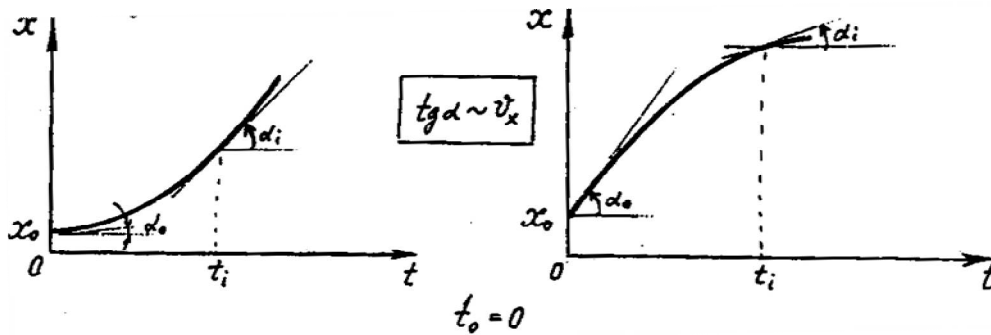


Рис. 3.17 а - равноускоренное движение по  $(Ox)$  ( $a_x > 0 \Rightarrow v_{ix} > v_{0x}$ );  
 б - равнозамедленное движение по  $(Ox)$  ( $a_x < 0 \Rightarrow v_{ix} < v_{0x}$ )

Тангенс угла  $\alpha$  - наклонная касательная к графику  $x(t)$  определяется проекцией вектора скорости  $v_{ix}$ :

$$\operatorname{tg} \alpha = v_{ix} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x_{0i}}{\Delta t_{0i}}.$$

**Задача.** Дана зависимость  $x(t)$ . Найти  $x_0$ ,  $v_{0x}$ ,  $a_x$ . Записать зависимость  $v_x(t)$  для этого движения. Назвать вид движения.

1)  $3x + 5t - 2t^2 = 2t^2 + 3t + x + 2$ ;    2)  $x = (3 - 2t)(t + 5)$ .

Решение

1) Сначала запишем зависимость  $x(t)$  в виде

$$x = x_0 + v_{0x} \cdot t + \frac{a_x \cdot t^2}{2} \quad (1)$$

$$3x + 5t - 2t^2 = 2t^2 + 3t + x + 2 \Rightarrow x = 1 - t + 2t^2.$$

Теперь сравнивая с (1), видим:  $x_0 = 1$ ;  $v_{0x} = -1$ ;  $a_x = 4$ .

Зависимость  $v_x(t)$  имеет вид:  $v_x = v_{0x} + a_x \cdot t$ ; для этого движения:  
 $v_x = -1 + 4 \cdot t$ .

Исеем  $v_x < 0$ ;  $a_x > 0$ , значит это равнозамедленное движение против оси  $Ox$ .

2) Этот случай рассмотрим аналогично:

$$x = (3 - 2t)(t + 5) \Rightarrow x = 3t - 2t^2 + 15 - 10t \Rightarrow x = 15 - 7t - 2t^2.$$

$$x_0 = 15; v_{0x} = -7; a_x = -4.$$

$$v_x = -7 - 4t.$$

$v_x < 0$ ,  $a_x < 0 \Rightarrow$  равноускоренное движение против оси  $Ox$ .

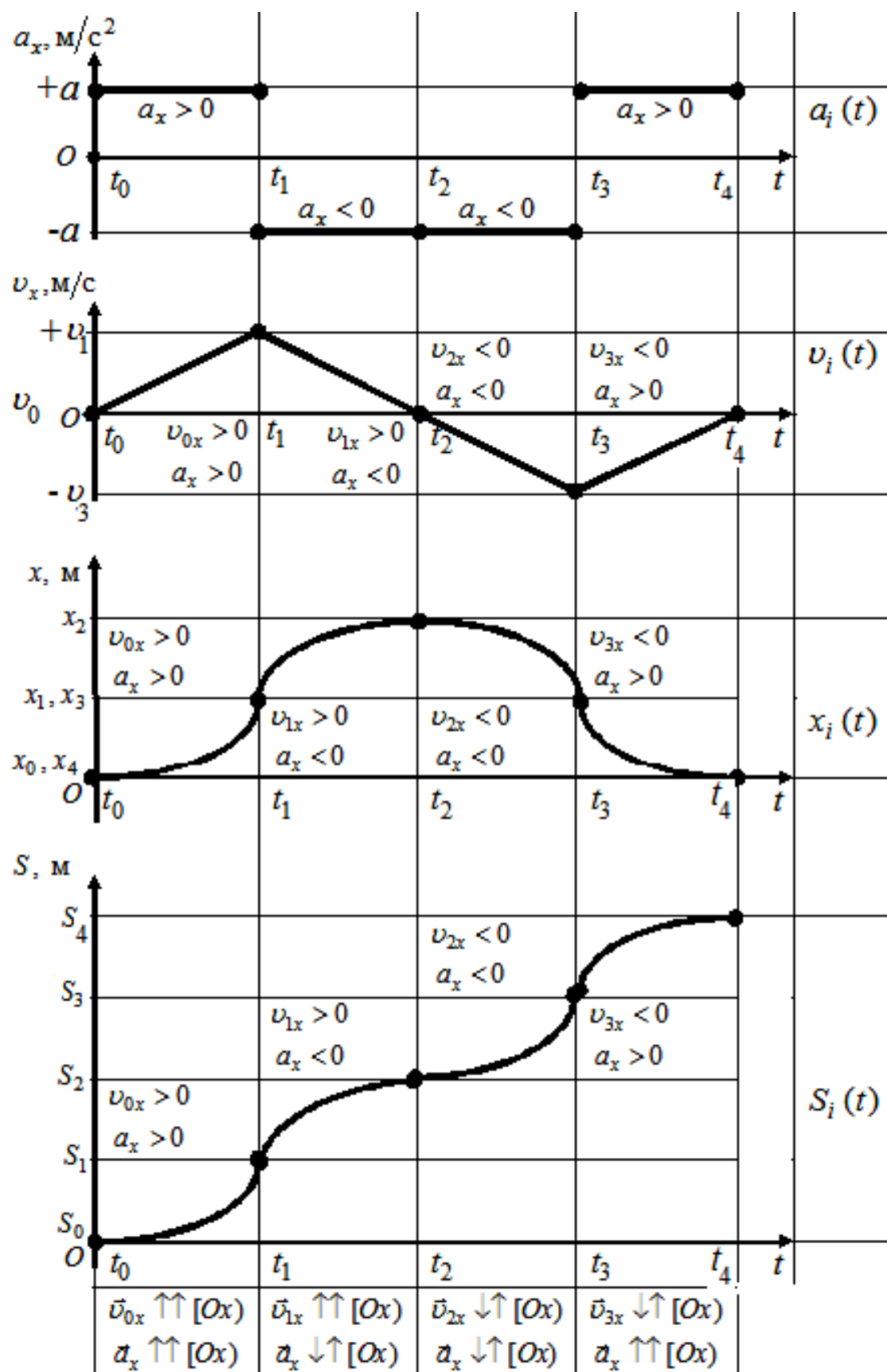
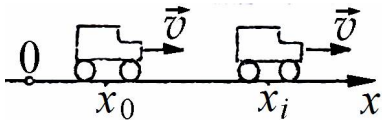
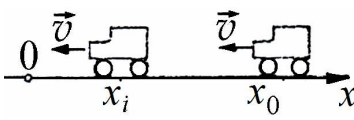
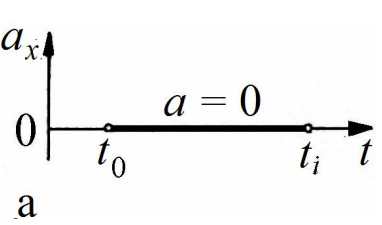
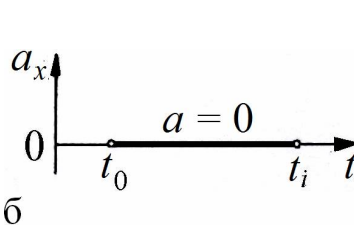
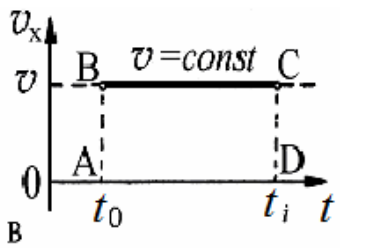
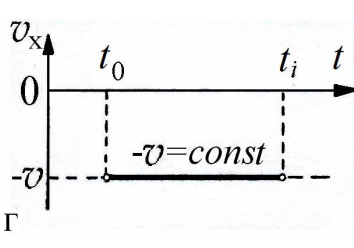
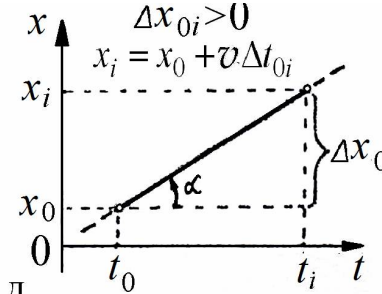
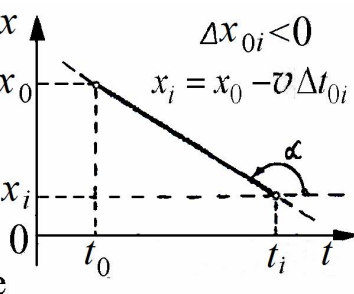
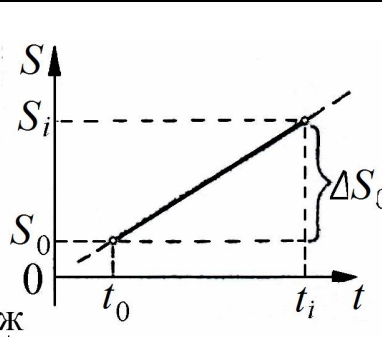
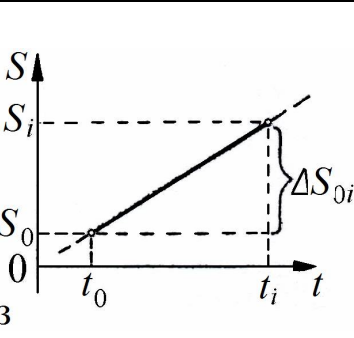


Рис. 3.18 Графики прямолинейного равнопеременного движения вдоль оси  $Ox$

### 3.2.2 Прямолинейное равномерное движение материальной точки

Прямолинейное равномерное движение – это частный случай равнопеременного движения, когда ускорение равно нулю ( $\vec{a} = 0$ ).

Таблица 3.3 – Прямолинейное равномерное движение материальной точки

Уравнения	Графики	
	По направлению оси $Ox$ , $\vec{v} \uparrow \uparrow [Ox)$	Против направления оси $Ox$ , $\vec{v} \downarrow \uparrow [Ox)$
$a_x(t)$  $\vec{a} = const = 0$ $a_x = 0$		
	 <p>а</p>	 <p>б</p>
$v_x(t)$ $\vec{v} = const$ $ \vec{v}  \equiv v = const$ $v_x = \frac{\Delta x_{0i}}{\Delta t_{0i}} = \pm v$	 <p>в</p>	 <p>г</p>
$x(t)$ $\Delta x_{0i} = v_x \Delta t_{0i}$ $\Delta x_{0i} = x_i - x_0 \rightarrow$ $\rightarrow x_i = x_0 + \Delta x_{0i}$ $x_i = x_0 + v_x \Delta t_{0i}$	 <p>д</p>	 <p>е</p>
$S(t)$ $\Delta S_{0i} =  \Delta x_{0i}  \rightarrow$ $\rightarrow$ всегда $\Delta S \geq 0$ , $\Delta S_{0i} = S_i - S_0 \rightarrow$ $\rightarrow S_i = S_0 +  \Delta x_{0i} $ , т.к. $ \Delta x_{0i}  =  v_x \Delta t_{0i} $ , тогда $S_i = S_0 + v \Delta t_{0i}$ .	 <p>ж</p>	 <p>з</p>

Обратите внимание!

1. Площадь фигуры ABCD под графиком скорости  $v(t)$  равна длине пути  $\Delta S_{0i}$  за время  $\Delta t_{0i}$ .
2. Тангенс угла наклона  $\alpha$  графика координаты  $x(t)$  определяет проекцию вектора скорости  $v_x$ .

### 3.2.3 Прямолинейное равномерное движение относительно разных систем отсчета

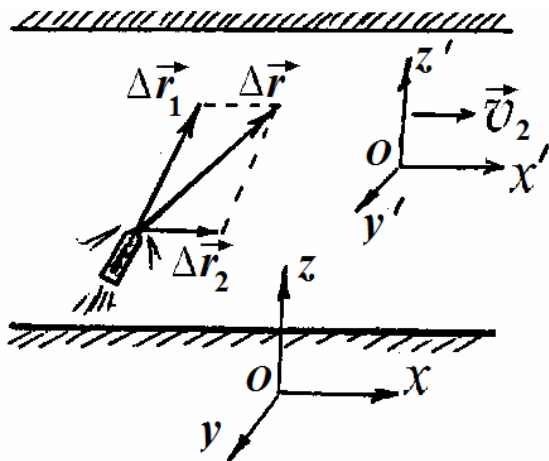


Рис. 3.19

Рассмотрим движение лодки по реке.

За промежуток времени  $\Delta t$ :

- лодка совершает перемещение относительно воды  $\Delta \vec{r}_1$ ;

- за это же время вода в реке совершает перемещение  $\Delta \vec{r}_2$  относительно берега (земли).

- перемещение лодки относительно земли ( $\Delta \vec{r}$ ) является результирующим:

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

Разделим это равенство на  $\Delta t$ :

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

по правилу сложения скоростей:  $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$ , (3.21)

где  $\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$  – скорость лодки относительно земли (скорость тела относительно неподвижной системы координат  $xuz$ );

$\vec{v}_1 = \frac{\Delta \vec{r}_1}{\Delta t}$  – скорость лодки относительно воды (скорость тела относительно подвижной системы координат  $x'y'z'$ );

$\vec{v}_2 = \frac{\Delta \vec{r}_2}{\Delta t}$  – скорость воды относительно земли (скорость системы  $x'y'z'$  относительно системы  $xuz$ ).

**Задача.** Лодка движется по реке (рис. 3.20). Расстояние AB равно 2 км. Скорость лодки относительно воды 3 м/с, скорость воды в реке 1 м/с. За какое время лодка пройдет расстояние AB:

- 1) по течению (из точки A в точку B)?
- 2) против течения (из точки B в точку A)?

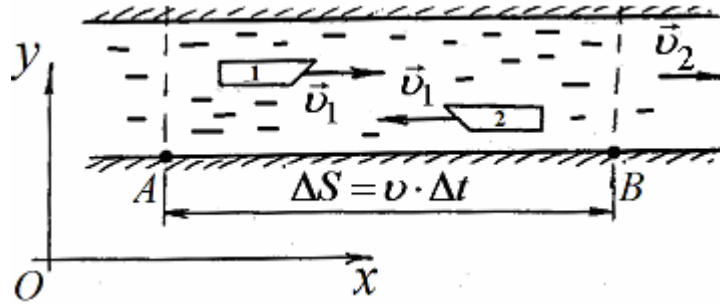


Рис. 3.20

Дано:	СИ:	Решение:
$v_1 = 3 \text{ м/с},$ $v_2 = 1 \text{ м/с},$ $\Delta S =  AB  = 2 \text{ км}$	$2 \cdot 10^3 \text{ м}$	Время движения определим из уравнения пути:
$\Delta t - ?$		$\Delta S = v \cdot \Delta t \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta S}{v};$
		где $v =  \vec{v} $ - модуль скорости лодки относительно земли, который определим по правилу сложения скоростей
		$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$
		или в проекциях на ось $Ox$ :
		$v_x = v_{1x} + v_{2x}.$
		1) По направлению (по течению) оси $Ox$ :
		$v = v_1 + v_2;$
		1) Против направления (течения) оси $Ox$ :
		$v = -v_1 + v_2.$
		<u>Вычисления:</u>
		1) $v =  v_x  = 3 + 1 = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}} \rightarrow \Delta t = \frac{\Delta S}{v} = \frac{2 \cdot 10^3}{4} = 500 \text{ с};$
		2) $v =  v_x  =  -3 + 1  = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}} \rightarrow \Delta t = \frac{2 \cdot 10^3}{2} = 1000 \text{ с}.$
		<u>Ответ:</u> лодка проходит расстояние AB за 500 с по течению реки и за 1000 с против течения.

### 3.2.4 Свободное падение

**Свободным падением** называется движение тела в безвоздушном пространстве (в вакууме) под действием только притяжения Земли.

Законы свободного падения были установлены экспериментально итальянским ученым Галилеем в конце XVI века.

Опыты Галилея показали, что **свободное падение** – это равноускоренное движение: в данной точке над Землей все тела падают с одинаковым ускорением, которое называется ускорением свободного падения ( $g$ ). Например, на широте Москвы ускорение свободного падения равно:

$$g = 9,8153 \text{ м/с} \approx 9,8 \text{ м/с}^2.$$

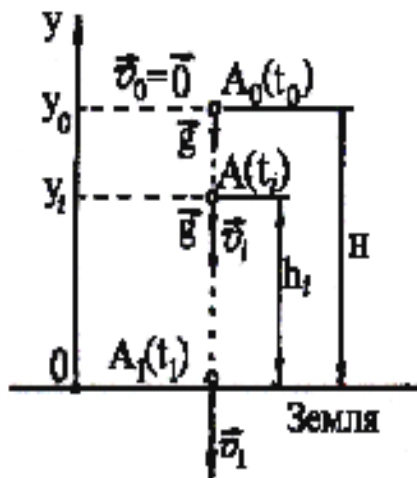


Рис. 3.21 Свободное падение по оси  $Oy$

Вектор ускорения свободного падения всегда направлен к центру Земли (вертикально вниз, рис. 3.21).

**Свободное падение** – это пример прямолинейного равнопеременного движения. При свободном падении  $\vec{a} = \text{const} = \vec{g}$ .

Возьмем координатную ось  $Oy$ , направленную вертикально вверх, начало координат поместим на поверхности Земли (рис. 3.21). Тело начинает падать без начальной скорости ( $\vec{v}_0 = 0$ ) из точки  $A_0$ , которая находится на высоте  $H$  над Землей.

Тело движется равноускоренно  $\vec{g} \downarrow \downarrow \vec{v}_1$  против направления оси  $Oy$  ( $\vec{v}_1 \downarrow \uparrow [Oy]$ ):

$$\Delta \vec{r}_{01} \downarrow \uparrow [Oy), \vec{g} \downarrow \uparrow [Oy) \Rightarrow$$

$$y_1 = y_0 + \frac{g_y \Delta t_{01}^2}{2} \quad (3.22)$$

В момент падения  $t_1$  на Землю  $y_0 = H$ ,  $y_1 = h_1 = 0$   $g_y = -g$  уравнение (3.22) будет иметь вид:

$$0 = H - \frac{g \Delta t_{01}^2}{2} \Rightarrow H = \frac{1}{2} g \Delta t_{01}^2 \quad (3.23)$$

Время падения из уравнения (3.23):

$$\Delta t_{01} = \sqrt{\frac{2H}{g}} \quad (3.24)$$

Так как тело движется равноускоренно против направления оси  $Oy$  координата уменьшается ( $y_1 < y_0$ ), а путь всегда увеличивается ( $S_1 > S_0$ ). Поэтому график координаты (табл. 3.4, в) будет зеркальным отображением графика пути (табл. 3.4, г) относительно оси времени.

Таблица 3.4 – Свободное падение

Уравнения		Графики
$g(t)$	$\vec{g} = const$ $g_y = -g$	
$v(t)$	$v_{iy} = v_{0y} + g_y \Delta t_{0i},$ <p>т.к. <math>v_{0y} = 0</math>, тогда</p> $v_{iy} = g_y \Delta t_{0i}$	
$y(t)$ $h(t)$	$\Delta y_{0i} = \Delta h_{0i} = \frac{g_y \Delta t_{0i}^2}{2},$ $\Delta y_{0i} = y_i - y_0 \Rightarrow$ $y_i = y_0 + \Delta y_{0i}, y_0 = h_0 = H,$ <p>тогда <math>h_i = H + \frac{g_y \Delta t_{0i}^2}{2}</math></p>	
$y(v)$	$\Delta y_{0i} = \frac{v_{iy}^2}{2g_y}$	
$S(t)$	$\Delta S_{0i} =  \Delta y_{0i}  =  \Delta h_{0i} ,$ $S_i = S_0 +  \Delta h_{0i} ,$ $S_i = S_0 + \left  \frac{g_y \Delta t_{0i}^2}{2} \right $	

### Схема решения задач по кинематике

1. Записать условие задачи в краткой форме (Дано) и перевести в СИ.
2. Определить характер движения тела (точки).
3. Определить направление векторов  $\vec{v}$  и  $\vec{a}$  относительно оси  $Ox$ .
4. Составить уравнения, с помощью которых можно описать данное движение (число уравнений равно числу неизвестных величин).
5. Решить уравнения в общем виде.
6. Подставить числовые значения заданных величин и произвести вычисления.

**Задача.** Автобус движется с постоянным ускорением (рис. 3.22)  $a = 0,5 \text{ м/с}^2$ . За какое время его скорость увеличится от 9 до 72 км/ч?

Дано:  
 $a = 0,5 \text{ м/с}^2$

$v_0 = 9 \text{ км/ч}$

$v_1 = 72 \text{ км/ч}$

$\Delta t_{01} - ?$

СИ:

$$v_0 = \frac{9000 \text{ м}}{3600 \text{ с}} = 2,5 \text{ м/с}$$

$$v_1 = \frac{72000 \text{ м}}{3600 \text{ с}} = 20 \text{ м/с}$$

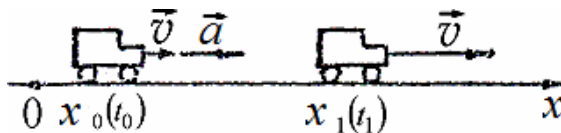


Рис. 3.22

Решение:

1) Автобус движется равноускоренно, так как его скорость увеличивается:  $v_1 > v_0$ ,  $\vec{a} \uparrow \uparrow \vec{v} \uparrow \uparrow Ox$ .

2) Уравнение скорости для тела:

$$v_1 = v_0 + a\Delta t_{01}.$$

3) Из уравнения ускорения получим

$$a = \frac{\Delta v_{01}}{\Delta t_{01}} \Rightarrow \Delta t_{01} = \frac{v_1 - v_0}{a}.$$

Вычисления:

$$\Delta t_{01} = \frac{20 \text{ м/с} - 2,5 \text{ м/с}}{0,5 \text{ м/с}^2} = 35 \text{ с}.$$

Ответ:  $\Delta t_{01} = 35 \text{ с}.$



### ***Новые слова, словосочетания и языковые конструкции***

аргумент	неподвижный	равнопеременное
безвоздушный (вакуум)	отображение	равноускоренное
вверх	отрицательный	расстояние
вертикально	падение	свободное
возрастает	парабола	совершать
высота	подвижный	тангенс
график	подставить	убывать
зависимость	положительный	увеличивать
замедленный	постоянные	уменьшать
зеркальное	притяжение	условие
квадратичная	прямолинейное	учитывать
масштаб	равнозамедленное	характер
наклон	равномерное	широта

#### **1. Что равно чему.**

Длина пути  $\Delta S_{0i}$ , который проходит точка за время  $\Delta t_{0i}$  численно равна площади фигуры под графикой скорости.

#### **2. Что определяет что.**

Тангенс угла  $\alpha$  - наклона касательной к графику  $x_i(t)$  определяет проекцию вектора скорости  $v_{ix}$ .

#### **3. Что показывает что.**

Опыты Галилея показали, что *свободное падение* - это *равноускоренное движение*.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое прямолинейное переменное движение?
2. Что такое прямолинейное равнопеременное движение?
3. Что называется прямолинейным равномерным движением?
4. Что можно сказать об ускорении при равнопеременном и равномерном движении?
5. Какой вид имеют графики ускорения при равнопеременном и равномерном движении?
6. Как зависит скорость от времени при равнопеременном и равномерном движении?

7. Какой вид имеют графики скорости при равнопеременном и равномерном движении?
8. Как зависят координата и путь от времени при равнопеременном и равномерном движении?
9. Какой вид имеют графики координаты и пути при равнопеременном и равномерном движении?
10. Чем отличаются графики координаты от графиков пути?
11. Какое движение называют ускоренным, а какое – замедленным?
12. Как определить скорость при равномерном прямолинейном движении относительно разных систем отсчета?
13. Что называется свободным падением?
14. Кем и когда были установлены законы свободного падения?
15. Что показали опыты Галилея?
16. Как направлен вектор ускорения свободного падения?
17. Чему равен модуль вектора  $\vec{g}$ ?
18. Чему равна начальная скорость свободного падения?
19. Как определить высоту падения  $H$ ?
20. Как определить время и скорость падения тела на Землю?

### 3.3 Кинематика криволинейного движения материальной точки

*Криволинейное переменное движение* – это движение точки по кривой линии, при котором скорость и ускорение изменяются по модулю и направлению.

#### 3.3.1 Движение материальной точки под углом к горизонту

Рассмотрим тело брошенное под углом  $\alpha$  к горизонту с начальной скоростью  $\vec{v}_0$  (рис. 3.23), на которое действует только постоянное ускорение – ускорение свободного падения  $\vec{a} = \vec{g}$ . Сопротивление воздуха не учитываем и рассматриваем тело как материальную точку. Если точка описывает траекторию в одной плоскости, то будем решать задачу в системе координат  $xOy$ .

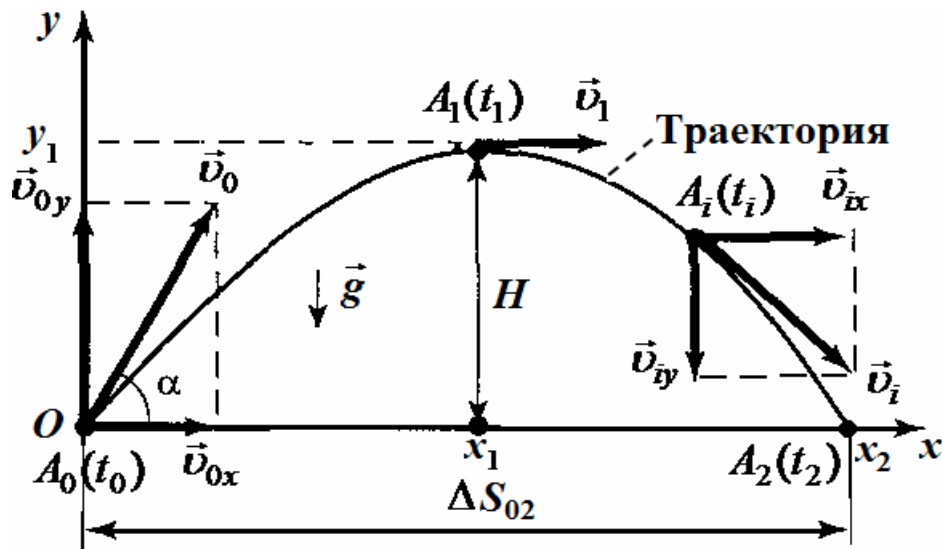


Рис. 3.23

Движение тела, брошенного под углом к горизонту состоит из двух движений:

- горизонтальное (относительно оси  $Ox$ ) – равномерное движение с постоянной скоростью  $v_{0x} = v_{1x} = \dots = v_{ix}$ , т.к.  $g_x = 0$ ;
  - вертикальное (относительно оси  $Oy$ ) – равнопеременное движение с постоянным ускорением  $g_y = -g$  (вверх, до максимальной высоты  $H$  – равнозамедленное, вниз – равноускоренное).
- Движение тела описывается уравнениями кинематики:

$$\begin{array}{l}
 v_{ix} = v_{0x} + g_x \Delta t_{0i}, \\
 x_i = x_0 + v_{0x} \Delta t_{0i} + \frac{1}{2} g_x \Delta t_{0i}^2,
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 v_{iy} = v_{0y} + g_y \Delta t_{0i}, \\
 y_i = y_0 + v_{0y} \Delta t_{0i} + \frac{1}{2} g_y \Delta t_{0i}^2,
 \end{array}
 \quad (3.25)$$

где  $x_0 = 0, y_0 = 0$  - значения координат в начальный момент времени ( $t_0$ );  
 $v_{0x} = v_0 \cos \alpha, v_{0y} = v_0 \sin \alpha$  - проекции начальной скорости на координатные оси.

- С учетом всех составляющих, уравнения кинематики (3.25) в момент времени ( $t_i$ ) будут иметь вид:

$$\begin{array}{l}
 v_{ix} = v_0 \cos \alpha, \\
 x_i = v_0 \cos \alpha \Delta t_{0i},
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 v_{iy} = v_0 \sin \alpha - g \Delta t_{0i}, \\
 y_i = v_0 \sin \alpha \Delta t_{0i} - \frac{1}{2} g \Delta t_{0i}^2,
 \end{array}
 \quad (3.26)$$

- В этот момент времени модуль скорости:

$$\left| \vec{v}_i \right| = v_i = \sqrt{v_{ix}^2 + v_{iy}^2}. \quad (3.27)$$

- Время подъёма тела  $\Delta t_{01}$ , определим из уравнения скорости  $v_{iy}$  (3.26), если учесть, что  $v_{iy} = v_{1y} = 0$ :

$$\Delta t_{01} = \frac{v_0}{g} \sin \alpha. \quad (3.28)$$

- Всё время движения  $\Delta t_{02}$ , определим из уравнения координаты  $y_i$  (3.26), если учесть, что  $y_i = y_2 = 0$ :

$$\Delta t_{02} = 2 \frac{v_0}{g} \sin \alpha, \quad (3.29)$$

сравнивая уравнения (3.28) и (3.29) видно, что всё время движения равно удвоенному времени подъёма:

$$\Delta t_{02} = 2\Delta t_{01}, \quad (3.30)$$

следовательно, время подъёма равно времени падения:  $\Delta t_{01} = \Delta t_{12}$ .

- Максимальную высоту подъёма  $H$ , определим из уравнения координаты  $y_i$  (3.26), если учесть, что  $y_i = H$ , а

$$\Delta t_{0i} = \Delta t_{01} = \frac{v_0}{g} \sin \alpha:$$

$$H = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}. \quad (3.31)$$

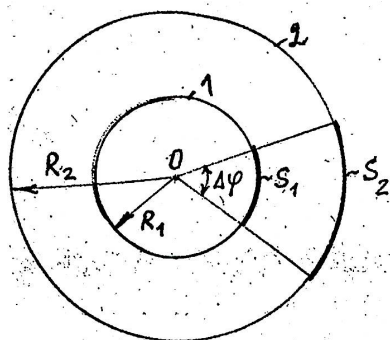
- Дальность полёта ( $\Delta S_{02}$ ) определим из уравнения координаты  $x_i$  (3.26), если учесть, что  $x_i = x_2 = \Delta S_{02}$ , а  $\Delta t_{0i} = \Delta t_{02} = 2 \frac{v_0}{g} \sin \alpha$ :

$$\Delta S_{02} = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\alpha. \quad (3.32)$$

Таблица 3.5 – Уравнения криволинейного равнопеременного движения материальной точки

$g(t)$	$\vec{g} = const \begin{cases} g_x = 0, \\ g_y = -g = const \end{cases}$	
$v(t)$	$\vec{v}_i = \vec{v}_{ix} + \vec{v}_{iy}; \quad \vec{v}_i = \vec{v}_0 + \vec{g}\Delta t_{0i},$ $v_{ix} = v_{0x} + g_x \Delta t_{0i} = v_0 \cos \alpha = const,$ $v_{iy} = v_{0y} + g_y \Delta t_{0i} = v_0 \sin \alpha - g \Delta t_{0i}$	$v_{ix} = v_0 \cos \alpha = const$ $v_{iy} = v_0 \sin \alpha - g \Delta t_{0i}$
$x(t)$	$x_i = x_0 + v_{0x} \Delta t_{0i} + \frac{1}{2} g_x \Delta t_{0i}^2, \text{ т.к. } x_0 = 0 \Rightarrow$ $x_i = v_{0x} \Delta t_{0i} = (v_0 \cos \alpha) \Delta t_{0i}$	$x_i = (v_0 \cos \alpha) \Delta t_{0i}$
$y(t)$	$y_i = y_0 + v_{0y} \Delta t_{0i} + \frac{1}{2} g_y \Delta t_{0i}^2, \text{ т.к. } y_0 = 0 \Rightarrow$ $y_i = v_{0y} \Delta t_{0i} + \frac{g_y \Delta t_{0i}^2}{2} = (v_0 \sin \alpha) \Delta t_{0i} - \frac{g \Delta t_{0i}^2}{2}$	$y_i = (v_0 \sin \alpha) \Delta t_{0i} - \frac{g \Delta t_{0i}^2}{2}$

### 3.3.2 Вращательное движение



**Мера центрального угла.** Известно (рис. 3.24, а), что отношение длины окружности ( $l = 2\pi \cdot R = \pi d$ ) к её диаметру ( $d = 2 \cdot R$ ) не зависит от размеров окружности и равно:

$$\frac{l}{d} = \pi \approx 3,14... = const. \quad (3.33)$$

Поэтому за меру центрального угла ( $\Delta\varphi$ ) берут отношение длины дуги ( $\Delta S$ ) к радиусу  $R$  окружности:

$$\frac{\Delta S}{R} = \Delta\varphi. \quad (3.34)$$

Если  $\Delta S = R$ , то  $\Delta\varphi = 1$  рад (радиан).

**Радян** – безразмерная величина:

$$[\Delta\varphi] = \frac{[\Delta S]}{[R]} = \frac{1 \text{ м}}{1 \text{ м}} = 1.$$

**Полный** центральный угол ( $\Delta\varphi_n = 360^\circ$ )

равен  $2\pi$  радиан:

$$\Delta\varphi_n = \frac{\Delta S}{R} = \frac{l}{R} = \frac{2\pi R}{R} = 2 \cdot \pi, \quad (3.35)$$

$$1 \text{ рад} = \frac{360^\circ}{2\pi} \approx \frac{360^\circ}{6,28} \approx 58^\circ 18'.$$

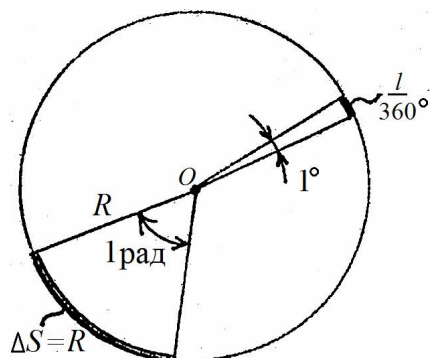


Рис. 3.24 б)

### 3.3.3 Равномерное движение по окружности

**Равномерным движением по окружности** называют такое движение материальной точки, при котором радиус-вектор  $\vec{R}_i$  за любые равные промежутки времени ( $\Delta t_{0i} = const$ ) поворачивается на равные углы ( $\Delta\varphi_{0i} = const$ ) (рис. 3.25).

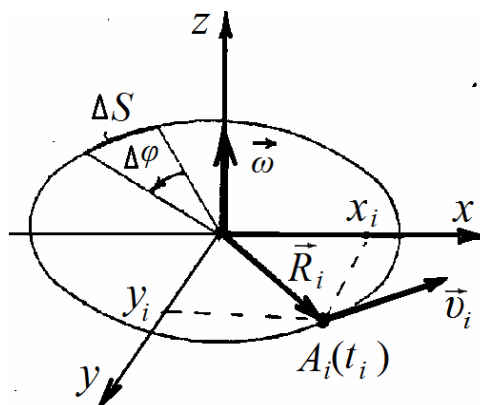


Рис. 3.25

Длина пути  $\Delta S$  – это длина дуги.

Если при движении точки по окружности за любые равные промежутки времени ( $\Delta t = const$ ), радиус-вектор ( $\vec{R}_i$ ) делает поворот на равные углы ( $\Delta\varphi = const$ ) то точка проходит равные пути ( $\Delta S = const$ ).

**Угловая скорость** вращения (модуль):

$$\boxed{\omega = \frac{\Delta\varphi_{0i}}{\Delta t_{0i}} = const}, \quad (3.36)$$

направление вектора  $\vec{\omega}$  определяют по правилу винта (буравчика).

**Линейная скорость** (модуль):

$$v = \frac{\Delta S_{0i}}{\Delta t_{0i}} = const, \text{ если } \Delta\varphi = \frac{\Delta S}{R} \text{ (рад), то } \Delta S = \Delta\varphi \cdot R \Rightarrow v = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \cdot R \Rightarrow$$

$$\boxed{v = \omega \cdot R}. \quad (3.37)$$

**Период** вращения ( $T$ ) – это время, за которое точка делает один полный оборот по окружности:

$$[T] = 1 \text{ с}. \quad (3.38)$$

**Частота** вращения ( $\nu$ ) – это число полных оборотов за единицу времени:

$$\boxed{\nu = \frac{1}{T} = T^{-1}}, \quad [\nu] = 1 \text{ с}^{-1}. \quad (3.39)$$

$$\text{Если } \Delta t = T, \text{ то } \left. \begin{array}{l} \Delta S = l = 2\pi R \Rightarrow v = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi \cdot \nu \cdot R \\ \Delta\varphi = 2\pi \Rightarrow \omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot \nu \end{array} \right\} \Rightarrow v = \omega \cdot R \quad (3.40)$$

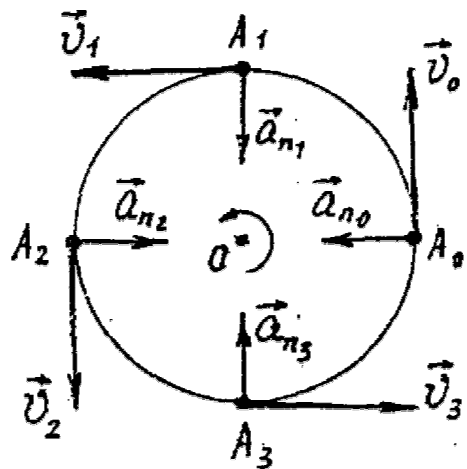


Рис. 3.26

При равномерном вращении (рис. 3.26):

1) **модуль** скорости не изменяется

$$v_0 = v_1 = v_2 = v_3 = \dots = v = \text{const}, \text{ т.е. } \vec{a}_\tau = 0$$

2) изменяется только **направление** скорости

$$\vec{v}_0 \neq \vec{v}_1 \neq \vec{v}_2 \neq \vec{v}_3 \Rightarrow \Delta \vec{v}_{0i} = \vec{v}_i - \vec{v}_0 \neq 0, \text{ т.е. } \vec{a}_n \neq 0$$

Модуль нормального (или центростремительного  $a_n \equiv a_{ц.с.}$ ) ускорения:

$$a_n = \frac{v^2}{R} \quad (3.41)$$

$$a_n = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot R \quad (3.42)$$

$$a_n = \omega^2 \cdot R \quad (3.43) \quad \text{или}$$

$$a_n = 4\pi^2 \cdot v^2 \cdot R \quad (3.44)$$

**Задача.** Две точки движутся по окружностям радиусами  $R_1$  и  $R_2$ ,  $R_1 = 2R_2$ . Найти отношение центростремительных ускорений точек, если:

- а) равны линейные скорости точек;  
б) равны периоды вращения точек.

Дано:

$$R_1 = 2R_2$$

а)

$$v_1 = v_2 = v$$

б)

$$T_1 = T_2 = T$$

$$\frac{a_{c1}}{a_{c2}} = ?$$

Решение

$$\text{а) } a_{c1} = \frac{v_1^2}{R_1} = \frac{v^2}{R_1} \Rightarrow \frac{a_{c1}}{a_{c2}} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_2}{2R_2};$$

$$a_{c2} = \frac{v_2^2}{R_2} = \frac{v^2}{R_2}$$

$$\boxed{\frac{a_{c1}}{a_{c2}} = \frac{1}{2}}$$

$$\text{б) } a_{c1} = \frac{4\pi^2}{T_1^2} \cdot R_1 = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot R_1 \Rightarrow \frac{a_{c1}}{a_{c2}} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{2R_2}{R_2} \Rightarrow$$

$$a_{c2} = \frac{4\pi^2}{T_2^2} \cdot R_2 = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot R_2$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{a_{c1}}{a_{c2}} = 2}$$

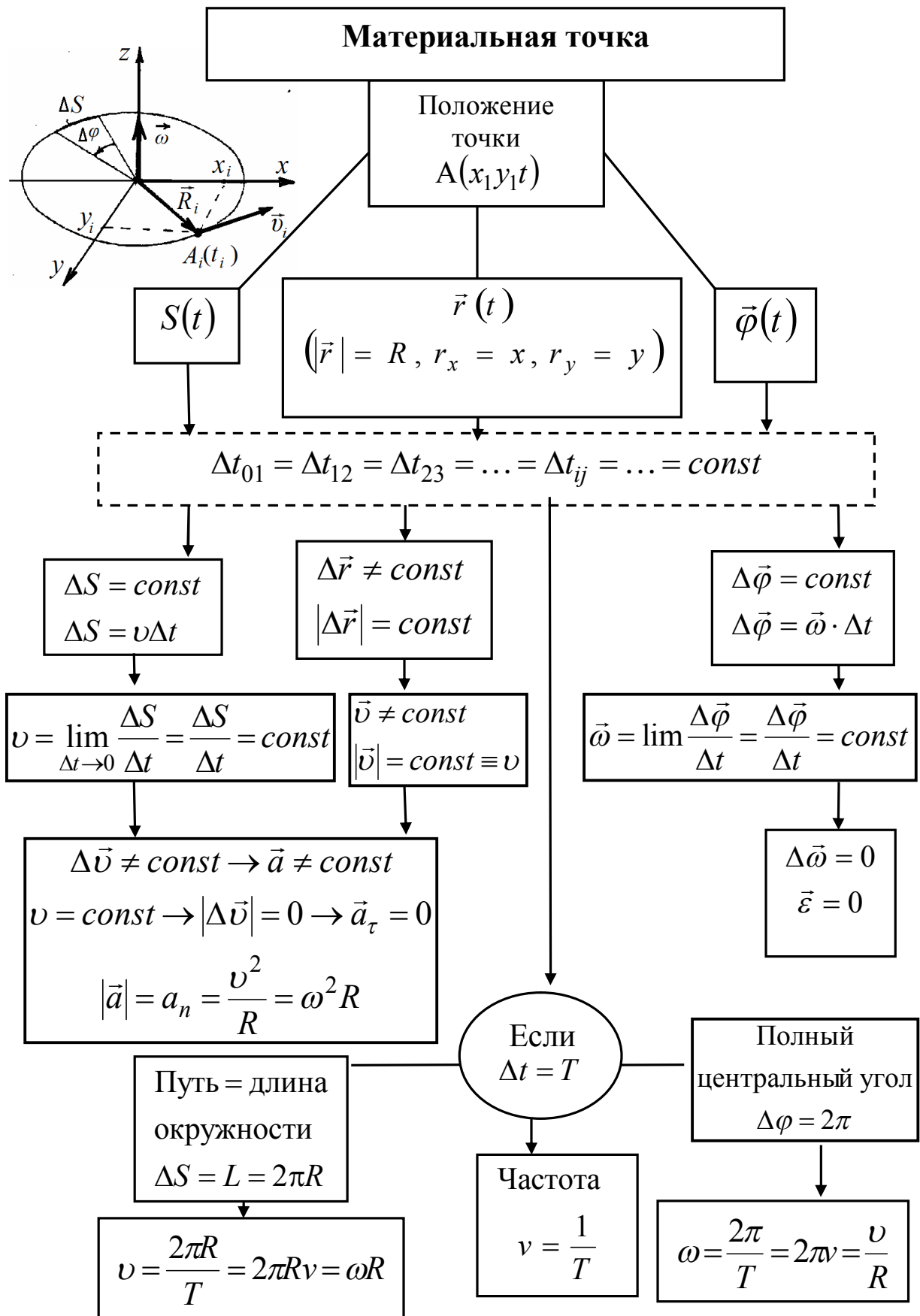


Рис. 3.27 Параметры равномерного движения материальной точки по окружности



### *Новые слова, словосочетания и языковые конструкции*

безразмерный	дальность, диаметр	полный
бросить	исключить	радиан
брошено	максимально	рассматривать
буравчик (винт)	оборот	случай
вверх	окружность	сопротивление
вертикально	описывать	уравнение
вершина	парабола	центральный
выпуклость	период	центростремительный
высота	поворачиваться	частный
горизонт	подъем	частота
горизонтально		

1. **Что движется как.**

**Тело движется с постоянным ускорением.**

2. **Что соответствует чему.**

**Значение  $t_n = 0$  соответствует моменту броска.**

3. **Что можно рассматривать как.**

**Движение тела, брошенного вертикально можно рассматривать как частный случай движения тела, брошенного под углом к горизонту.**

### *Контрольные вопросы*

1. Что такое криволинейное переменное движение?
2. Как определяют нормальное ускорение при криволинейном движении?
3. Что такое криволинейное равномерное движение?
4. Какое движение точки по окружности называют равномерным?
5. Что можно сказать о характере равномерного движения по окружности?
6. Что такое период вращения?
7. Что такое частота вращения?
8. Какая связь между угловой скоростью, частотой и периодом?
9. Какая связь между линейной и угловой скоростью?
10. В каких единицах измеряется угловая скорость?

## 4 ДИНАМИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

*Динамика* – часть механики, которая изучает механическое движение и причины существования, и изменения этого движения (изменения скорости).

Основа динамики – три закона Ньютона.

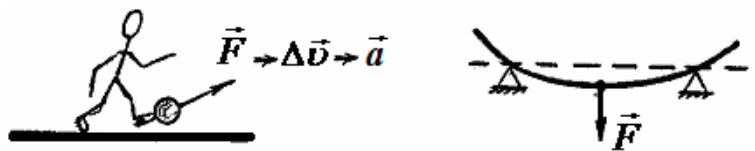
Центральная идея законов движения Ньютона такова: изменение состояния движения тел вызывается взаимодействием этих тел друг с другом.

### 4.1 Основные законы динамики

#### 4.1.1 Понятие силы

*Сила* ( $\vec{F}$ ) – физическая векторная величина, которая является количественной характеристикой действия одного тела на другое.

Сила сообщает (дает) телу ускорение или деформирует его (рис. 4.1):



а) ускорение тела;

б) деформация тела;

Рис. 4.1

Вектор силы ( $\vec{F}$ ) имеет *точку приложения*  $O$  – начало этого вектора.

$\vec{F}$  – связанный вектор, поэтому несколько сил, которые приложены к телу, можно сложить только по правилу параллелограмма (рис. 4.2).

**Равнодействующая (резльтирующая) сила:**

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{F}_p. \quad (4.1)$$

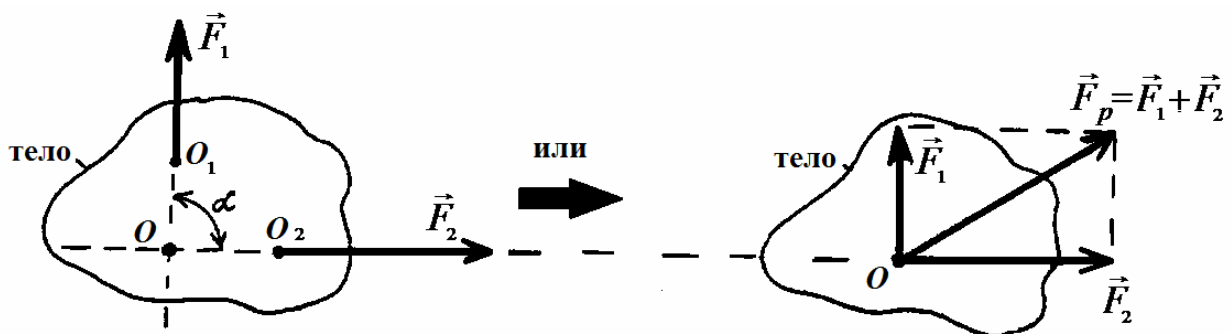


Рис. 4.2

$O$  – точка приложения равнодействующей силы  $\vec{F}_p$ ;

$$|\vec{F}_p| = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2 \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot \cos \alpha} \quad (4.2)$$

Если  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ , т.е.  $|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2|$  (рис. 4.3), тогда

$$\vec{F}_p = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0. \quad (4.3)$$

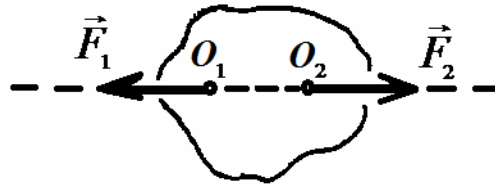


Рис. 4.3

Силы,  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ , равнодействующая которых равна нулю, называются **уравновешенными силами**.

#### 4.1.2 Первый закон Ньютона. Масса тела

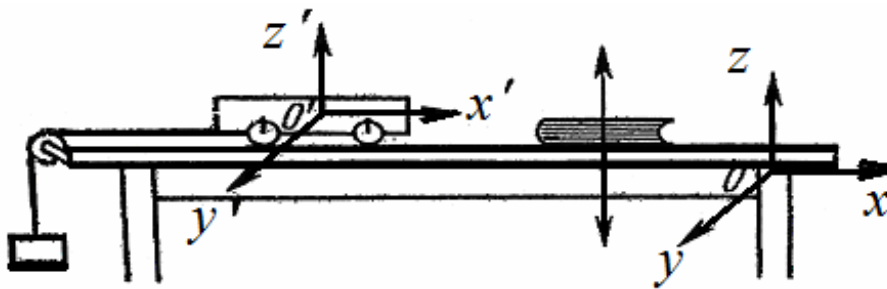


Рис. 4.4

Существуют системы отсчета, относительно которых скорость тела не изменяется, если на него не действуют другие тела или действие других тел уравновешивается. Такие системы отсчета называют **инерциальными системами отсчета**.

**Первый закон Ньютона:** если на тело не действуют другие тела или действия других тел уравновешиваются, то тело сохраняет состояние покоя или движется равномерно и прямолинейно относительно инерциальных систем отсчета.

**Первый закон Ньютона** называют ещё **законом инерции**: **инерция** – явление сохранения модуля и направления скорости тел относительно инерциальных систем отсчета.

Все инерциальные системы отсчета находятся в покое или движутся с постоянной скоростью друг относительно друга.

**Неинерциальные системы отсчета** движутся с ускорением относительно инерциальных систем. В нашем примере (рис. 4.4) стол –

тело отсчета инерциальной системы, тележка – тело отсчета неинерциальной системы.

Мы будем рассматривать движение тел относительно инерциальных систем отсчета.

Рассмотрим пример, когда действие на тело других тел не уравнивается. На столе находятся два одинаковых шара. Первый шар движется со скоростью  $\vec{v}_{01}$ , второй – находится в покое  $\vec{v}_{02} = 0$  (рис. 4.5 а).

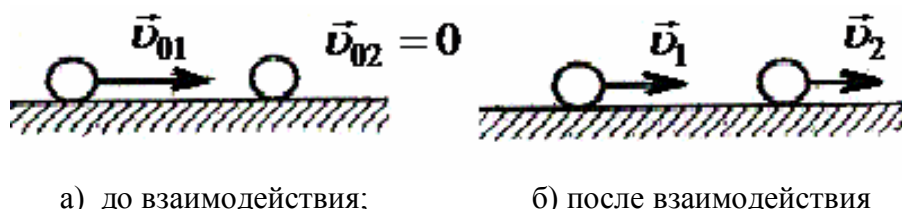


Рис. 4.5 Движение шаров

При встрече шары действуют друг на друга (взаимодействуют) в результате их скорости изменяются (рис. 4.5, б). Действие Земли и опоры (стола) на шары уравнивается, поэтому причиной изменения скоростей шаров является их действие друг на друга.

Обозначим:

$\Delta \vec{v}_1 = \vec{v}_1 - \vec{v}_{01}$  – изменение скорости первого шара;

$\Delta \vec{v}_2 = \vec{v}_2 - \vec{v}_{02}$  – изменение скорости второго шара.

Измерения показывают, что для одинаковых шаров  $|\Delta \vec{v}_1| = |\Delta \vec{v}_2|$ , т.е. при взаимодействии одинаковых тел их скорости изменяются одинаково.

Опыты с разными шарами показывают: при взаимодействии разных тел их скорости изменяются неодинаково.

**Инертность** - свойство тел по-разному изменять свою скорость при взаимодействии.

Чем меньше изменяется скорость тела при взаимодействии, тем больше инертность этого тела.

Инертность состоит в том, что для изменения скорости движения тела данной силой требуется некоторое время. Чем больше это время, тем больше инертность тела.

**Масса** ( $m$ ) – физическая скалярная величина, количественно характеризующая инертные свойства тела,  $[m] = 1$  кг.

Эталон массы сделан из сплава иридия и платины, находится в г. Севре близ Парижа.

При взаимодействии двух тел

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{|\Delta \vec{v}_2|}{|\Delta \vec{v}_1|}. \quad (4.4)$$

Так как  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t$ ;  $|\vec{a}_1| = \frac{|\Delta \vec{v}_1|}{\Delta t}$ ,  $|\vec{a}_2| = \frac{|\Delta \vec{v}_2|}{\Delta t}$ , тогда

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{|\Delta \vec{a}_2|}{|\Delta \vec{a}_1|}. \quad (4.5)$$

Массу можно определить по взаимодействию тела массой  $m_T$  с эталоном (телом известной массы  $m_{\text{эт}}$ ):

$$\frac{m_T}{m_{\text{эт}}} = \frac{a_{\text{эт}}}{a_T}.$$

Масса, как мера инертности тела, определяется отношением модуля ускорения эталона  $a_{\text{эт}}$  к модулю ускорения тела  $a_T$  при взаимодействии его с эталоном:

$$m_T = \frac{a_{\text{эт}}}{a_T} = m_{\text{эт}}.$$

### 4.1.3 Второй закон Ньютона в классической и релятивистской механике

**Второй закон Ньютона:** сила, действующая на тело, равна произведению массы тела на ускорение, сообщаемое данное силой:

$$\boxed{\vec{F} = m\vec{a}}, [F] = 1 \text{ Н (ньютон)}, \quad (4.6)$$

**1 Н** – это такая постоянная сила, которая сообщает телу массой 1 кг ускорение 1 м/с<sup>2</sup>:

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

Данная сила только сообщает телу ускорение и не зависит от действия других сил на это тело.

**Основное уравнение динамики** – если на тело действует несколько сил, то геометрическая сумма всех внешних сил равна произведению массы тела на ускорение, с которым движется тело под действием всех сил:

$$\boxed{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = m\vec{a}}, \quad (4.7)$$

$$\boxed{\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = m\vec{a}},$$

Направление ускорения  $\vec{a}$  совпадает с направлением равнодействующей

силы  $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i$ .

Этот закон применим:

1. При движении тел со скоростями гораздо меньшими скорости света ( $v \ll c$ ).
2. В инерциальной системе отсчета.

Второй закон Ньютона в импульсной форме, применим как в классической механике (механике Ньютона), так и в релятивистской (механике Эйнштейна):

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \Rightarrow \vec{F}\Delta t = m\vec{v} - m\vec{v}_0 \quad (4.8)$$

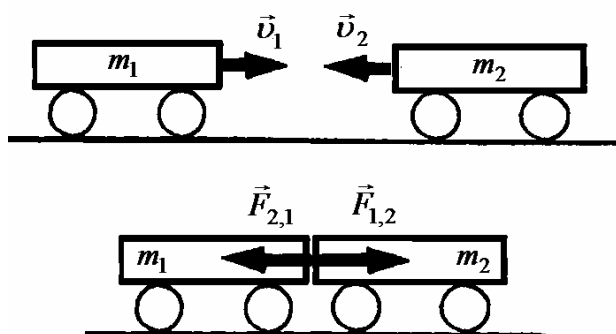
где  $\vec{F}\Delta t$  - импульс силы;

$m\vec{v} = \vec{p}$  - **импульс тела** – это векторная величина, равная произведению массы тела на его скорость,  $[p] = \text{кг} \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

**Второй закон Ньютона в импульсной форме** – импульс силы, действующей на тело, равен изменению импульса тела:

$$\boxed{\vec{F}\Delta t = m\vec{v} - m\vec{v}_0}, \text{ или } \boxed{\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}}. \quad (4.9)$$

#### 4.1.4 Третий закон Ньютона



**Третий закон Ньютона:** тела действуют друг на друга с силами, направленными вдоль одной прямой, равными по модулю и противоположными по направлению  $\vec{F}_{1,2} \uparrow \downarrow \vec{F}_{2,1}$ :

$$\boxed{\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}}, \boxed{F_{1,2} = F_{2,1}}. \quad (4.10)$$

Рис. 4.6

Силы  $\vec{F}_{1,2}$  и  $\vec{F}_{2,1}$ , по третьему закону Ньютона, приложены к *разным телам*, поэтому невозможно определить равнодействующую этих сил: найти их геометрическую сумму.

#### *Новые слова, словосочетания и языковые конструкции*

взаимодействие  
внешний  
возникать

приложить  
причина  
результатирующая сила

вызывать	равнодействующая сила
деформировать	сообщать
инертность	сохранять
инерция	сохранение
инерциальные системы	существовать
неинерциальные системы	точка приложения
компенсировать (уравновешивать)	уравновешенные силы

1. **На что действует что.**

**На спутник Земли и на тела, которые в нем находятся** (например, на тело космонавта), **действует только сила тяжести.**

2. **Кто находится где.**

**Спутник и космонавт находятся в невесомости.**

3. **Что вызывается чем.**

**Изменение состояние движения тел вызывается взаимодействием этих тел.**

4. **К чему приложено что.**

*К данному телу приложена сила.*

5. **Что сообщает что.**

**Сила сообщает телу ускорение или деформирует тело.**

6. **Если – то.**

**Если на тело не действуют другие тела, то тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения относительно инерциальных систем отсчета.**

7. **Что движется относительно чего.**

**Неинерциальные системы отсчета движутся с ускорением относительно инерциальных систем.**

8. **Чем, тем.**

**Чем меньше изменяется скорость тела при взаимодействии, тем больше инертность этого тела.**

9. **Что совпадает с чем.**

**Направление ускорения совпадает с направлением равнодействующей силы.**

10. **Что не является чем.**

**Силы взаимодействия двух тел не являются уравновешенными силами, потому что они действуют на разные тела**

11. Словосочетание «уравновешенные силы» может употребляться только во множественном числе.
12. Выражение «действия на данное тело других тел компенсируются» является синонимом выражения «на данное тело действуют уравновешенные силы».

**Контрольные вопросы:**

1. Что изучает динамика?
2. Каковы причины изменения скорости тел?
3. При каких условиях тело может двигаться равномерно и прямолинейно?
4. Сформулируйте I закон Ньютона.
5. О каком явлении говорит I закон Ньютона?
6. Что такое инертность? Какая физическая величина - мера инертности?
7. В каких системах отсчета выполняется I закон Ньютона?
8. Что такое сила? Это вектор или скаляр?
9. Запишите формулы, связывающие  $\vec{a}$ ,  $\vec{F}$ , и  $m$ .
10. Сформулируйте II закон Ньютона.
11. Назовите единицу силы. Как она составляется из основных единиц?
12. Сформулируйте III закон Ньютона.
13. Как называют силы  $\vec{F}_{12}$  и  $\vec{F}_{21}$  в III законе Ньютона?
14. Можно ли сказать, что силы действия и противодействия уравновешиваются?
15. Как связаны ускорения тел при взаимодействии?
16. Может ли тело, на которое действует только одна сила, двигаться с постоянной скоростью или находиться в покое?
17. Поезд движется прямолинейно, на него действует сила тяги тепловоза равная силе трения. Как движется поезд?
18. Почему и куда падает человек, стоящий в автобусе, при резком увеличении и уменьшении скорости автобуса?
19. Два вагона разных масс движутся с одинаковой скоростью. Какой вагон остановится раньше, если на оба вагона действует одинаковая тормозящая сила?
20. Ученик записал III закон Ньютона  $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$  и сделал вывод, что  $\vec{F}_{12} + \vec{F}_{21} = 0$ , следовательно силы  $\vec{F}_{12}$  и  $\vec{F}_{21}$  уравновешиваются, и тела при взаимодействии не получают ускорений. В чём ошибка ученика?



## 4.2 Силы в механике



### 4.2.1 Гравитационные силы

Все тела в природе притягивают друг друга гравитационными силами (рис. 4.7).

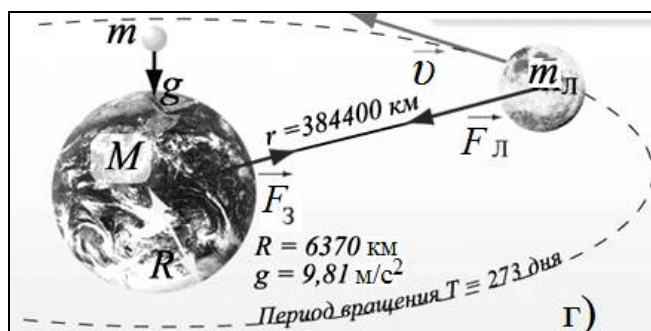


Рис. 4.7

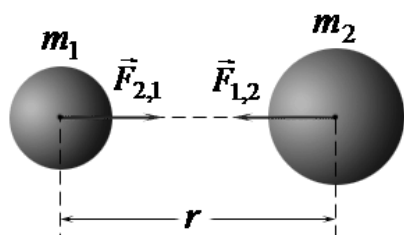


Рис. 4.8

На рис. 4.8  $\vec{F}_{1,2}$  и  $\vec{F}_{2,1}$  – силы гравитационного взаимодействия (притяжения)  $\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}$  – по III закону Ньютона:  $|\vec{F}_{1,2}| = |\vec{F}_{2,1}| \equiv F_{\text{гр}}$ .

**Закон всемирного тяготения Ньютона:** силы, с которыми тела притягивают друг друга, по модулю прямо пропорциональны массам этих тел и обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними.

$$F_{\text{гр}} = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}, \quad (4.11)$$

где  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}$  – гравитационная постоянная.

Одно из проявлений силы всемирного тяготения – сила тяжести.

**Сила тяжести** ( $\vec{F}_{\text{тяж}}$ ) – это сила, с которой данное тело притягивается к Земле (рис. 4.7 в).

Под действием силы тяжести тело массой  $m$  падает с ускорением  $\vec{g}$  (ускорением свободного падения), тогда по II закону Ньютона:

$$\boxed{\vec{F}_{\text{тяж}} = m \cdot \vec{g}}. \quad (4.12)$$

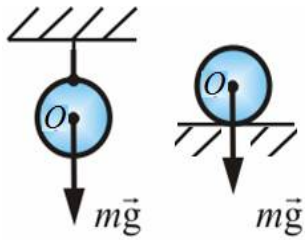


Рис. 4.9

Точка приложения силы тяжести (т.О) называется **центром тяжести**. Вектор  $\vec{F}_{\text{тяж}}$  направлен всегда к центру Земли (на рисунке 4.9 – вертикально вниз).

Ускорение свободного падения  $\vec{g}$  можно вычислить (рис. 4.10), если  $F_{\text{гр}} = F_{\text{тяж}}$ :

$$mg = G \frac{mM}{(R_3 + h)^2} \text{ или } g_h = G \frac{M}{(R_3 + h)^2}; \quad (4.13)$$

где  $m$  – масса тела;

$M$  – масса Земли ( $M \approx 6 \cdot 10^{24}$  кг);

$R_3$  – радиус Земли ( $R_3 \approx 6,4 \cdot 10^6$  м);

$h$  – высота подъема тела;

$g$  – не зависит от массы тела.

Ускорение свободного падения у поверхности Земли ( $h \approx 0$ ):

$$g = G \frac{M}{R_3^2}. \quad (4.14)$$

На широте Москвы  $g \approx 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = \text{const}$ .

**Пример.** Масса Луны в 81 раз меньше массы Земли и ее радиус в 3,7 раза меньше радиуса Земли. Какое ускорение свободного падения на Луне?

$$m = \text{const} \Rightarrow \frac{mg_3}{mg_l} = \frac{M_3}{M_l} \cdot \left(\frac{R_l}{R_3}\right)^2 = 5,9 \Rightarrow g_l = \frac{g_3}{5,9} \approx 1,66 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

## 4.2.2 Движение искусственных спутников Земли.

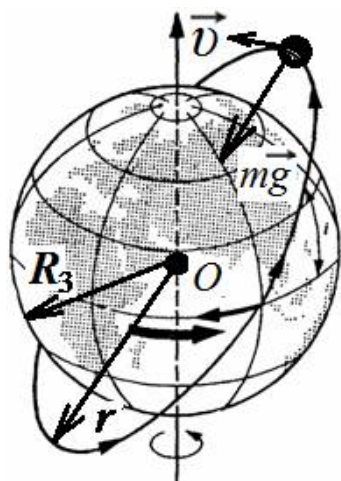


Рис. 4.11

**Искусственным спутником Земли** называют тело, которое самостоятельно движется вокруг Земли по замкнутой траектории (орбите).

Найдем скорость, при которой спутник движется по круговой орбите радиусом  $r$  (рис. 4.11). Будем считать, что на спутник действует только сила тяжести (другие силы намного меньше, чем сила тяжести). Эта сила сообщает ему центростремительное ускорение  $a_n = v^2/r$ ,  $mg = mv^2/r$ , откуда:

$$v = \sqrt{gr}. \quad (4.15)$$

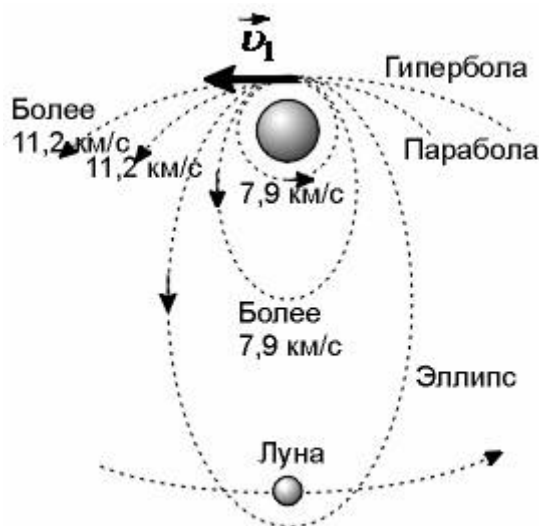


Рис. 4.12

**Первая космическая скорость** ( $v_1$  - круговая скорость) - это минимальная скорость, которую необходимо сообщить телу, чтобы оно могло двигаться вокруг Земли по круговой орбите, то есть превратиться в искусственный спутник Земли (рис. 4.12). Вблизи поверхности Земли:

$$v_1 = \sqrt{gR_3} = 7,91 \cdot 10^3 \text{ м/с}^2. \quad (4.16)$$

Для высоты 1000 км над земной поверхностью  $v_1 = 7,35 \cdot 10^3 \text{ м/с}^2$ .

Первой космической скорости недостаточно для того чтобы тело могло выйти из сферы земного притяжения. При увеличении скорости спутника ( $v > v_1$ ) круговая орбита превращается в эллиптическую (рис. 4.12) и будет все более и более вытягиваться и удаляться от Земли. При некоторой скорости  $v_2$  она разорвется и превратится в параболу.

**Вторая космическая скорость** ( $v_2$  - параболическая скорость) - это наименьшая скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно могло преодолеть притяжение Земли и превратиться в спутник Солнца, то есть, чтобы его орбита в поле тяготения Земли стала параболической:

$$v_2 = \sqrt{2gR_3} = 11,2 \cdot 10^3 \text{ м/с}^2. \quad (4.17)$$

На высоте 1000 км  $v_2 = 10,4 \cdot 10^3 \text{ м/с}^2$ .

Вторую космическую скорость необходимо иметь космическим аппаратам, чтобы попасть на Луну или на планеты Солнечной системы – Венеру, Марс, Юпитер и т.д. Первыми космическими аппаратами, которые достигли Луны и Венеры, были советские автоматические станции «Луна-2» (1959 г.) и «Венера-3» (1965 г.).

**Третья космическая скорость** ( $v_3$ ) - это скорость, которую необходимо сообщить телу на Земле, чтобы оно покинуло пределы Солнечной системы, преодолев притяжение Солнца.

$$v_3 = 16,7 \cdot 10^3 \text{ м/с}^2. \quad (4.18)$$

### 4.2.3 Силы упругости

Силы упругости возникают в теле при деформации этого тела (т.е. при изменении его формы или размеров) (рис. 4.13).

Это объясняется электромагнитными силами взаимодействия атомов данного тела.

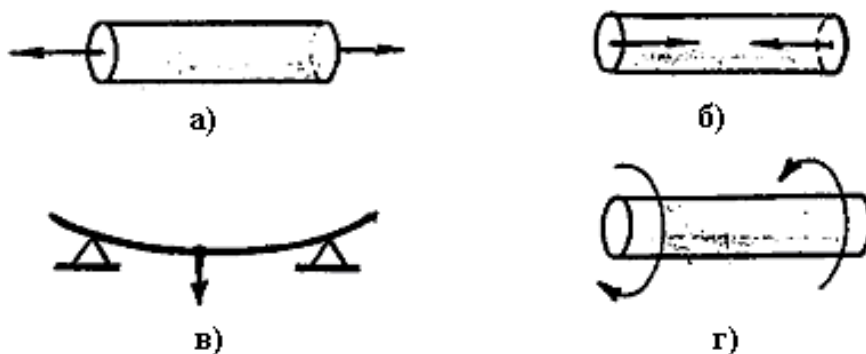


Рис. 4. 13 Виды деформации: а – растяжение; б – сжатие; в – изгиб; г – кручение.

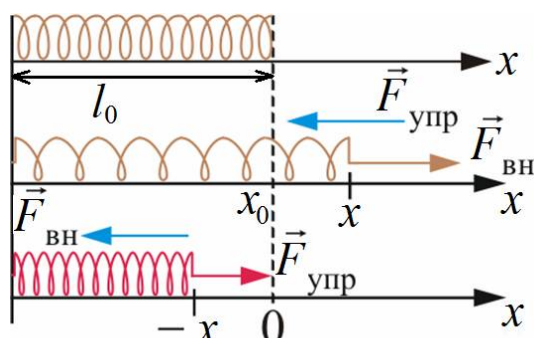


Рис. 4.14

Под действием внешней силы  $\vec{F}_{вн}$  (рис. 4.14) деформация тела равна:

$$\Delta x = x - x_0 \quad (4.19)$$

Тогда по III закону Ньютона сила упругости стремится восстановить начальную форму тела

$$\vec{F}_{упр} = -\vec{F}. \quad (4.20)$$

**Закон Р. Гука.** Сила упругости пропорциональна деформации тела.

$$F_{упр} = -k\Delta x. \quad (4.21)$$

**Коэффициент упругости** (жесткость тела)  $k$  характеризует механические свойства тела:

$$k = \frac{F_{\text{упр}}}{\Delta x} = \text{const}, \quad [k] = 1 \text{ Н/м}. \quad (4.22)$$

Закон Гука лежит в основе действия прибора для измерения силы-динамометра.

Рассмотрим силы упругости в механике, когда тело находится на опоре (рис. 4.15):

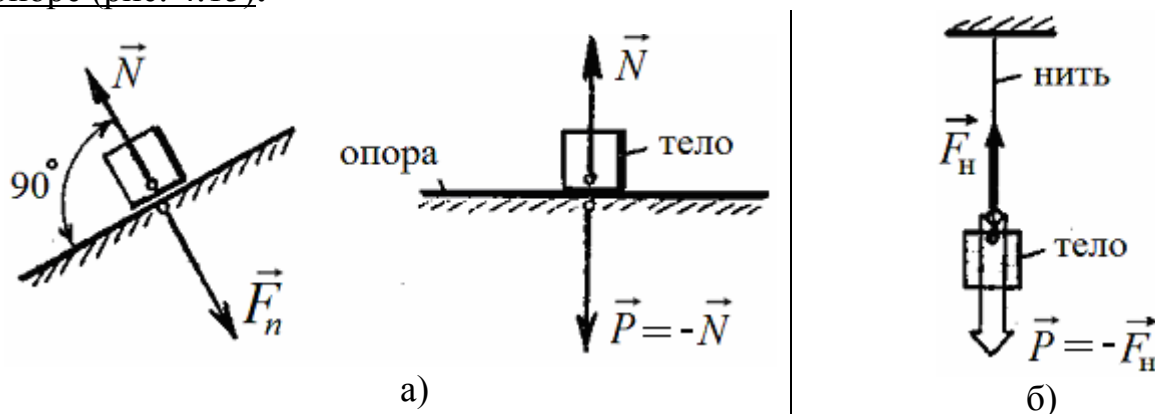


Рис. 4.15 Силы упругости в механике: а – опора – поверхность другого тела (сжатие тела); б – опора – подвес (нить) (растяжение тела)

$\vec{F}_n$  - сила нормального давления } РЕАКЦИЯ ( $\vec{N} = -\vec{P}$ )  $\Rightarrow$  приложена к  
 $\vec{N}$  - сила реакции опоры } опоре.

$(\vec{F}_n$  - сила натяжения нити) } РЕАКЦИЯ ( $\vec{F}_n = -\vec{P}$ )  $\Rightarrow$  приложена к телу.

**Вес тела** ( $\vec{P}$ ) – это сила, с которой это тело действует на горизонтальную опору или вертикальный подвес.

Вес тела зависит от движения опоры в вертикальном направлении (рис. 4.16).

**Пример.** На тело, которое движется вертикально, действуют две силы:

- 1)  $m\vec{g} = \text{const}$  - сила тяжести;
- 2)  $\vec{N}$  - сила реакции опоры ( $\vec{N} = -\vec{P}$ , т.е.  $P = N$ ).

Запишем уравнение движения, для тела, используя основное уравнение

динамики  $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = m\vec{a}$  :

$$\vec{N} + m\vec{g} = m\vec{a} \text{ или } N_x + mg_x = ma_x,$$

где  $N_x = N$ ;  $mg_x = -mg$ .

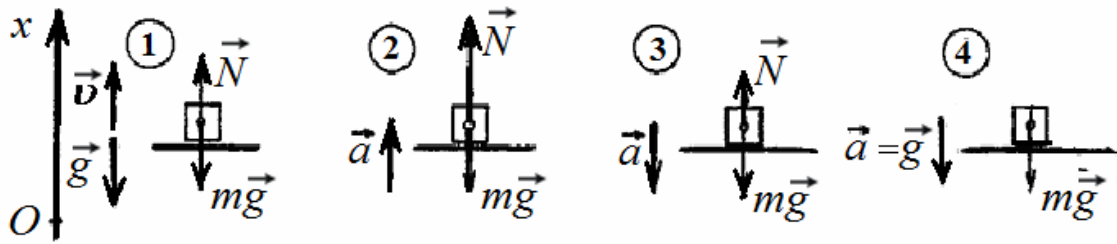


Рис. 4.16 Движение тела на опоре:

- 1)  $a_x = 0 \Rightarrow N - mg = 0$  или  $N = mg$ ;
- 2)  $a_x = a$  ( $\vec{a} \uparrow \uparrow Ox$ )  $\Rightarrow N - mg = ma$  или  $N = mg + ma = m(g + a)$ ;
- 3)  $a_x = -a$  ( $\vec{a} \downarrow \uparrow Ox$ )  $\Rightarrow N - mg = -ma$  или  $N = mg - ma = m(g - a)$ ;
- 4)  $a_x = -g \Rightarrow N - mg = -mg$  или  $N = mg - mg = 0$ .

Видно, что вес тела  $P = N$  при  $v \uparrow \uparrow Ox$  будет:

1.  $P = mg$ , если  $\vec{a} = 0$  ( $\vec{v} = const$ );
2.  $P > mg$ , если  $\vec{a} \uparrow \downarrow \vec{g}$ ;
3.  $P < mg$ , если  $\vec{a} \downarrow \downarrow \vec{g}$ ;
4.  $P = 0$ , если  $\vec{a} = \vec{g}$  – состояние невесомости.

#### 4.2.4 Силы трения

Известно, что при движении одного тела по поверхности другого возникает сопротивление движению, называемое трением. Силы трения действуют вдоль поверхности тел при их непосредственном соприкосновении, они препятствуют относительному движению соприкасающихся тел, а в некоторых случаях делают это движение невозможным. Но роль сил трения вовсе не сводится к тому, чтобы тормозить движение. Иногда движение не могло бы возникнуть, если бы не было силы трения. В нашей повседневной жизни силы трения играют огромную роль. В одних случаях они приносят вред, в других – огромную пользу. Без трения невозможно было бы построить дома, шить одежду, передвигаться по поверхности Земли. Передвигаясь, человек отталкивает от себя Землю назад, а Земля с такой же силой толкает человека вперед. Эта толкающая сила и является силой трения между ногами человека и землёй. Чем сильнее человек толкает землю, тем больше сила трения и тем быстрее движется человек.

Различают два вида трения:

- трение, возникающее между сухими поверхностями твердых тел (сухое трение);
- трение о жидкую и газообразную среду (называемое «вязкое» трение).

Мы будем рассматривать в основном сухое трение. При изучении сухого трения остановимся на двух его видах: трении покоя и трении движения (скольжения, качения).

Силу трения, действующую между двумя неподвижными друг относительно друга телами, называют **силой трения покоя**.

Если мы действуем на брусок, лежащий на столе (рис. 4.17), с некоторой горизонтальной силой  $\vec{F}$ , а брусок не движется ( $\vec{v} = 0$ ), это значит, что на него в противоположную сторону действует сила трения покоя ( $\vec{F}_{\text{тр}}$ ) равная по величине силе  $\vec{F}$ .

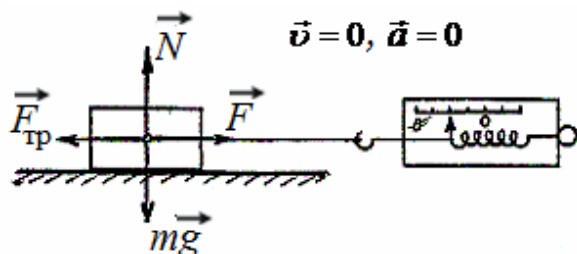


Рис. 4.17

Если  $\vec{a} = 0$ , тогда  $\sum_{i=1}^n \vec{F} = 0 \Rightarrow$

$$m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F} + \vec{F}_{\text{тр}} = 0$$

уравновешенные силы

$$\boxed{N = -mg} \quad \boxed{F = -F_{\text{тр}}}. \quad (4.23)$$

Величина силы трения покоя может меняться в зависимости от приложенной силы. **Наибольшее значение силы трения, при котором еще не наступает скольжение, называется максимальной силой трения покоя.** Таким образом, сила трения покоя по величине может меняться от 0, если на тело не действуют никакие силы вдоль трущейся поверхности, до некоторого максимального значения  $F_{\text{макс}}$  (рис. 4.18). Сила трения покоя, как и любая сила, имеет направление: в сторону, противоположную возможному перемещению.

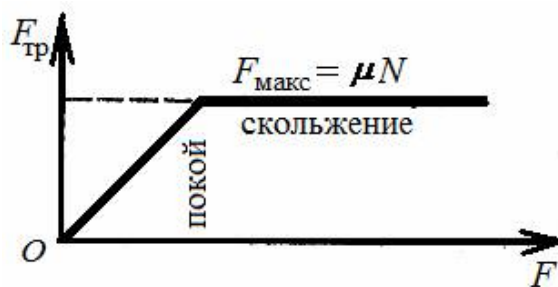


Рис. 4.18 График зависимости силы трения покоя от приложенной силы

Опытным путем установлено, что между величиной максимальной силы трения покоя и силой нормального давления (силой, с которой тело давит на соприкасающуюся с ним поверхность, перпендикулярно этой поверхности) существует прямая пропорциональная зависимость

$$F_{\text{макс}} = \mu N, \quad (4.24)$$

где  $N$  – сила нормального давления;

$\mu$  – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом трения. Этот коэффициент характеризует обе трущиеся поверхности, зависит от их природы и качества обработки.

При движении тела по горизонтальной поверхности на него действует **сила трения скольжения**, по величине равная максимальной силе трения покоя и направленная в сторону, противоположную движению:

$$\boxed{F_{\text{тр}} = \mu N}, \quad (4.25)$$

$$\mu = \frac{F_{\text{тр}}}{F_n} = \text{const}.$$

При качении тела по поверхности на него действует **сила трения качения** (рис. 4.19). Причиной трения качения является деформация тела и поверхности, по которой происходит качение. При качении тела сила реакции поверхности вследствие деформации направлена не перпендикулярно поверхности. Поэтому равнодействующая сил тяжести и силы реакции не равна нулю. Эта равнодействующая и есть сила трения качения. Ее направление противоположно направлению скорости тела.

$$\boxed{F_{\text{тр}} = \mu \frac{N}{R}}, \quad (4.26)$$

где  $R$  – радиус колеса.

Для твердых тел сила трения качения намного меньше, чем сила трения скольжения, поэтому для уменьшения трения в машинах используют колеса и подшипники (рис. 4.20). Сила трения будет меньше, если использовать смазку.

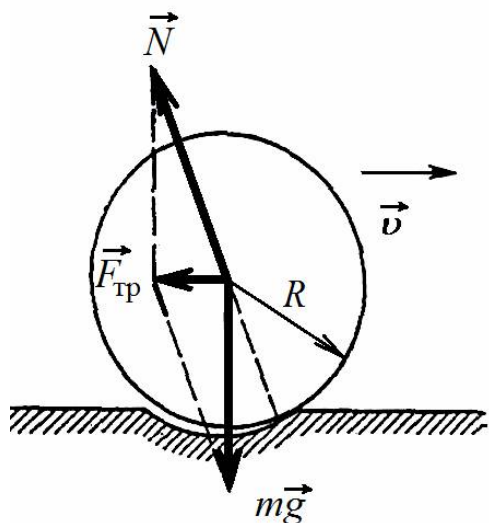


Рис. 4.19

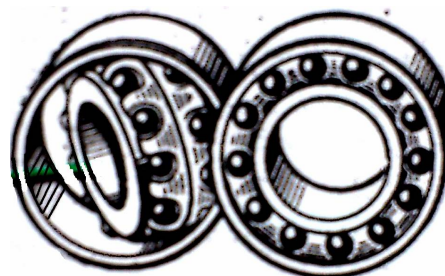


Рис. 4.20



## *Новые слова, словосочетания и языковые конструкции*

автоматическая станция	поверхность
аппарат	подвес
атом	притягивать
вес	притяжение
всемирное тяготение	растяжение
горизонтальный	сжатие
гравитация	сила реакции
гравитационные силы	сила трения
давление	сила тяжести
изгиб	соприкосновение
искусственный спутник	соприкасающаяся
космическая скорость	тормозить
коэффициент упругости	трение вязкое
максимально	трение качения
машины	трение покоя
обратно пропорционально	трение скольжения
прямо пропорционально	тяготение
опора	тяжесть
орбита круговая	упругодеформированный
орбита эллиптическая	центростремительное ускорение
падать	центр тяжести
падение	электромагнитный

### **1. Что справедливо для чего.**

**Закон всемирного тяготения справедлив для материальных точек, а также для тел, которые имеют форму шара.**

### **2. Что направлено как.**

**Вектор силы тяжести ( $\vec{F}_{тяж}$ ) всегда направлен к центру Земли.**

### **3. Что возникает когда.**

**Силы упругости возникают в теле при деформации этого тела**

### **4. Что пропорционально чему.**

**Сила упругости пропорционально деформации тела.**

### **5. Что характеризует что.**

**Коэффициент упругости ( $k$ ) характеризует механические свойства тел.**

### **6. Что зависит от чего.**

**Вес тела зависит от движения опоры в вертикальном направлении.**

### **7. Как установлено что.**

**Опытным путем установлено, что между величиной максимальной силы трения и силы нормального давления существует прямопропорциональная зависимость.**

### Контрольные вопросы

1. Какими силами притягивают друг друга все тела?
2. Сформулируйте закон всемирного тяготения.
3. Чему равна гравитационная постоянная? Какие у нее единицы измерения?
4. Что такое сила тяжести?
5. Запишите формулу для силы тяжести из закона всемирного тяготения.
6. Какое ускорение получает тело под действием силы тяжести? Запишите формулу для силы тяжести из II закона Ньютона.
7. Как меняется ускорение свободного падения и сила тяжести при удалении на высоту  $h$  над поверхностью Земли? Запишите формулы.
8. Что такое искусственный спутник?
9. Какая сила действует на искусственный спутник?
10. С каким ускорением движется искусственный спутник? Какая сила дает спутнику это ускорение?
11. Что такое первая космическая скорость?
12. Что такое деформация?
13. Какие силы появляются при деформации тел?
14. Как зависит сила упругости от величины деформации?
15. Какое взаимное направление деформации и силы упругости?
16. Сформулируйте закон Гука.
17. Что такое  $k$  в законе Гука? Какие его единицы измерения? От чего зависит  $k$ ?
18. Тело висит на подвесе. Какая сила действует на него со стороны подвеса?
19. Тело лежит на опоре. Как называется сила, с которой опора действует на тело?
20. Как направлена сила  $\vec{N}$  по отношению к опоре?
21. Что такое вес тела?
22. Ускорение тела равно нулю. Чему равен его вес?
23. Ускорение тела направлено вверх. Чему равен его вес?
24. Ускорение тела направлено вниз. Чему равен его вес?
25. Что такое невесомость? При каком условии тело находится в невесомости?
26. Когда появляется сила трения скольжения?
27. Как направлена сила трения по отношению к скорости движения тела?
28. Как направлено ускорение, которое дает телу сила трения?
29. Что такое  $\mu$ ? Какие единицы измерения  $\mu$ ? От чего зависит коэффициент трения?
30. Какие еще виды сил трения вы знаете?
31. Когда появляется сила трения качения?

### 4.3 Движение тел под действием системы сил

#### Схема решения задач по динамике

1. Сделать рисунок к задаче, указав все действующие на тело силы.
2. Указать направление оси  $Ox$ , вдоль которой движется тело. Ось рационально ориентировать по направлению ускорения движущегося тела.
3. Если при проецировании физических величин на выбранную ось получается уравнение с двумя неизвестными, необходимо ввести вторую ось  $Oy$ , перпендикулярно первой, и проецировать величины на нее.
4. Записать уравнение движения (основное уравнение динамики) тела в векторной форме.
5. Найти проекции на оси  $Ox$  и  $Oy$  всех сил действующих на тело.

#### 4.3.1 Поступательное движение тела под действием системы сил

Часто на материальную точку действует одновременно несколько сил (система сил). Точки приложения таких сил совпадают – они находятся в данной материальной точке.

Иногда тело рассматривают как совокупность материальных точек. Движение тела может быть поступательным, вращательным или сложным. При поступательном движении все точки имеют одинаковые скорости, ускорения и траектории. Поэтому поступательное движение тела можно рассматривать как движение материальной точки.

Тело может двигаться с ускорением под действием системы нескольких сил. Точки приложения этих сил могут не совпадать. Но если движение тела является поступательным, можно считать, что все силы, которые на него действуют, приложены в одной точке.

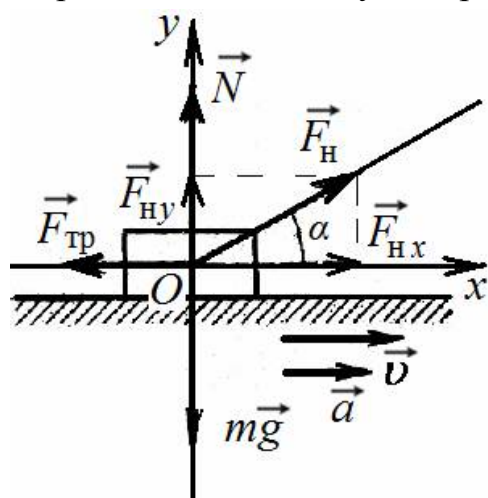


Рис. 4.21

Рассмотрим равноускоренное скольжение тела, которое тянут по столу с помощью нити под углом  $\alpha$  к поверхности стола (рис. 4.21). На тело действуют сила натяжения нити  $\vec{F}_{\text{Н}}$ , сила тяжести  $m\vec{g}$ , сила реакции стола  $\vec{N}$  и сила трения  $\vec{F}_{\text{тр}}$ . Под действием этих сил тело движется поступательно, поэтому можно условно считать, что точки приложения сил совпадают.

Если тело начинает двигаться из

состояния покоя ( $v_0 = 0$ ), тогда  $v > v_0 \Rightarrow \vec{a} \uparrow \uparrow \vec{v}$ .

Найдем ускорение этого тела, если известны масса  $m$  тела, угол  $\alpha$ , сила  $\vec{F}_H$  и коэффициент трения  $\mu$ .

- Уравнение движения тела будет иметь вид:

$$\boxed{\vec{F}_H + m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}} = m\vec{a}}. \quad (4.27)$$

- Запишем это уравнение в проекциях на оси координат  $Ox$  и  $Oy$ :

$$\boxed{F_{Hx} + mg_x + N_x + F_{\text{тр}x} = ma_x}, \quad (4.28)$$

$$\boxed{F_{Hy} + mg_y + N_y + F_{\text{тр}y} = ma_y}, \quad (4.29)$$

где  $F_{Hx} = F \cos \alpha$ ;  $g_x = 0 \Rightarrow mg_x = 0$ ;  $F_{\text{тр}x} = -F_{\text{тр}}$ ;  $N_x = 0$ ;  $a_x = a$ ;  
 $F_{Hy} = F \sin \alpha$ ;  $g_y = -g$ ;  $F_{\text{тр}y} = 0$ ;  $N_y = N$ ;  $a_y = 0$ .

С учетом всех составляющих уравнения (4.28) и (4.29) будут иметь вид:

$$F_H \cos \alpha - F_{\text{тр}} = ma, \quad (4.30)$$

$$F_H \sin \alpha - mg + N = 0. \quad (4.31)$$

- Из уравнения (4.30) определим ускорение тела:

$$\boxed{a = \frac{F_H \cos \alpha - F_{\text{тр}}}{m}}, \quad (4.32)$$

где  $F_{\text{тр}} = \mu N$ .

- Из уравнения (4.31) определим силу реакции опоры:

$$N = mg - F_H \sin \alpha. \quad (4.33)$$

Тогда с учетом всех составляющих уравнение (4.32) будет иметь вид:

$$\boxed{a = \frac{F_H \cos \alpha - \mu (mg - F_H \sin \alpha)}{m}}. \quad (4.34)$$

**Задача.** Тело массой 5 кг тянут с помощью нити вверх по наклонной плоскости ( $\alpha=30^\circ$ ) с ускорением  $2 \text{ м/с}^2$  ( $v_0=0$ ). Чему равна сила натяжения нити, если коэффициент трения  $\mu=0,2$ ?

Дано:

$$m = 5 \text{ кг};$$

$$\alpha = 30^\circ;$$

$$a = 2 \text{ м/с}^2;$$

$$\mu = 0,2$$

$$\vec{F}_H = ?$$

Решение:

На тело действуют сила натяжения  $\vec{F}_H$  нити, сила тяжести  $m\vec{g}$ , сила трения  $\vec{F}_{\text{тр}}$  и сила реакции опоры  $\vec{N}$  (рис. 4.22). Так как  $v_0=0$ , а тело движется с ускорением  $\vec{a} \uparrow \uparrow \vec{v}$ , тогда  $v > v_0$ .

1) Уравнение движения тела имеет вид:

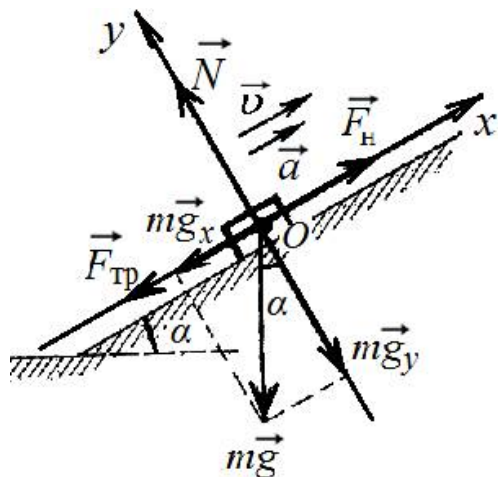


Рис. 4.22

$$\vec{F}_H + m\vec{g} + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{N} = m\vec{a}. \quad (4.35)$$

2) Запишем это уравнение в проекциях на оси координат:

$$Ox: F_H - F_{\text{тр}} - mg_x = ma, \quad (4.36)$$

$$Oy: N - mg_y = 0, \quad (4.37)$$

где  $m\vec{g}_x + m\vec{g}_y = m\vec{g}$ , следовательно

$$m\vec{g}_x = mg \sin \alpha, \quad m\vec{g}_y = mg \cos \alpha;$$

$$F_{\text{тр}} = \mu N. \quad (4.38)$$

3) Из уравнения (4.37) выразим силу реакции опоры:

$$N = mg \cos \alpha, \text{ тогда } F_{\text{тр}} = \mu (mg \cos \alpha).$$

4) Из уравнения (4.36) выразим силу натяжения нити:

$$F_H = ma + F_{\text{тр}} + mg_x, \quad (4.39)$$

подставив все составляющие в (4.39), получим выражение:

$$F_H = ma + \mu (mg \cos \alpha) + mg \sin \alpha = m[a + g(\mu \cos \alpha + \sin \alpha)]. \quad (4.40)$$

Вычисления:

$$F_H = 5 \text{ кг} [2 \text{ м/с}^2 + 9,8 \text{ м/с}^2 (0,2 \cdot 0,87 + 0,5)] = 38,15 \text{ Н.}$$

Ответ:  $F_H = 38,15 \text{ Н.}$

### 4.3.2 Равномерное движение тел по окружности под действием системы сил

Законы движения позволяют нам решить основную задачу механики. Если известны силы, которые действуют на данное тело, то можно определить координаты тела в любой момент времени или траекторию его движения. Рассмотрим несколько примеров вычисления сил при движении тела по окружности.

**Движение тела по выпуклому мосту.** Пусть выпуклый мост представляет собой дугу окружности радиусом  $R$ . Центр окружности т.О находится под мостом (рис. 4.23). При равномерном движении на транспорт (например, автомобиль) действуют сила тяжести  $m\vec{g}$  и сила реакции моста  $\vec{N}$ . Эти силы сообщают автомобилю центростремительное ускорение  $\vec{a}$ , направленное к центру кривизны моста.

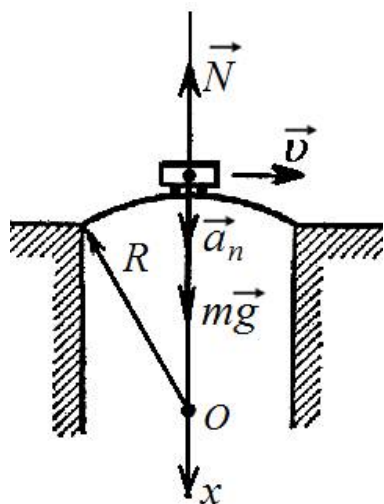


Рис. 4.23

- Уравнение движения тела имеет вид:

$$m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}_n. \quad (4.41)$$

- В проекциях на ось  $Ox$  уравнение имеет вид:

$$mg - N = ma_n, \quad (4.42)$$

откуда

$$N = mg - ma_n,$$

где  $a_n = v^2/R$ .

- Подставив в уравнение ускорение  $a_n$ :

$$N = mg - mv^2/R < mg \quad (4.43)$$

- По третьему закону Ньютона с такой же силой автомобиль действует на мост. Мы видим, что сила, с которой автомобиль давит на

выпуклый мост, меньше силы тяжести автомобиля ( $\vec{N} < m\vec{g}$ ).

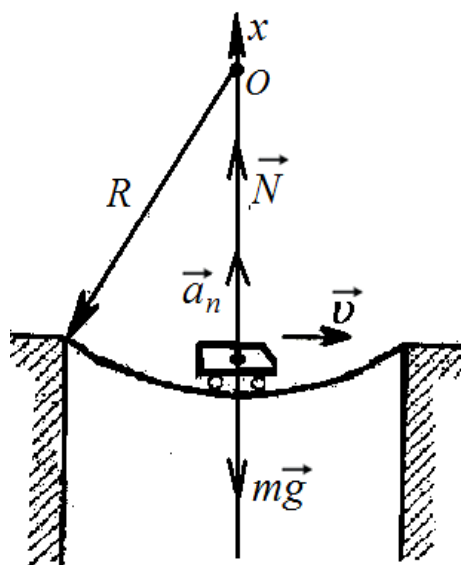


Рис. 4.24

#### *Движение тела по вогнутому мосту.*

Пусть вогнутый мост представляет собой дугу окружности радиусом  $R$ . Центр окружности т.О находится над мостом (рис. 4.24).

- Запишем уравнение движения автомобиля в векторной форме:

$$m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}_n, \quad (4.44)$$

- В проекциях на ось  $Ox$  уравнение имеет вид:

$$-mg + N = ma_n, \quad (4.45)$$

откуда  $N = mg + ma_n$ .

➤ Тогда

$$N = mg + mv^2/R > mg. \quad (4.46)$$

При движении по вогнутому мосту сила давления автомобиля на мост больше силы тяжести автомобиля ( $\vec{N} > m\vec{g}$ ). Такие мосты строить невыгодно. Обычно строят выпуклые мосты.

*Движение тела на нити в вертикальной плоскости.* На тело действуют сила тяжести  $m\vec{g}$  и сила натяжения  $\vec{F}_H$  нити (рис. 4.25). Найдем силу натяжения нити при движении тела массой  $m$  со скоростью  $\vec{v}$ .

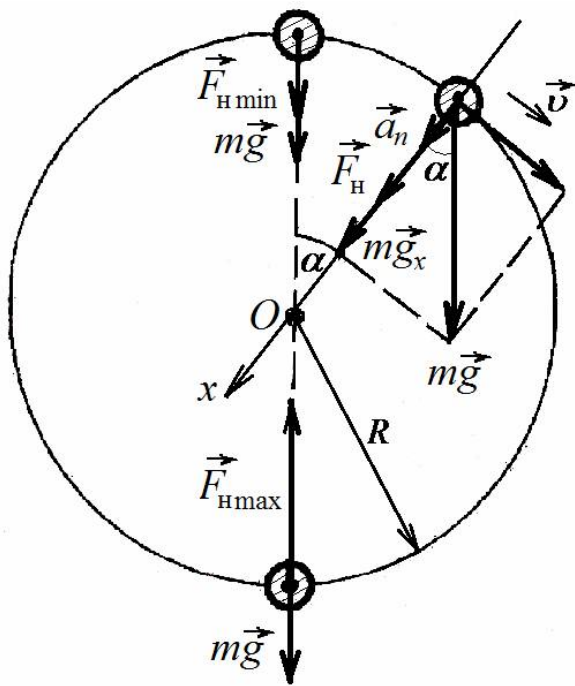


Рис. 4.25

Разложим силу тяжести на касательную и нормальную составляющие:  $m\vec{g} = m\vec{g}_x + m\vec{g}_y$ .

➤ Уравнение движения тела:

$$\vec{F}_H + m\vec{g} = m\vec{a}_n, \quad (4.47)$$

где  $a_n = v^2/R$ ;

➤ В проекциях на ось  $Ox$ :

$$F_H + mg_x = ma_n, \quad (4.48)$$

где  $mg_x = mg \cos \alpha$ .

➤ Подставив составляющие в (4.48):

$$F_H = m v^2 / R - mg \cos \alpha. \quad (4.49)$$

➤ Когда тело вверху сила натяжения нити  $\vec{F}_H$  минимальна (при  $\alpha = 0$ ):

$$F_H = F_{H \min} = m v^2 / R - mg.$$

➤ Когда тело внизу (при  $\alpha = \pi$ ) сила натяжения нити  $\vec{F}_H$  максимальна:

$$F_H = F_{H \max} = m v^2 / R + mg.$$

**Движение тела на нити в горизонтальной плоскости.** На тело действуют сила тяжести  $m\vec{g}$  и сила натяжения  $\vec{F}_H$  нити (рис. 4.26). При равномерном движении тела по окружности результирующая сила сообщает ему нормальное ускорение, так как

$$|\vec{v}| = \text{const}, \quad \vec{a}_\tau = 0 \Rightarrow \vec{a} = \vec{a}_n.$$

➤ Поэтому уравнение движения тела:

$$m\vec{g} + \vec{F}_H = m\vec{a}_n, \quad (4.50)$$

где  $m\vec{g} + \vec{F}_H = \vec{F}_n$ .

- Определим, на какой угол  $\alpha$  отклонится нить длиной  $l$  при движении тела с угловой скоростью  $\omega$ .

Из рисунка видно, что

$$\text{tg } \alpha = F_n / (mg), \quad (4.51)$$

$$F_n = m a_n = m \omega^2 R, \quad R = l \sin \alpha, \quad F_n = m \omega^2 l \sin \alpha,$$

поэтому  $\text{tg } \alpha = m \omega^2 l \sin \alpha / (mg)$ ;  $\sin \alpha / \cos \alpha = \omega^2 l \sin \alpha / g$ ,

откуда 
$$\cos \alpha = g / (\omega^2 l). \quad (4.52)$$

## ***Новые слова, словосочетания и языковые конструкции***

вертикальная плоскость  
вогнутый мост  
выпуклый мост  
горизонтальная плоскость  
дуга окружности

наклонная плоскость  
нить  
поступательно  
поступательное  
система сил

### **1. Что рассматривают как.**

**Тело рассматривают как совокупность материальных точек.**

### **2. Что позволяет что.**

**Законы движения позволяют решить основную задачу механики.**

### **3. Что можно разделить на что.**

**Любую кривую линию можно разделить на такие части, каждая из которых является дугой окружности. Радиусом кривизны в данной точке кривой линии является радиус дуги окружности, на которой лежит эта точка.**

### **4. Что представляет что.**

**Выпуклый мост представляет собой дугу окружности с радиусом  $R$ .**

### **5. Что находится где.**

**Центр окружности (0) находится под мостом.**

## ***Контрольные вопросы***

1. Назовите силы, которые действуют на тело, движущееся по горизонтальной поверхности под действием силы тяги.
2. Запишите основное уравнение динамики тела, движущегося по горизонтальной поверхности под действием горизонтальной силы тяги.
3. Как направляются оси координат при изучении движения тела по наклонной плоскости?
4. Запишите формулу для ускорения тела, свободно скользящего по наклонной плоскости при наличии силы трения.
5. Тело движется по окружности. Как направлена сила, дающая телу центростремительное ускорение?
6. Что происходит с весом тела при движении по выпуклой и вогнутой поверхности?
7. Тело на нити равномерно вращается в вертикальной плоскости. Где больше сила натяжения нити, в верхней или нижней точке траектории?



## 4.4 Динамика твердого тела

Будем рассматривать такие тела, в которых могут возникать очень небольшие деформации, но тела настолько жесткие, что совсем незначительные деформации не вызывают появления заметных сил упругости. Такие тела называются **абсолютно твердыми** или **абсолютно упругими**. Другими словами, в абсолютно твердом теле расстояние между двумя точками или точнее между двумя частицами этого тела остается неизменным при всех условиях.

Любое тело можно представить как совокупность материальных точек. Поэтому основой для построения механики твердого тела является механика материальной точки.

### 4.4.1 Общие понятия

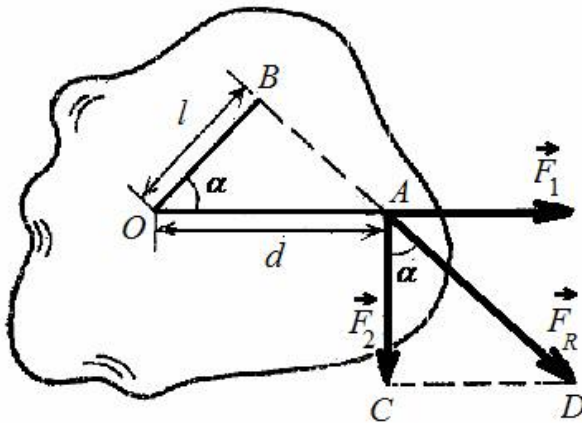


Рис. 4.27

#### Вращающее действие силы $F_R$

(рис. 4.27):

- это угловое ускорение

$$\varepsilon = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{\omega}}{\Delta t}, \text{ которое сообщает}$$

телу эта сила;

- зависит от силы ( $\vec{F}_R$ ) и от расстояния ( $l$ ) между центром вращения ( $O$ ) и линией действия силы.

**Момент силы ( $\vec{M}$ )** – это векторная физическая величина,

равная произведению действующей силы ( $\vec{F}_R$ ) на кратчайшее расстояние ( $l$ ) от линии действия силы до оси:

$$\vec{M} = \vec{F}_R l, [M] = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (4.53)$$

где  $l$  – плечо силы (линия, проведенная перпендикулярно от оси вращения к линии действия силы).

Под действием сил тело может вращаться в различных направлениях. Условимся считать моменты сил, вращающие тело против часовой стрелки, положительными, а по часовой стрелке – отрицательными.

**Центр тяжести.** Всякое тело можно представить состоящим из множества частиц ( $i = \overline{1, n}$ ), на каждую из которых действует сила тяжести ( $m_i \vec{g}$ ). Сила тяжести всего тела является равнодействующей всех этих сил  $\vec{F}_p$ . Эта сила вызывает у тела такое же ускорение, как и все элементарные

силы тяжести. Она направлена вниз и равна (рис. 4.28):

$$\vec{F}_R = \sum_{i=1}^n m_i \vec{g} = \vec{g} \sum_{i=1}^n m_i. \quad (4.54)$$

где  $\sum_{i=1}^n m_i$  – масса всего тела.

Если размеры всего тела невелики по сравнению с радиусом Земли, то элементы силы тяжести можно считать параллельными. Точка (C) приложения равнодействующей всех элементарных сил тяжести называется **центром тяжести этого тела** (центром масс).

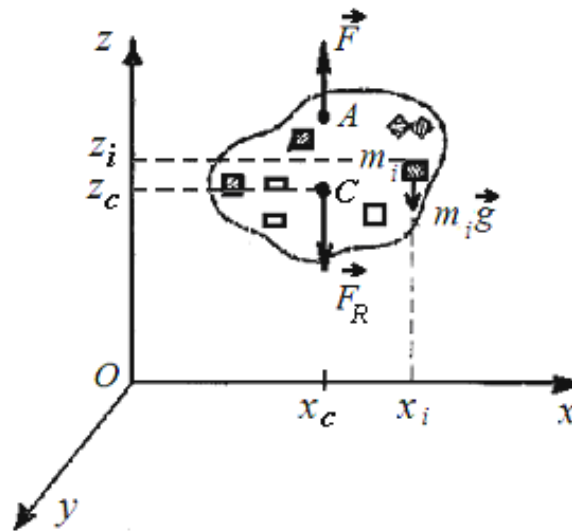


Рис. 4.28 Определение координат центра тяжести тела

Предположим, что равнодействующая всех элементарных сил тяжести приложена к некоторой точке с координатами  $x, y, z$ , которые нам пока неизвестны. Чтобы тело находилось в состоянии равновесия, к нему нужно приложить внешнюю силу  $\vec{F}$ , находящуюся с силой  $\vec{F}_R$  на одной линии. Это можно сделать, например, подвесив тело в некоторой точке  $A$ . Из условия равновесия следует  $\vec{F} + \vec{F}_R = 0$  или  $\vec{F} = -\vec{F}_R$ . Если тело покоится, то сумма моментов этих сил относительно любой неподвижной оси должна быть равна нулю:

$$\vec{M}_R + \vec{M}_F = 0. \quad (4.55)$$

Это равенство выполняется и для всех элементарных сил тяжести:

$$\vec{M}_F + \sum_{i=1}^n \vec{M}_i = 0. \quad (4.56)$$

Таким образом, момент равнодействующей относительно какой-либо оси равен сумме моментов всех элементарных сил относительно этой же оси:

$$\vec{M}_R = \sum_{i=1}^n \vec{M}_i. \quad (4.57)$$

Выберем за ось вращения ось  $Ox$ , тогда

$$\vec{M}_R = \sum_{i=1}^n \vec{M}_i = \sum_{i=1}^n m_i \vec{g} x_i = \vec{g} \sum_{i=1}^n m_i x_i,$$

или 
$$F_p x_{ц.т} = g M x_{ц.т} = g \sum_{i=1}^n m_i x_i. \quad (4.58)$$

Из уравнения (4.58) определим координаты центра тяжести  $x_c$ :

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i}. \quad (4.59)$$

В общем случае центром масс тела называют точку  $C$ , которая имеет координаты:

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i}; \quad y_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i}; \quad z_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i}. \quad (4.60)$$

### **Внимание !!!**

- 1) Точка приложения силы тяжести (центр тяжести) всегда совпадает с центром масс тела.
- 2) Если линия действия силы проходит через центр масс, то  $l = 0$  и  $M = 0$ .

*Движение твердого тела* в общем случае определяется двумя векторными уравнениями:

- уравнением центра масс (центра тяжести)

$$\boxed{\frac{m \Delta \vec{v}_c}{\Delta t} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i \text{ или } m \vec{a}_c = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i}; \quad (4.61)$$

- уравнением моментов:

$$\boxed{\vec{M} = \sum_{i=1}^n \vec{M}_i}. \quad (4.62)$$

#### 4.4.2 Элементы статики. Условия и виды равновесия твердого тела

**Статика** – раздел механики, изучающий условия равновесия твердых протяженных тел, т.е. условия, при которых, тело покоится или движется равномерно под воздействием внешних сил ( $\vec{a}_c = \vec{0}$ ;  $\vec{\varepsilon} = \vec{0}$ ).

**Общее условие равновесия тела:** сумма всех действующих внешних сил равна нулю и сумма моментов всех внешних сил относительно любой оси также равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0, \quad \sum_{i=1}^n \vec{M}_i = 0. \quad (4.63)$$

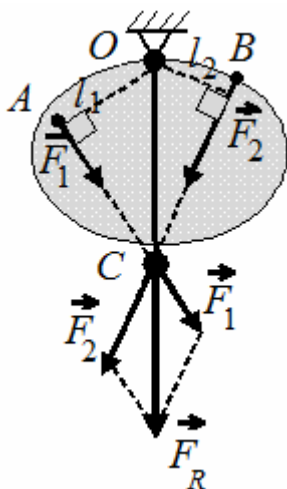


Рис. 4.29

Эти условия являются необходимыми и достаточными для равновесия твердого тела.

**Условие равновесия тела с закрепленной осью вращения** (рис. 4.29). Линия действия равнодействующей силы  $\vec{F}_p$  всех приложенных к телу сил должна проходить через центр т.  $O$  (ось вращения).

Сила, линий действия которой проходит через ось, не вызывает вращения. В этом случае плечо  $l$  равно нулю и, следовательно, момент этой силы также равен нулю.

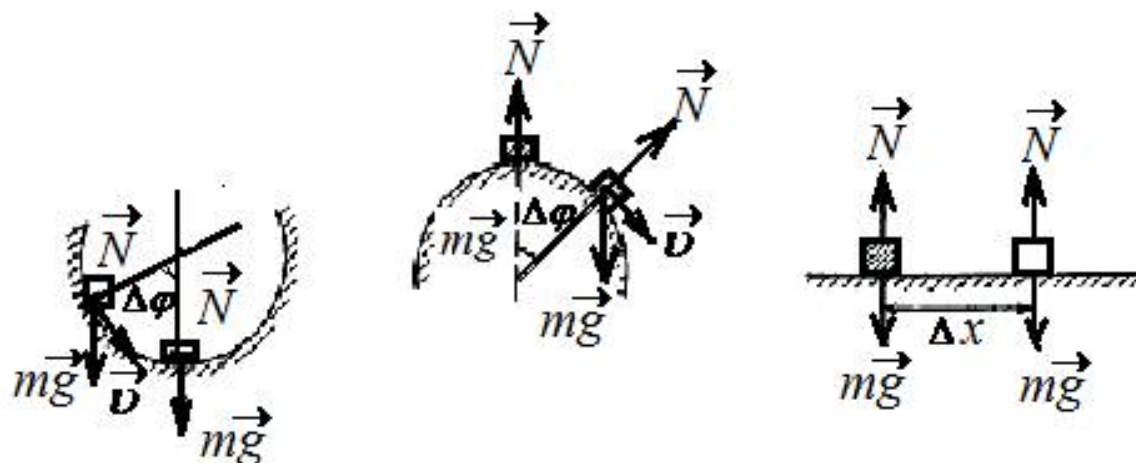
Пользуясь понятием момента сил, можно сформулировать условие равновесия тела, закрепленного на оси.

Тело, закрепленное на оси, **находится в равновесии** (покоится или вращается равномерно), если сумма моментов всех действующих на тело сил с учетом их знака равна нулю:

$$\vec{M}_1 + \vec{M}_2 + \vec{M}_3 + \dots + \vec{M}_n = \sum_{i=1}^n \vec{M}_i = 0. \quad (4.64)$$

**Виды равновесия.** Различают три вида равновесия (рис. 4.30):

- устойчивое – если при незначительном отклонении тела от положения равновесия возникают силы, которые стремятся вернуть тело в первоначальное положение равновесия;
- неустойчивое – наблюдается, когда возникают силы при незначительном отклонении от положения равновесия, которые стремятся удалить его еще дальше от этого положения;
- безразличное – это такое положение, при котором не возникает никаких сил, стремящихся приблизить или удалить тело от положения равновесия.



а – устойчивое;      б – неустойчивое;      в – безразличное.

Рис. 4.30 Виды равновесия

При выведении тела из безразличного равновесия положение его центра масс не изменяется относительно Земли, поэтому не изменяется и потенциальная энергия. При выведении тела из устойчивого равновесия центр масс тела опускается и потенциальная энергия тела уменьшается. При выведении тела из неустойчивого равновесия центр масс тела поднимается и потенциальная энергия увеличивается. Тело (система) находится в положении устойчивого равновесия, если его потенциальная энергия минимальна.

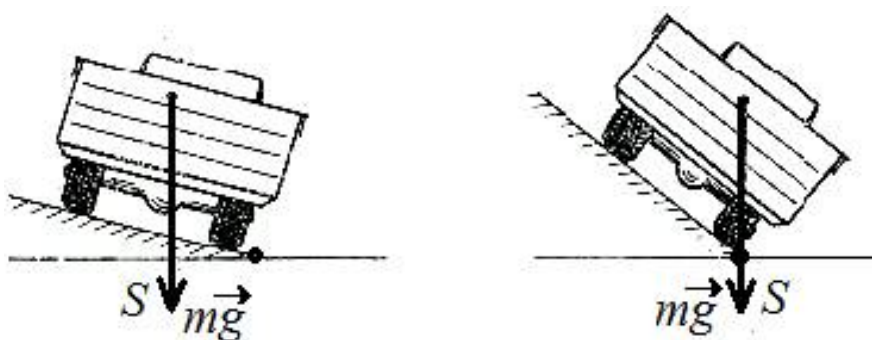


Рис. 4.31

Для устойчивого равновесия (рис. 4.31) необходимо, чтобы линия действия силы тяжести проходила через площадь опоры тела.

### *Новые слова и языковые конструкции*

абсолютно твердое тело	равновесие безразличное
достаточно	равновесие неустойчивое
жесткое	равновесие устойчивое
закрепить	силы тяжести
закрепление	статика
момент	стрелка
необходимо	условие
низкое положение	часовая
плечо	частица
против	центр тяжести
потенциальная энергия	элементарные силы

1. **Пользуясь чем, можно сформулировать что.**  
**Пользуясь понятием момента сил, можно сформулировать условие равновесия тела, закрепленного на оси.**
2. **Что приложено к чему.**  
**Равнодействующая всех элементарных сил тяжести приложена к некоторой точке с координатами  $x, y, z$ .**

### *Контрольные вопросы*

1. Что такое статика? Что изучает статика?
2. Когда тело находится в состоянии равновесие?
3. Запишите и сформулируйте условие равновесия для сил.
4. Что такое плечо силы?
5. Что такое момент силы? Формула, определение.
6. Какие существуют два направления вращения? Как выбираются знаки моментов?
7. Запишите и сформулируйте условие равновесия для моментов?
8. Запишите полное условие равновесия тела.

## 5 ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

### 5.1 Закон сохранения импульса

*Импульсом тела ( $\vec{p}$ ) называют произведение массы тела  $m$  на его скорость  $\vec{v}$ :*

$$\vec{p} = m\vec{v}, \quad [p] = 1 \text{ кг} \frac{\text{М}}{\text{с}}, \quad (5.1)$$

Направление вектора импульса совпадает с направлением вектора скорости  $\vec{p} \uparrow\uparrow \vec{v}$ .

**Релятивистский импульс:**

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (5.2)$$

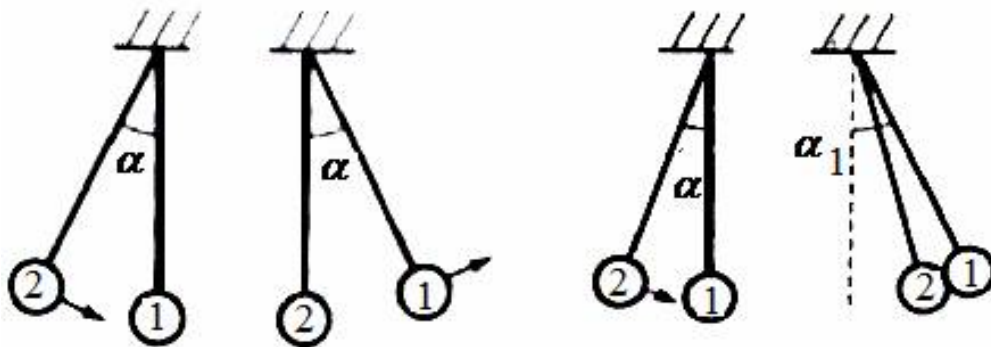
где  $c$  – скорость света в вакууме.

*Импульсом силы называют произведение силы  $\vec{F}$  на время ее действия  $\Delta t$ :*

$$\vec{F}\Delta t. \quad (5.3)$$

**Второй закон Ньютона в импульсной форме:** импульс силы, действующей на тело, равен изменению импульса тела:

$$\vec{F}\Delta t = m\vec{v} - m\vec{v}_0. \quad (5.4)$$



а – абсолютно упругий;

б – абсолютно неупругий.

Рис. 5.1 Удар тел

*Два, три тела или несколько тел называются **системой тел**.*

*Силы взаимодействия между телами системы называют **внутренними силами**.*

**Внешними** называют такие силы, которые действуют на тела данной системы со стороны других тел.

**Импульсом системы** называется векторная сумма импульсов всех тел данной системы:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 + \dots + \vec{p}_n = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i. \quad (5.5)$$

Система тел называется **изолированной** (или замкнутой), если внешние силы можно не учитывать или их сумма равна нулю.

**Удар** (соударение) – это столкновение двух или более тел, при котором взаимодействие длится очень короткое время.

**Центральный удар** – удар, при котором тела до удара движутся вдоль прямой, проходящей через их центры масс.

При соударении **абсолютно упругих** тел сохраняется их суммарная кинетическая энергия и суммарный импульс (рис. 5.1, а).

**Абсолютно неупругий удар** – столкновение двух тел, в результате которого тела объединяются, двигаясь дальше как единое целое в сторону тела с большим импульсом (рис. 5.1, б).

Рассмотрим упругое взаимодействие изолированной системы двух тел (шаров), следовательно, внешние силы:

$$\begin{aligned} m\vec{g} + \vec{N} &= 0 \text{ – уравновешенны;} \\ F_{\text{тр}} &\approx 0 \text{ – не учитываем.} \end{aligned} \quad (5.6)$$

При взаимодействии тел замкнутой системы импульс этой системы не меняется:

$$\begin{aligned} \vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 &\Rightarrow \sum_{i=1}^n \vec{p}_i = \text{const} \Rightarrow \\ &\Rightarrow m_1\vec{v}_{01} + m_2\vec{v}_{02} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2. \end{aligned} \quad (5.7)$$

**Закон сохранения импульса:** геометрическая сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, является величиной постоянной:

$$\boxed{m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + \dots + m_n\vec{v}_n = \text{const}}. \quad (5.8)$$

При упругом соударении (рис. 5.2) закон сохранения импульса:

$$\boxed{m_1\vec{v}_{01} + m_2\vec{v}_{02} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2}. \quad (5.9)$$





Рис. 5.2 Упругое соударение

При **неупругом соударении** (рис. 5.3) закон сохранения импульса имеет вид:

$$m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} = (m_1 + m_2) \vec{v} \quad (5.10)$$



Рис. 5.3 Неупругое соударение

Закон сохранения импульса лежит в основе реактивного движения.

**Реактивным движением** называется движение, возникающее в результате взаимного отталкивания вытекающей струи жидкости или газа и корпуса ракеты.

Уравнение движения тела с переменной массой:

$$m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{F} - \vec{u} \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (5.11)$$

где  $\vec{u}$  – скорость истечения газов относительно ракеты.

Если  $\vec{u}$  противоположно по направлению  $\vec{v}$ , то ракета ускоряется, а если совпадает с  $\vec{v}$ , то тормозится.

**Реактивная сила тяги:**

$$\vec{F}_p = -\vec{u} \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (5.12)$$

**Формула Циолковского:**

$$v = u \ln \frac{m_0}{m} \quad (5.13)$$

где  $m_0$  – стартовая масса ракеты;  $m$  – конечная масса.

Формула справедлива в классической механике ( $v \ll c$ ,  $u \ll c$ ).

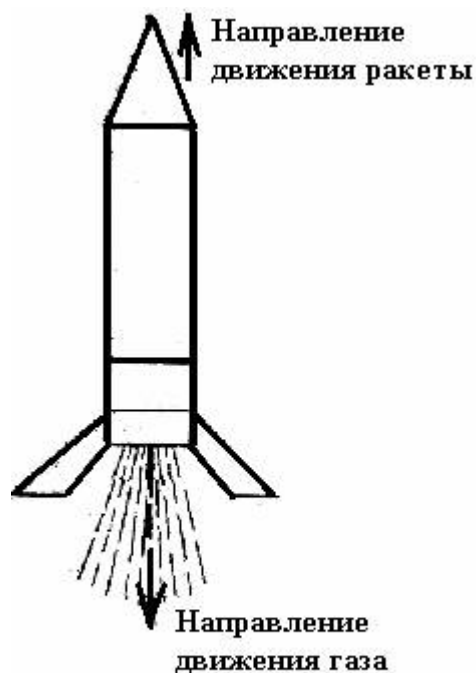


Рис. 5.4

Примером реактивного движения является, например, движение ракеты (рис. 5.4). В ракете сгорает топливо, при этом выделяется большое количество газа, который выходит из ракеты с большой скоростью. По закону сохранения импульса ракета движется в направлении, противоположном движению газа. Современные космические ракеты состоят из нескольких частей (ступеней). Когда в одной из ступеней ракеты топливо сгорает, эта ступень отделяется от ракеты. Ракеты с несколькими ступенями называют многоступенчатыми.

### ***Интересные факты!***

Идею многоступенчатой ракеты предложил русский ученый К.Э. Циолковский (1857-1935). Идея К.Э. Циолковского впервые осуществлена в Советском Союзе под руководством замечательного советского конструктора С.П. Королева (1906-1966).

4 октября 1957 г. советская космическая ракета вывела на орбиту первый в мире искусственный спутник Земли. 12 апреля 1961 г. в космосе впервые побывал человек – летчик-космонавт СССР Юрий Алексеевич Гагарин (1934-1968), который на космическом корабле «Восток» облетел земной шар. 19 марта 1965 г. летчик-космонавт СССР А.А. Леонов осуществил первый в мире выход человека в космическое пространство.

## ***Новые слова, словосочетания, языковые конструкции***

абсолютно	определять
внутренние силы	ракета
внешние силы	реактивное движение
замкнутый	реактивная сила тяги
изолированный	релятивистская механика
импульс	сгорать
импульс силы	сила тяги
импульс системы	сохранение
импульс тела	соударение
конструктор	струя
корпус	ступень
космос	топливо
космический корабль	удар неупругий
космическая ракета	удар упругий
летчик – космонавт	удар центральный
многоступенчатая ракета	часть

### **1. Что совпадает с чем.**

**Направление импульса тела совпадает с направлением импульса скорости.**

### **2. Что равно чему.**

**Импульс силы, действующий на тело, равен изменению импульса тела.**

### **3. Что лежит в основе чего.**

**Закон сохранения импульса лежит в основе реактивного движения.**

### **4. За что принимается что.**

**За единицу импульса принимают импульс тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с.**

## ***Контрольные вопросы***

1. Что такое импульс тела? Какая единица измерения импульса? Импульс это скаляр или вектор? Как направлен импульс?
2. Сформулируйте II закон Ньютона с помощью понятия импульса тела.
3. Что такое импульс силы? Как направлен вектор импульса силы?
4. Для какой системы тел выполняется закон сохранения импульса?
5. Что такое замкнутая система тел?
6. Сформулируйте закон сохранения импульса.
7. Что такое неупругий удар?
8. В каком направлении движутся тела после неупругого удара?
9. Что называют искусственным спутником Земли?
10. Что происходит при увеличении скорости спутника Земли?
11. Что такое вторая космическая скорость?

## 5.2 Энергия. Виды энергии. Закон сохранения энергии

*Энергия (E) – это единая мера различных форм движения материи.*

*Энергия – одно из неотъемлемых свойств материи.* На практике механическое движение частично или полностью превращается в другие формы движения – тепловое, электромагнитное.

*Энергия характеризует движение системы, а также взаимодействие тел или частиц в системе с учетом возможности перехода из одной формы движения в другую.*

*Энергия – функция состояния системы, а работа (A) – функция процесса перехода из одного состояния системы в другое.*

**Закон сохранения энергии:** *энергия не возникает и не исчезает, она только превращается из одного вида в другой и передается от одного тела к другому в равных количествах.*

**Виды энергии:**

1. Механическая энергия тела (потенциальная и кинетическая).
2. Внутренняя.
3. Электромагнитная (электрическая + магнитная).
4. Химическая.
5. Световая.
6. Ядерная или атомная.

**Полная энергия тела:**

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad [E] = 1 \text{ Дж.} \quad (5.14)$$

**Энергия покоя тела** (внутренняя энергия):

$$E_0 = m_0 c^2. \quad (5.15)$$

*Энергия – это скалярная величина, количественная мера всех форм движения материи.*

**Работа (A) характеризует изменение энергии.**

Если над системой совершают работу внешние силы, то энергия системы увеличивается:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = A_{\text{внеш}} > 0. \quad (5.16)$$

Если система совершает работу, то её энергия уменьшается:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = A_{\text{внутр}} < 0. \quad (5.17)$$

Существует два способа передачи движения (и соответствующей энергии) от одного тела к другому в форме работы (называют механической работой) и форме теплоты (теплообмена).

### 5.2.1 Механическая энергия. Механическая работа

*Механической энергией (E) тела (системы) называется скалярная физическая величина, которая характеризует механическое состояние тела (системы), изменение которой является механической работой:*

$$\boxed{\Delta E_{12} = E_2 - E_1 = A_{12}} \quad (5.18)$$

Механическое состояние данного тела определяется его скоростью и координатами в данной системе отсчета (рис. 5.5).

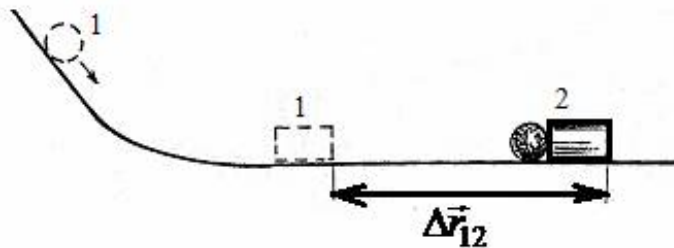


Рис. 5.5

*Работа (A) – физическая величина, равная скалярному произведению силы ( $\vec{F}$ ) на перемещение  $\Delta \vec{r}_{12}$  ее точки приложения (рис. 5.6):*

$$\boxed{A_{12} = F \cdot \Delta r_{12} \cdot \cos \alpha} \quad (5.19)$$

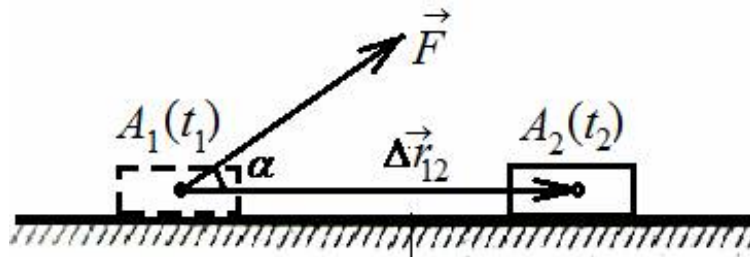
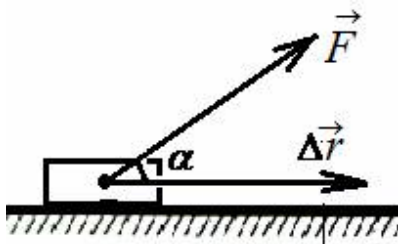


Рис. 5.6

➤ Движущие силы (моторные) совершают положительную работу (рис. 5.7):



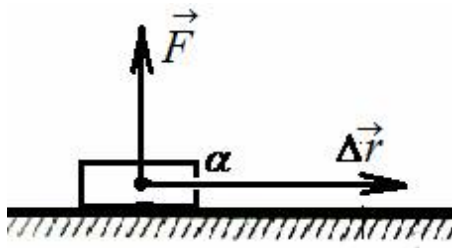
$$0^\circ < \alpha < \pm 90^\circ$$

$$\cos \alpha > 0 \rightarrow$$

$$\boxed{A > 0} \quad (5.20)$$

Рис. 5.7

- Нормальные силы не совершают работу (рис. 5.8):

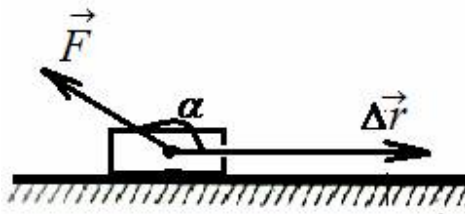


$$\alpha = \pm 90^\circ,$$

$$\cos \alpha = 0 \rightarrow \boxed{A = 0} \quad (5.21)$$

Рис. 5.8

- Силы сопротивления (трения) совершают отрицательную работу (рис. 5.9)



$$+ 90^\circ < \alpha < 270^\circ$$

$$\cos \alpha < 0 \rightarrow \boxed{A < 0} \quad (5.22)$$

Рис. 5.9

## 5.2.2 Виды механической энергии и их связь с работой

*Два вида механической энергии:*

- 1) *кинетическая энергия* ( $E_k$ ) – это энергия движущегося тела;
- 2) *потенциальная энергия* ( $E_{\text{п}}$ ) – энергия взаимодействия (энергия, обусловленная взаимодействием тел или частиц тела);

Сумма  $E_k$  и  $E_{\text{п}}$  составляет *полную механическую энергию* ( $E$ ) тела:

$$\boxed{E = E_k + E_{\text{п}}}. \quad (5.23)$$

- *Кинетическая энергия.*

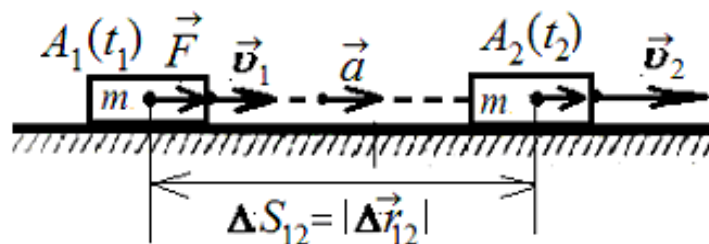


Рис. 5.13 Изменение состояния тела

Если  $\vec{F} = const$ ,  $\vec{a} = const$  и  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\cos\varphi = 1$ ,  $\vec{F}_{тр} = 0$ :

$$A_{12} = F \cdot \Delta r_{12} = F \cdot \Delta r_{12}, \quad (5.24)$$

где  $F = ma$  - сила тяги;  $\Delta r_{12} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a}$  – перемещение.

Подставив составляющие в (5.24) получим:

$$A_{12} = ma \cdot \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \quad (5.25)$$

где  $\frac{mv^2}{2} = E_k$  – кинетическая энергия в классической механике ( $E_k$  – скаляр, всегда  $E_k \geq 0$ ).

**Работа силы** равна изменению кинетической энергии тела:

$$A_{12} = E_{k2} - E_{k1} = \Delta E_{k1,2}, \quad (5.26)$$

$$[E_k] = [A] = \text{Н} \cdot \text{м} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м} \equiv 1 \text{ Дж (джоуль)}.$$

**Джоуль** – работа постоянной силы в 1 Н при перемещении тела на расстояние 1 м по направлению действия силы.

Так как скорость тела является величиной относительной, т.е. зависит от выбора системы отсчета, то и кинетическая энергия относительна.

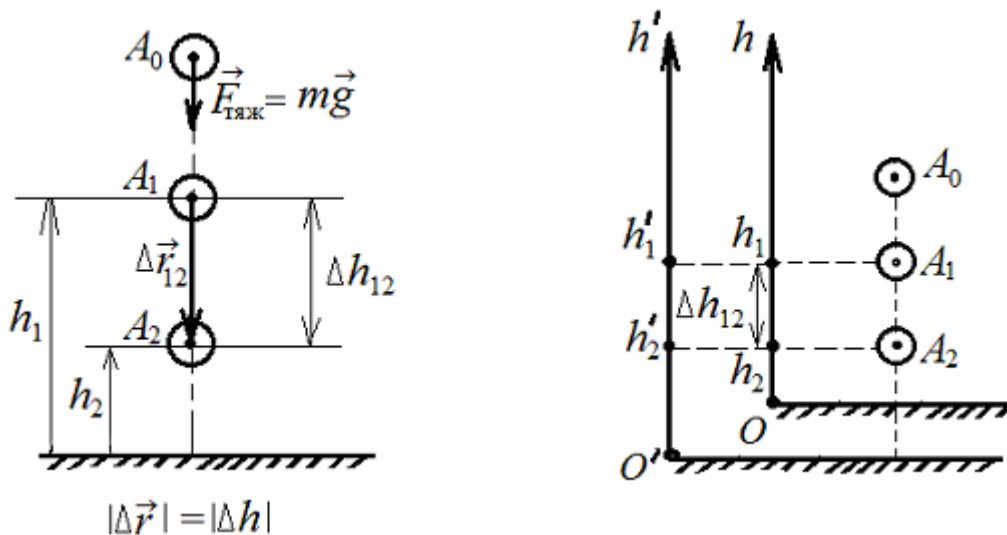
**Кинетическая энергия в релятивистской механике:**

$$E_k = (m - m_0)c^2. \quad (5.27)$$

- **Потенциальная энергия.** В механике различают:
  - а) потенциальную энергию тела, поднятого над Землей;
  - б) потенциальную энергию упругодеформированного тела;
  - в) потенциальную энергию гравитационного взаимодействия двух материальных точек.

➤ **Потенциальная энергия тела, поднятого над Землей** (рис. 5.14,а).

Здесь  $h$  – высота над уровнем, на котором потенциальная энергия системы «Земля – тело» принимается за нуль (нулевой уровень потенциальной энергии):



а) тело, поднятое над Землей

б) нулевые уровни потенциальной энергии

Рис. 5.14

Работа силы тяжести при падении из точки 1 в точку 2:

$$A_{12} = F_{\text{тяж}} \cdot \Delta r_{12} \cdot \cos 0^\circ = mg \cdot |\Delta h_{12}| = mg \cdot |h_2 - h_1| = |mgh_2 - mgh_1| < 0 \quad (5.28)$$

или (без знака модуля):

$$A_{12} = -(mgh_2 - mgh_1) = mgh_1 - mgh_2, \quad (5.29)$$

где  $mgh = E_{\text{п}}$  – потенциальная энергия тела (скалярная величина,  $[E_{\text{п}}] = [A] = 1 \text{ Дж}$ ).

**Работа силы тяжести** равна убыли потенциальной энергии тела:

$$A_{12} = -(E_{\text{п}2} - E_{\text{п}1}) = -\Delta E_{\text{п}12}, \quad (5.30)$$

где  $h$  и  $E_{\text{п}}$  – зависят от выбора «нулевого уровня» ( $h = 0$ ) (рис. 5.14, б).  
 $\Delta h$  и  $\Delta E_{\text{п}}$  – не зависят от выбора  $h = 0$ .

➤ **Потенциальная энергия упругодеформированного тела.**

Рассчитаем работу силы упругости пружины. Предположим, что на нерастянутую пружину длиной  $l_0$  действует внешняя сила  $\vec{F}$  (рис. 5.15, а).

После того как удлинение  $\Delta l_0$  пружины становится равным  $x_0$  (координата ее правого конца), внешняя сила прекращает свое действие



(рис. 5.15, б). В результате действия силы упругости  $F_{упр} = kx_0$ , направленной к положению равновесия, пружина сжимается.

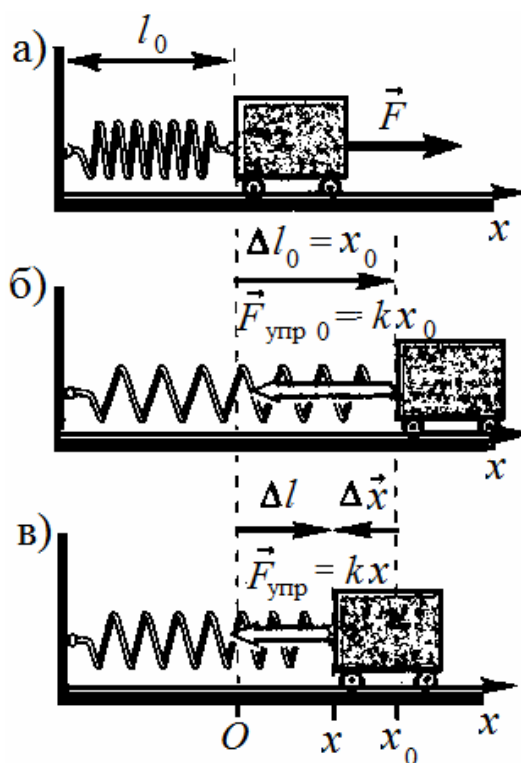
Найдем работу силы упругости при изменении координаты правого конца пружины от  $x_0$  до  $x$ . Модуль перемещения правого конца пружины  $\Delta x = x_0 - x$  (рис. 5.15 в). Так как сила упругости при изменении удлинения пружины от  $\Delta l_0 = x_0$  до  $\Delta l = x$  изменяется от  $F_{упр} = kx_0$  до  $F_{упр} = kx$ , то следует использовать ее среднее значение, равное полусумме начального и конечного значений:

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

Рассмотрим деформацию пружины с жесткостью  $k$ .

По закону Гука проекция вектора силы упругости на ось  $Ox$ , направленную вдоль вектора перемещения конца пружины при деформации, равна:

$$F_{упр} = -kx. \quad (5.31)$$



а) нерастянутая пружина длиной  $l_0$  ( $\Delta l = 0$ ).  $F_{упр} = 0$ ;

б) растянутая пружина длиной  $l_0 + \Delta l_0$  ( $\Delta l_0 = x_0$ ).  $F_{упр.0} = kx_0$ ;

в) сжимающаяся пружина длиной  $l_0 + \Delta l$  ( $\Delta l = x$ ).  $F_{упр} = kx$ .

Рис. 5.15 Работа силы упругости при растяжении и сжатии пружины:

Так как направления средней силы упругости  $F_{упр.ср}$  и перемещения  $\Delta\vec{x}$  совпадают, то для вычисления работы надо умножить среднюю силу на перемещение:

$$A_{упр} = \frac{k}{2}(x_0 + x)(x_0 - x) = \frac{kx_0^2}{2} - \frac{kx^2}{2}. \quad (5.32)$$

Как видно из выражения (5.32), работа силы упругости зависит только от начального и конечного удлинений пружины. Это означает, что сила упругости – потенциальная сила.

Работа потенциальной силы равна разности потенциальной энергии в начальном и конечном положениях тела.

Следовательно, потенциальная энергия пружины в начальном положении (см. формулу 5.32):

$$E_{п0} = \frac{kx_0^2}{2}$$

Потенциальная энергия упругодеформированной пружины (или тела):

$$E_{п} = \frac{kx^2}{2} \quad (5.33)$$

где  $x$  - удлинение (или сжатие) пружины;  $k$  - жесткость пружины.

Начало отсчета потенциальной энергии ( $E_{п} = 0$ ) соответствует нерастянутой пружине, удлинение  $x$  которой равно нулю.

Потенциальная энергия упруго деформированной пружины имеет наибольшее значение, когда пружина максимально сжата или растянута.

Потенциальная энергия упруго деформированной пружины равна работе силы упругости при переходе пружины из деформированного состояния в недеформированное.

➤ **Потенциальную энергию гравитационного взаимодействия двух материальных точек массой  $m_1$  и  $m_2$ , находящихся на расстоянии  $r$  друг от друга можно определить:**

$$E_{п} = F_{гр} \cdot r = \frac{Gm_1m_2r}{r^2} = G \frac{m_1m_2}{r} \Rightarrow$$

$$E_{п} = G \frac{m_1m_2}{r}. \quad (5.34)$$

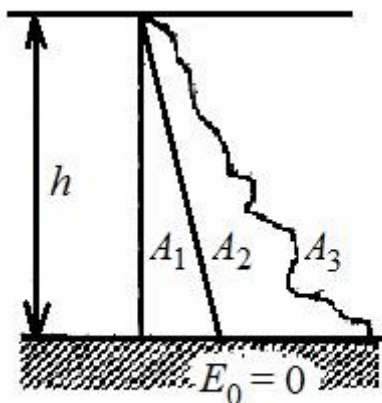


Рис. 5.16

Потенциальная энергия положительна, если она обусловлена силами отталкивания, и отрицательна, если обусловлена силами притяжения.

**Консервативная сила** – сила, работа которой при перемещении тела зависит только от начального и конечного положения тела в пространстве (силы тяжести, упругости, кулоновские силы).

Например, работа силы тяжести (рис. 5.16).

$$A_1 = A_2 = A_3. \quad (5.35)$$

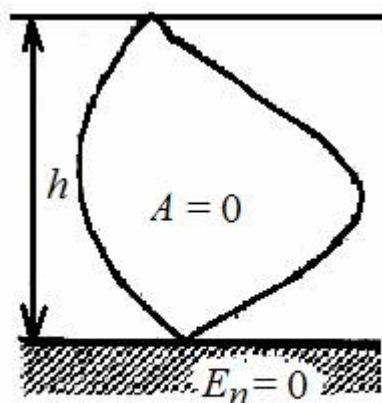


Рис. 5.17

Работа консервативных сил по любому замкнутому контуру равна нулю (рис. 5.17).

**Потенциальное поле** – поле консервативных сил.

**Кинетическая и потенциальная энергия** – функции состояния системы, т.е. могут быть точно определены, если заданы координаты и скорости всех тел системы, а также система отсчета.

### 5.2.3 Закон сохранения механической энергии

В замкнутой системе двух тел (Земля и тело, которое свободно падает) изменяются **обе** энергии:  $\Delta E_k$  и  $\Delta E_{п}$ .

При движении совершается работа:

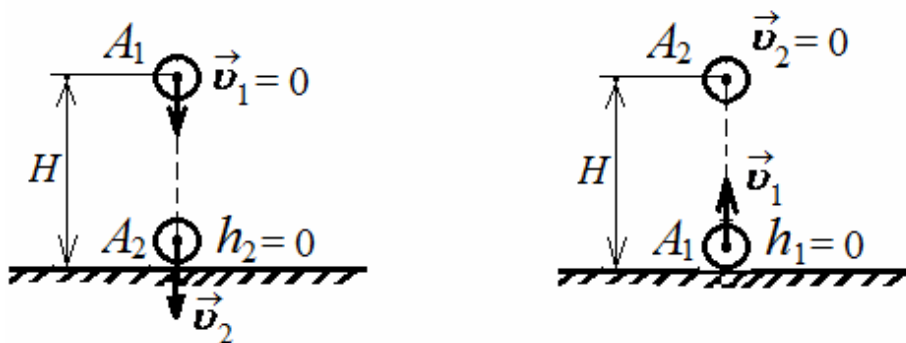
$$\left. \begin{aligned} A_{12} &= \Delta E_{к12} = E_{к2} - E_{к1} \\ \text{или} \\ A_{12} &= -\Delta E_{п12} = -(E_{п2} - E_{п1}) \end{aligned} \right\} \Rightarrow E_{к2} - E_{к1} = E_{п1} - E_{п2} \quad (5.36)$$

$$\begin{aligned} &\Downarrow \\ E_{к2} + E_{п2} &= E_{к1} + E_{п1} \\ &\Downarrow \end{aligned}$$

$$\boxed{E_2 = E_1} \quad (5.37)$$

$E = \text{const}$ $\Delta E = 0$ $E_{\text{к}} \leftrightarrow E_{\text{п}}$
---

**Закон сохранения механической энергии:** полная механическая энергия замкнутой системы тел, в которой действуют только консервативные силы (потенциальные) является величиной постоянной.



а) свободное падение;

б) тело брошено вертикально вверх.

Рис. 5.18

- Рассмотрим свободное падение (рис. 5.18, а):

$$\boxed{v_1 = 0, v_2 = \sqrt{2gH}, h_1 = H, h_2 = 0}.$$

В точке  $A_1$ :

$$E_{\text{к1}} = 0, E_{\text{п1}} = mgH \Rightarrow E_1 = E_{\text{к1}} + E_{\text{п1}} = mgH. \quad (5.38)$$

В точке  $A_2$ :

$$E_{\text{к2}} = \frac{mv_2^2}{2}, E_{\text{п2}} = 0 \Rightarrow E_2 = E_{\text{к2}} + E_{\text{п2}} = \frac{mv_2^2}{2} = \frac{m(2gH)}{2} = mgH. \quad (5.39)$$

Согласно закону сохранения энергии в замкнутой системе:

$$\boxed{E_1 = E_2} \Rightarrow \boxed{mgH = \frac{mv_2^2}{2}}.$$

- Тело брошено вертикально вверх (рис. 5.18, б):

$$\boxed{h_1 = 0, v_2 = 0, h_2 = H = \frac{v_1^2}{2g}}.$$

В точке  $A_1$ :

$$E_{\text{к1}} = \frac{mv_1^2}{2}, E_{\text{п1}} = 0 \Rightarrow E_1 = E_{\text{к1}} + E_{\text{п1}} = \frac{mv_1^2}{2}. \quad (5.40)$$

В точке  $A_2$ :

$$E_{\text{к2}} = 0, E_{\text{п2}} = mgH \Rightarrow E_2 = E_{\text{к2}} + E_{\text{п2}} = mgH = \frac{mgv_1^2}{2g} = \frac{mv_1^2}{2}. \quad (5.41)$$

$$\boxed{E_1 = E_2} \Rightarrow \boxed{mgH = \frac{mv_1^2}{2}}. \quad (5.42)$$

Рассмотренные примеры позволяют сделать вывод о взаимном превращении энергий в замкнутой системе:  $E_k \leftrightarrow E_{п.}$

Если рассмотреть незамкнутую систему (с учетом внешних сил – силы трения, рис. 5.19):

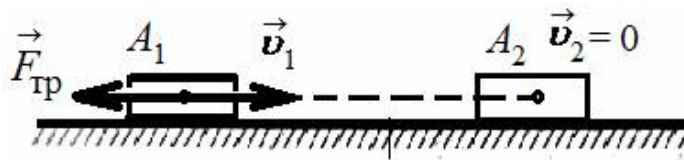


Рис. 5.19 Незамкнутая система

Видно, что  $E_{п1} = E_{п2} = 0$ , следовательно, полные энергии в точках  $A_1$  и  $A_2$ :

$$E_1 = \frac{mv_1^2}{2} \text{ и } E_2 = 0,$$

$$E_1 \neq E_2 \Rightarrow \Delta E \neq 0 \Rightarrow \Delta E = A_{тр} \quad (5.43)$$

$$E = E_k + E_{п.} + E_{сопр.}$$

## 5.2.4 Мощность

**Мощность** ( $N$ ) – физическая величина, которая показывает какая работа совершается за единицу времени.

$$\boxed{N = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{dA}{dt}}. \quad (5.44)$$

Скорость совершения работы

$$N_{ср} = \frac{A}{\Delta t}, \quad [N] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 1 \text{ Вт.}$$

**Ватт** (Вт) – мощность, при которой за время 1 с совершается работа в 1 Дж.

Временно сохраняется единица мощности 1 л.с. (лошадиная сила):

$$1 \text{ л.с.} = 736 \text{ Вт.}$$

**Мощность при постоянной силе:**

$$\boxed{N = Fv}.$$

Если  $F = \text{const}$ ;  $v = \text{const}$ , то  $N = \frac{A}{\Delta t} = \frac{F \cdot \Delta r}{\Delta t} = F \cdot v$ .  $\alpha = 0$ . (5.45)

$A = Nt$ , откуда единица работы в технике – 1 кВт·ч:

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

Отношение полезной работы  $A_{\text{п}}$  к полной (затраченной) работе  $A_3$  называется **коэффициентом полезного действия (КПД) простого механизма** ( $\eta$ ).

**Коэффициент полезного действия** ( $\eta$ ) определяется по формулам:

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_3}, \quad \eta = \frac{N_{\text{п}}}{N_3}. \quad (5.46)$$

где  $\eta < 1$  ( $\eta < 100\%$ ).

**Полезная работа** – работа, совершаемая двигателем и т.п.

### Интересные факты!

Мощность, которую развивает взрослый человек, едущий на велосипеде со скоростью 10 км/ч в безветренную погоду – 40 Вт; взрослый человек, едущий на велосипеде со скоростью 20 км/ч в безветренную погоду – 320 Вт.

## 5.2.5 Простые механизмы

**Простые механизмы** изменяют силу, скорость или направление движения в процессе совершения работы.

**Виды простых механизмов:**

- рычаг и его разновидности – блок, ворот;
- наклонная плоскость и его разновидности – клин, винт.

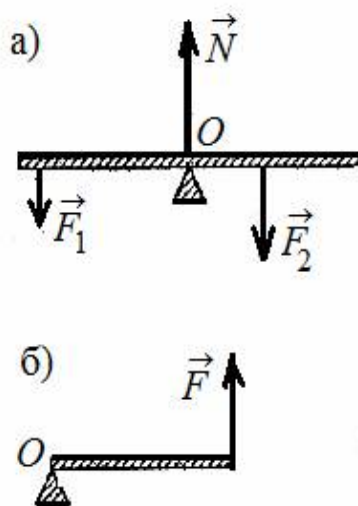


Рис. 5.20

**«Золотое правило» механики:** ни один из простых механизмов не дает выигрыша в работе. Во сколько раз выигрываем в силе, во столько раз проигрываем в расстоянии.

На практике совершенная с помощью механизма полная работа всегда несколько больше полезной. Часть работы совершается по преодолению силы трения.

**Рычаг** – это однородный стержень, имеющий точку опоры или подвеса.

Рычаг, у которого ось вращения в середине рычага – **рычаг первого рода** (рис. 5.20, а).

Рычаг, у которого ось вращения на конце рычага – **рычаг второго рода** (рис. 5.20, б).

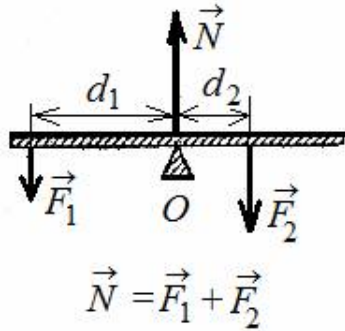


Рис. 5.21

**Правило равновесия рычага** (установлено Архимедом): рычаг находится в равновесии, когда действующие на него силы ( $\vec{F}_1, \vec{F}_2$ ) обратно пропорциональны плечам сил ( $d_1, d_2$ ) (рис. 5.21):

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

**Блок** представляет собой колесо с желобом, укрепленное в обойме. По желобу блока пропускают веревку, трос или цепь.

**Неподвижным блоком** называют такой блок, ось которого закреплена и при подъеме грузов не изменяет своего положения.

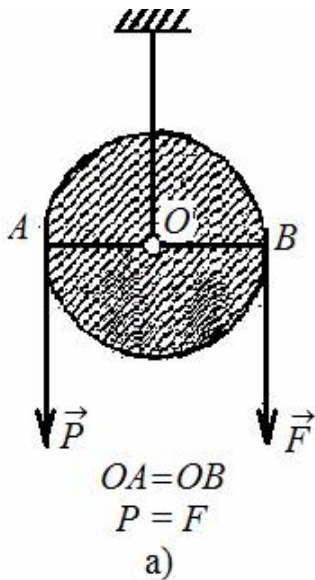


Рис. 5.22

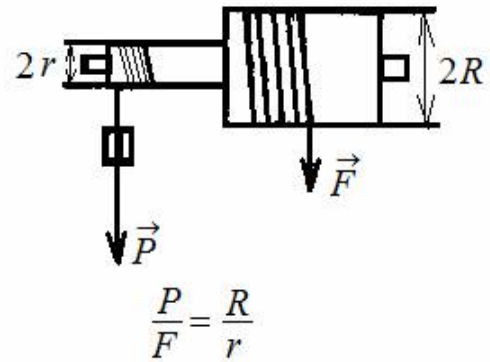
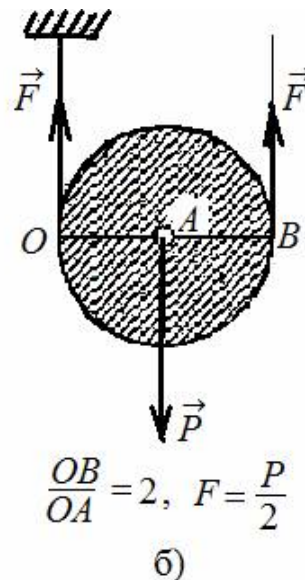


Рис. 5.23

Такой блок не дает выигрыша в силе, но позволяет изменять направление действия силы (рис. 5.22, а).

**Подвижный блок** поднимается и опускается вместе с грузом. Подвижный блок дает выигрыш в силе в 2 раза (рис. 5.22, б).

**Ворот**, состоящий из двух блоков с радиусом  $R$  и  $r$  ( $R > r$ ), дает выигрыш в силе (рис. 5.23).

**Наклонная плоскость.** Чтобы тело, которое находится на наклонной плоскости, было в состоянии покоя или равномерного (без трения) движения, необходимо приложить силу, параллельную наклонной плоскости, во столько раз меньшую силы тяжести, во сколько раз высота наклонной плоскости меньше ее длины (рис. 5.24):

$$\vec{F}_{\text{тр}} = 0, \vec{v} = \text{const}, F_{\text{т}} h = F_{\text{тяги}} l. \quad (5.47)$$

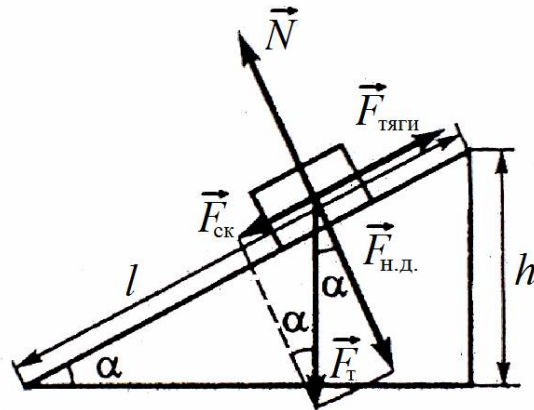
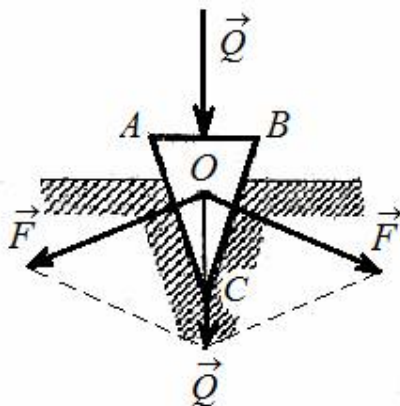


Рис. 5.24

КПД ( $\eta$ ) наклонной плоскости с учетом силы трения при равномерном перемещении груза вдоль наклонной плоскости:

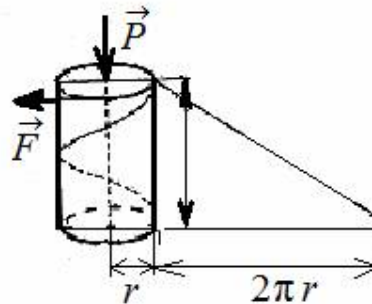
$$\eta = \frac{1}{1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha} 100\% . \quad (5.48)$$

**Клин** (рис. 5.25) – разновидность наклонной плоскости.



$$\frac{F}{Q} = \frac{AC}{AB}$$

Рис. 5.25



$$\frac{F}{P} = \frac{h}{2\pi r}$$

Рис. 5.26

Клин является основной частью ножа, ножниц, топора, рубанка. Чтобы клин находился в состоянии покоя или равномерного движения (без трения), необходимо приложить к нему силу, перпендикулярную его основанию (обуху), **во сколько раз меньше силы, действующей перпендикулярно боковой грани клина, во сколько раз основание (AB) меньше длины боковой поверхности клина (AC).**

**Винт** – цилиндрическое тело с резьбой, которая наносится по винтовой линии.

**Винтовой линией** называется линия, образованная гипотенузой прямоугольного треугольника, который накручивается на цилиндр.



**Шагом винтовой линии** называется расстояние, на которое переместится гайка при полном повороте винта (рис. 5.26).

Сила, которая действует по касательной к головке винта при отсутствии силы трения, во сколько раз меньше силы, действующей на винт вдоль его оси, во сколько раз шаг винта меньше длины окружности головки.

Винт используют в домкратах – простых устройствах для подъема груза.

### **Интересные факты!**

Коэффициент полезного действия простых механизмов: рычага – до 99%; блока – до 94 – 98%; клина – до 10 – 30%; домкрата винтового – до 30 – 40%.

### **Новые слова, словосочетания, языковые конструкции**

беспорядочно	передача
блок	переход
винт	правило
выигрывать	превращение
возможность	превращаться
возникать	проигрывать
ворот	простой механизм
изменение	работа
исчезать	равновесие
клин	разновидность
количество	род
количественный	рычаг
консервативные силы	убыль
коэффициент полезного действия	универсальная
мощность	функция
наклонная плоскость	энергия кинетическая
неотъемлемое свойство	энергия полная
	энергия потенциальная

1. **Чему соответствует что.**

*Каждой форме движения материи соответствует определенный вид энергии.*

2. **Что является мерой чего.**

**Работа является мерой изменения энергии.**

3. **Что определяется чем.**

*Механическое состояние данного тела определяется его скоростью и координатами в данной системе отсчета.*

4. **Что совершает что.**

**Движущие (моторные) силы совершают положительную работу.**  
**Силы сопротивления (трения) совершают отрицательную работу.**

5. **Что равно чему.**

**Работа силы тяжести равна убыли потенциальной энергии.**

6. **Что изменяет что.**

**Простые механизмы изменяют силу, скорость или направление движения в процессе совершения работы.**

### **Контрольные вопросы**

1. Запишите формулу механической работы. Что означает каждая величина в этой формуле?
2. При каком угле  $\alpha$  работа равна нулю?
3. Запишите формулу для кинетической энергии тела.
4. Как связана работа и изменение кинетической энергии тела?
5. Что происходит с кинетической энергией тела при действии на него силы трения?
6. С чем связана потенциальная энергия? Какое явление она характеризует? От чего зависит потенциальная энергия?
7. Запишите формулу для потенциальной энергии тела.
8. Как работа силы тяжести связана с изменением потенциальной энергии тела?
9. Чему равна работа силы тяжести при перемещении тела массой  $m$  с высоты  $h_1$  на высоту  $h_2$ ?
10. Зависит ли работа силы тяжести от траектории движения тела?
11. Зависит ли потенциальная энергия и работа силы тяжести от выбора начала отсчета высоты?
12. Запишите формулу для работы силы упругости при деформации пружины.
13. Как работа силы упругости связана с потенциальной энергией деформации?
14. Сформулируйте закон сохранения механической энергии.
15. При каких условиях сохраняется механическая энергия системы?
16. Запишите закон сохранения механической энергии для тела свободно падающего с высоты  $h$ .
17. Что происходит с механической энергией системы, в которой действуют силы трения?
18. Как связаны работа сил трения и изменение механической энергии системы?
19. Что такое мощность? В каких единицах она измеряется?
20. Что такое коэффициент полезного действия механизма?
21. Каково назначение простого механизма?
22. Какие виды простых механизмов вы знаете? Объясните принцип их действия.

## 6 ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

### 6.1 Статика жидкостей и газов

Статика жидкостей и газов изучает равновесие жидких и газообразных сред.

#### 6.1.1 Основные понятия

**Давление** ( $p$ ) – это физическая величина, равная отношению перпендикулярно действующей силы ( $F_n$ ) к единичной поверхности площадью ( $S$ ) (рис. 6.1):

$$p = \frac{F_n}{S}, \quad [p] = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па (Паскаль)}. \quad (6.1)$$

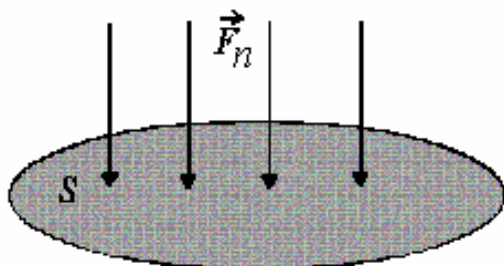


Рис. 6.1

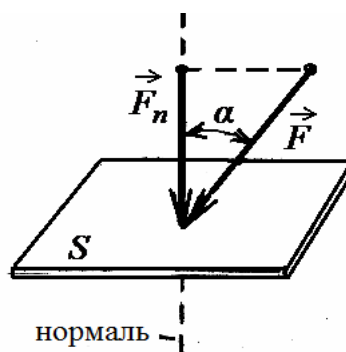


Рис. 6.2

Если сила  $\vec{F}$  действует под углом  $\alpha$  к поверхности  $S$  (рис. 6.2), то:

$$p = \frac{F_n}{S}, \quad (6.2)$$

где  $F_n$  – нормальная (перпендикулярная) к поверхности  $S$ , составляющая силы  $\vec{F}$ :

$$F_n = F \cdot \cos \alpha \quad (6.3)$$

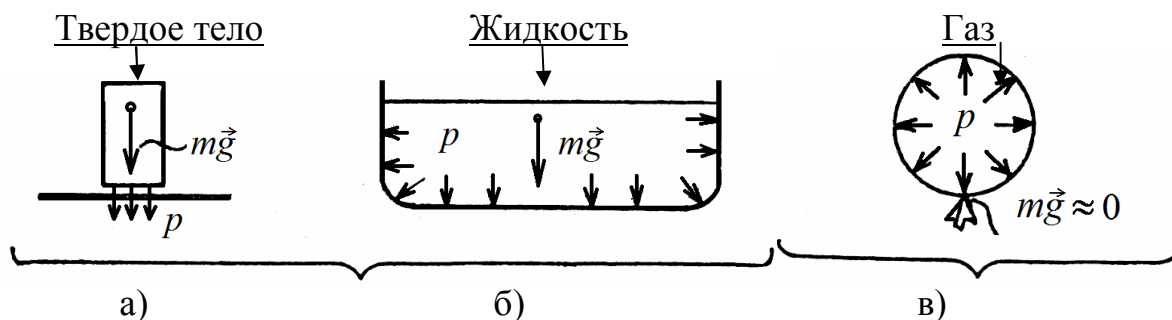


Рис. 6.3 Давление создается: а, б – действием силы тяжести ( $m\vec{g}$ ), т.е. это – весовое давление; в – ударами молекул газа о стенки сосуда

**Плотность.** Пусть вещество массой  $m$  имеет объём  $V$ , тогда плотность вещества можно определить:

$$\rho = \frac{m}{V}, [\rho] = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}. \quad (6.4)$$

Плотность показывает, чему равна масса  $1 \text{ м}^3$  вещества.

Плотности различных веществ (твёрдых, жидких) указаны в таблицах (плотность – табличная величина).

### 6.1.2 Закон Паскаля

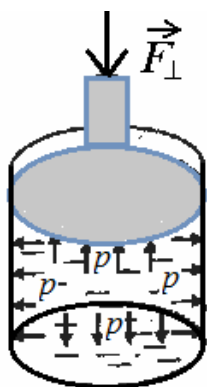


Рис. 6.4

Пусть на жидкость (или газ) действует сила  $F$ , которая создаёт давление  $p$  (рис 6.4):

Паскаль доказал, что это давление действует не только в направлении действия силы  $F$ , но и во всех других направлениях.

**Закон Паскаля:** Давление, действующее на жидкость (или газ), передаётся без изменения во все точки этой жидкости (или газа) и во все направления.

### 6.1.3 Гидростатическое давление жидкости

**Гидростатическое давление** – давление, которое создаёт вес столба неподвижной жидкости. Увеличивается с глубиной и зависит от плотности жидкости.

Найдём гидростатическое давление, которое создаёт столб жидкости высотой  $h$  (рис. 6.5)

Сила, с которой давит жидкость массой  $m$ :

$$F = mg. \quad (6.5)$$

Известно, что

$$m = \rho_{жс} V. \quad (6.6)$$

где  $\rho_{жс}$  – плотность жидкости;

$V = Sh$  – объём жидкости;

$h$  – высота столба жидкости;

$S$  – площадь поверхности, на которую давит жидкость.

Тогда **гидростатическое давление жидкости** можно определить:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{mg}{S} = \frac{\rho_{жс} \cdot S \cdot h \cdot g}{S} = \rho gh \quad (6.7)$$

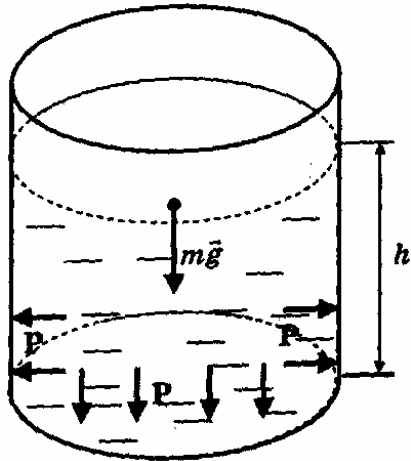


Рис. 6.5

По закону Паскаля это давление действует на глубине  $h$  во всех точках и во всех направлениях.

Если жидкость находится под внешним давлением  $p_0$  (например, давлением воздуха), тогда давление внутри жидкости на глубине  $h$  можно определить:

$$p = p_0 + \rho_{\text{ж}}gh. \quad (6.8)$$

Средняя сила, с которой жидкость действует на плоскую боковую поверхность (стенку сосуда):

$$F_{\text{ср}} = p_{\text{ц.т.}}S_{\text{ст}} \quad (6.9)$$

где  $p_{\text{ц.т.}}$  – давление на глубине центра тяжести жидкости;  
 $S_{\text{ст}}$  – площадь боковой стенки сосуда.

**Сообщающиеся сосуды** – сосуды, соединённые между собой так, что жидкость может свободно перетекать из одного сосуда в другой.

Например:

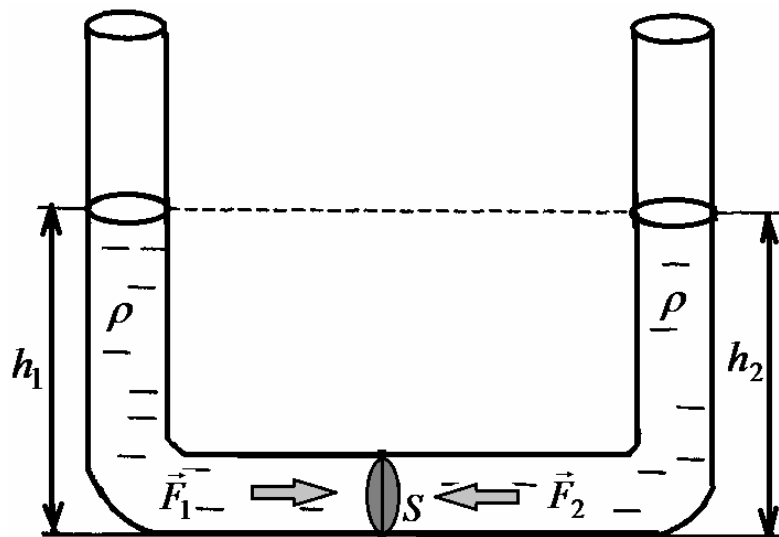


Рис. 6.6

Рассмотрим выделенный объём жидкости (рис. 6.6) в части, соединяющей сосуды. На него действуют силы  $\vec{F}_1$ ,  $\vec{F}_2$  со стороны столбов жидкости в 1-ом и 2-ом сосудах. Эти силы равны:

$$F_1 = p_1S \text{ и } F_2 = p_2S, \quad (6.10)$$

где  $S$  – площадь сечения выделенного объёма жидкости.

Гидростатическое давление столбов жидкости в 1-ом и 2-ом сосудах:

$$p_1 = \rho gh_1 \text{ и } p_2 = \rho gh_2 \quad (6.11)$$

Так как жидкость находится в равновесии, то  $F_1 = F_2$ , следовательно:

$$p_1 S = p_2 S \Rightarrow p_1 = p_2$$

$$\rho gh_1 = \rho gh_2 \Rightarrow h_1 = h_2 \quad (6.12)$$

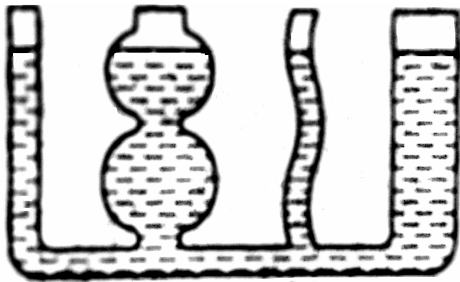


Рис. 6.7

В результате можно сделать следующий **вывод**: высота столбов жидкости в сообщающихся сосудах устанавливается на одном уровне.

Этот вывод справедлив для сообщающихся сосудов любой формы (рис.6.7).

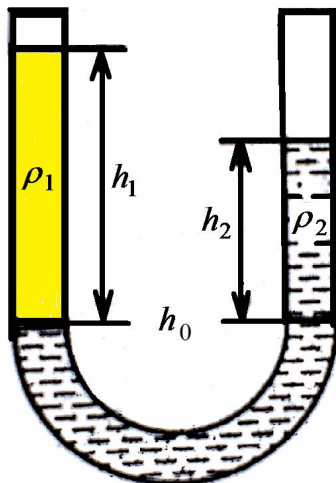


Рис. 6.8

В сосудах с разнородными несмешивающимися жидкостями высота столбов над уровнем  $h_0$ , ниже которого жидкость однородна, обратно пропорциональна их плотностям. Более плотная жидкость ( $\rho_1 < \rho_2$ ) всегда опускается на дно ( $h_1 > h_2$ ) (рис. 6.8):

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (6.13)$$

**Гидростатический парадокс:** при равновесии жидкости давление во всех точках одного уровня внутри жидкости одинаково.

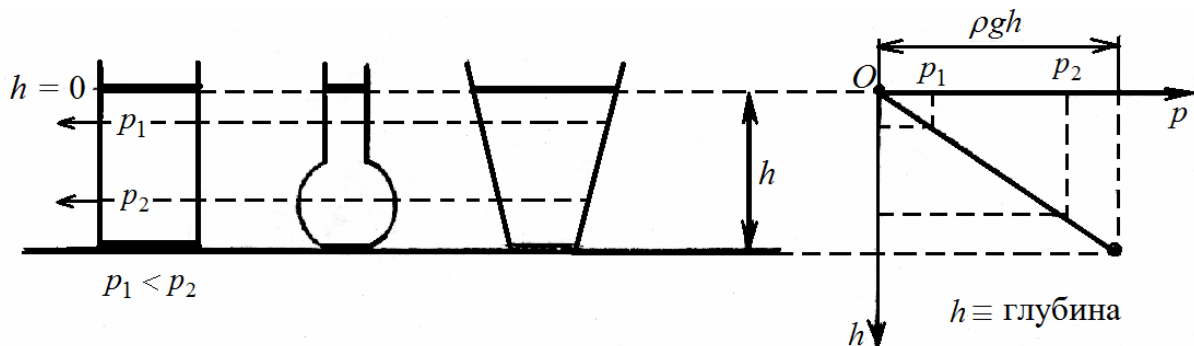


Рис. 6.9 Давление в сосудах разной формы

Давление на дно сосудов (рис. 6.9) одинаково:

$$p = \rho_{\text{ж}} gh. \quad (6.14)$$

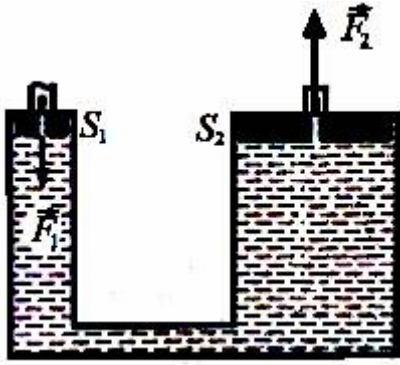


Рис. 6.10

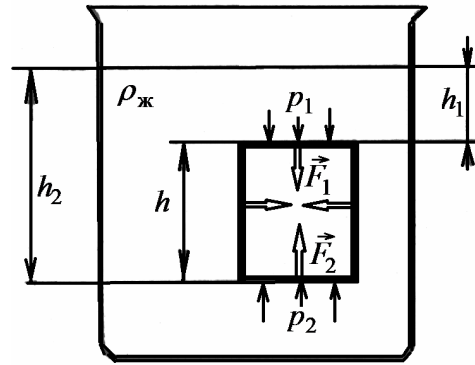


Рис. 6.11

**Гидравлическая машина** дает выигрыш в силе во столько раз, во сколько площадь ее большего поршня больше площади меньшего поршня ( $S_1 < S_2$ ) (рис. 6.10):

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}. \quad (6.15)$$

### 6.1.4 Закон Архимеда

На тело, погруженное в жидкость, действуют силы давления, которые зависят от глубины. Силы давления, действующие на нижнюю часть тела, больше сил, действующих на его верхнюю часть. Поэтому на тело действует сила, равная сумме всех сил давления жидкости на поверхность данного тела. Эта результирующая сила называется выталкивающей силой Архимеда ( $\vec{F}_A$ ). Определим ее величину.

Пусть на тело, погруженное в жидкость (рис. 6.11), действуют силы:

- на боковые поверхности на одном уровне, силы одинаковы, но противоположны по направлению, поэтому они уравновешены;
- сверху на тело действует сила:

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= p_1 S \\ p_1 &= \rho_{\text{ж}} g h_1 \end{aligned} \right\} F_1 = \rho_{\text{ж}} g h_1 S, \quad (6.16)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости.

- снизу на тело действует сила:

$$\left. \begin{aligned} F_2 &= p_2 S \\ p_2 &= \rho_{\text{ж}} g h_2 \end{aligned} \right\} F_2 = \rho_{\text{ж}} g h_2 S. \quad (6.17)$$

Результирующая сила  $F_A$ , действующая на верхнее и нижнее основания цилиндра равна:

$$F_A = F_2 - F_1 = \rho_{\text{ж}} g h_2 S - \rho_{\text{ж}} g h_1 S = \rho_{\text{ж}} g S \Delta h = \rho_{\text{ж}} g V_{\text{т}} = m_{\text{ж}} g, \quad (6.18)$$

где  $V_{\text{т}} = S \Delta h$  - объем тела;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости;

$m_{\text{ж}} = \rho_{\text{ж}} V_{\text{т}}$  - масса жидкости, вытесненной телом.

**Закон Архимеда:** на тело, погруженное в жидкость или газ, действует выталкивающая сила, равная по модулю силе тяжести жидкости (или газа), занятой телом.

Архимедова сила приложена к центру тяжести (массы) занятой телом жидкости. Она обусловлена разностью давлений на верхнюю и нижнюю поверхности тела, при этом атмосферное давление взаимно компенсируется.

В газе также действует сила Архимеда, но она намного меньше, чем в жидкости, так как плотность газа намного меньше плотности жидкости.

**Следствия:**

1) В невесомости: 
$$\vec{F}_A = 0; \tag{6.19}$$

2) Вес тела в жидкости уменьшается:  
обозначим  $P_{\text{ж}}$  – вес тела в жидкости, тогда

$$P_{\text{ж}} = m_{\text{т}}g - F_A. \tag{6.20}$$

Если в жидкости находится все тело ( $V_{\text{т}} = V_{\text{ж}}$ ):

$$P_{\text{ж}} = \rho_{\text{т}}V_{\text{т}}g - \rho_{\text{ж}}V_{\text{ж}}g = (\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}})V_{\text{т}}g, \tag{6.21}$$

где  $\rho_{\text{т}}$  – плотность тела;  $V_{\text{т}}$  – объём всего тела.

**Условия плавания тел:** на тело, находящееся в жидкости, действуют сила тяжести ( $m_{\text{т}}\vec{g}$ ) и сила Архимеда ( $\vec{F}_A$ ):

$$m_{\text{т}}g = \rho_{\text{т}}V_{\text{т}}g, \tag{6.22}$$

$$F_A = \rho_{\text{ж}}V_{\text{ж}}g, \tag{6.23}$$

где  $V_{\text{ж}}$  – объём части тела, находящейся в жидкости.

Условие плавания тела имеет вид:

$$m_{\text{т}}g = F_A \Rightarrow \rho_{\text{т}}V_{\text{т}}g = \rho_{\text{ж}}V_{\text{ж}}g \Rightarrow \rho_{\text{т}}V_{\text{т}} = \rho_{\text{ж}}V_{\text{ж}} \tag{6.24}$$

Возможны случаи (рис. 6.12):

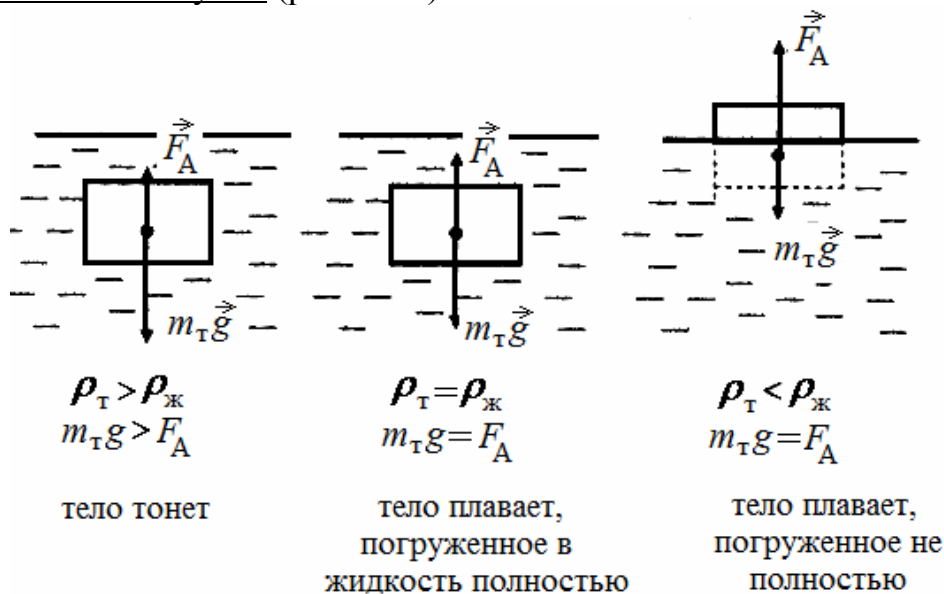


Рис. 6.12



Таблица 6.1

Поведение тела	Неоднородное тело	Однородное тело
Тонет	$F_A < m_T g$	$\rho_T > \rho_{ж}$
Всплывает	$F_A > m_T g$	$\rho_T < \rho_{ж}$
Плавает внутри жидкости	$F_A = m_T g$	$\rho_T = \rho_{ж}$
Плавает на поверхности жидкости	$F_A = m_T g$	$\rho_T < \rho_{ж}$

### Интересные факты!

**Плавание судов.** Тяжелые грузы и двигатели располагаются в нижней части корабля, чтобы центр тяжести (2) был ниже точки приложения архимедовой силы (1), что обеспечивает устойчивость корабля (при наклоне корабля  $\vec{F}_A$  и  $m_T \vec{g}$  становятся парой сил, возвращающих корабль в вертикальное положение) (рис. 6.13).

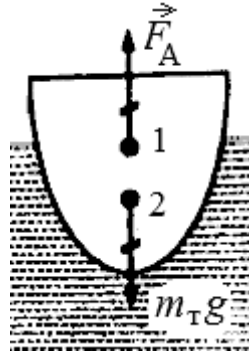


Рис. 6.13

Вес воды, вытесняемой судном до **ватерлинии** (наибольшая допустимая осадка, отмеченная на корпусе красной линией), равный силе тяжести, действующей на судно с грузом, называется **водоизмещением судна**. Если из водоизмещения вычесть вес самого судна ( $P_c$ ), то получим **грузоподъемность судна**:

$$P_{\text{водоизм}} - P_c = P_{\text{гр}} \quad (6.25)$$

Разность между весом  $1 \text{ м}^3$  воздуха и весом такого же объема другого газа называется подъемной силой  $1 \text{ м}^3$  газа:

$$F_{\text{под}} = P_{\text{возд}} - P_{\text{газа}}, \quad (6.26)$$

$$F_{\text{под}} = (\rho_{\text{возд}} - \rho_{\text{газа}}) g V_{\text{газа}}. \quad (6.27)$$

**Изменение плотности тела методом гидростатического взвешивания:**

$$\rho_T = \frac{P}{P - P'} \rho_{ж}, \quad (6.28)$$

где  $P$  – вес тела в воздухе;  $P'$  – вес тела в жидкости.

## 6.1.5 Атмосферное давление

**Атмосферное давление** ( $p_{\text{атм}}$ ) – гидростатическое давление единичного вертикального столба воздуха.

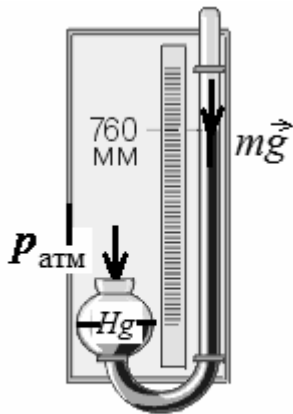


Рис. 6.14

Особенность атмосферного давления (давления газов): к определению атмосферного давления формула  $p = \rho gh$  неприменима, так как плотность воздуха  $\rho$  с высотой уменьшается.

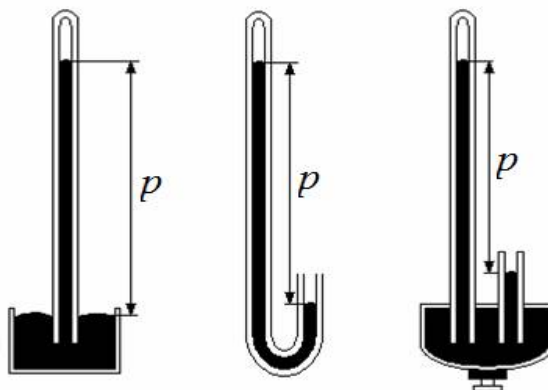
Впервые атмосферное давление было измерено **Торричелли**. В опытах Торричелли атмосферное давление уравнивается давлением столба ртути (рис. 6.14).

*Атмосферное давление, равное давлению столба ртути высотой  $h_{\text{Hg}} = 0,76$  м при температуре  $0^\circ\text{C}$ , называется **нормальным атмосферным давлением**:*

$$p_0 = \rho_{\text{Hg}} g h_{\text{Hg}} = 13,6 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 0,76 \text{ м} = 1013,2 \text{ гПа} \approx 10^5 \text{ Па}.$$

### **Приборы для измерения атмосферного давления:**

- в настоящее время применяются несколько видов жидкостных манометров (ртутных барометров), их устройство основано на принципе сообщающихся сосудов (рис. 6.15):



а) чашечный, б) сифонный, в) сифонно-чашечный

Рис. 6.15 – Ртутные барометры

- металлические (барометр aneroid): состоит из металлической гофрированной коробочки, которая сжимается при увеличении атмосферного давления и расширяется при его уменьшении (рис. 6.16):

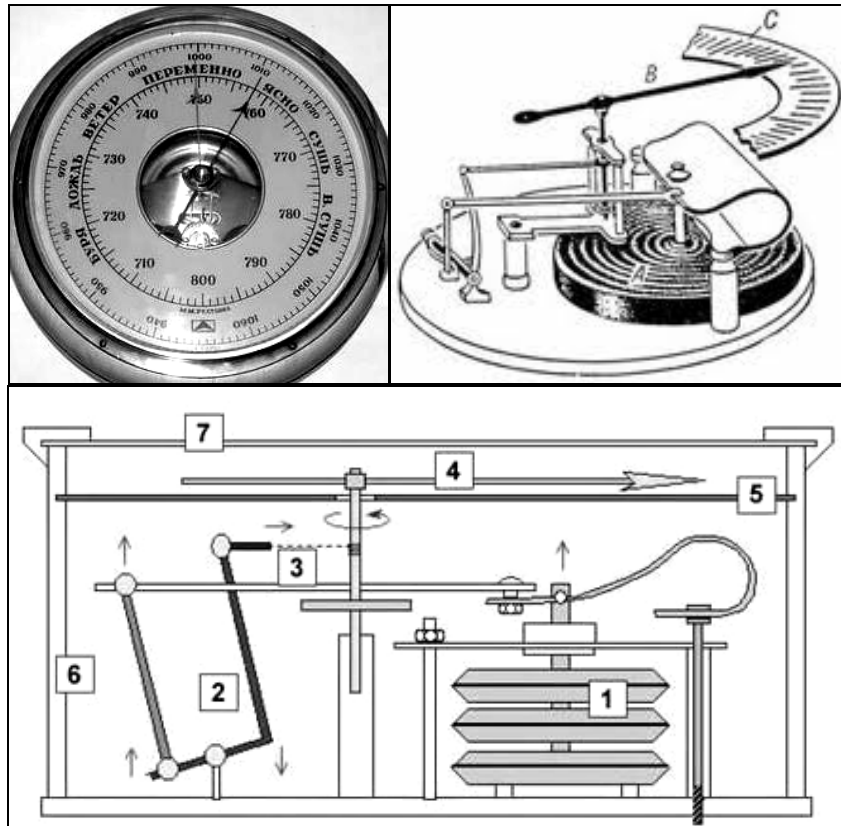


Рис. 6.16 – Барометр анероид

- в метеорологии используются также барографы, для непрерывной регистрации атмосферного давления на метеостанциях (рис. 6.17):



Рис. 6.17 – Барограф

- современный цифровой барометр (рис. 6.18):



Рис. 6.18 – Цифровой барометр

### Единицы измерения атмосферного давления и их соотношение:

- 1) 1 гПа (100 Па) = 0,75 мм рт. ст.;
- 2) 1 мм рт. ст. = 133 Па;
- 3) 1 гПа = 1 мб (миллибары – уже устаревшая шкала).

Атмосферное давление с увеличением высоты над Землей уменьшается на 1 мм рт. ст. в среднем на каждые 12 м подъема.

## 6.2 Гидродинамика

**Гидродинамика** – раздел механики, изучающий движение (течение) жидкостей или газов, а также их взаимодействие с телами, которые движутся в них.

### 6.2.1 Уравнение неразрывности струи

Рассмотрим жидкость, движущуюся по трубе (рис. 6.19):

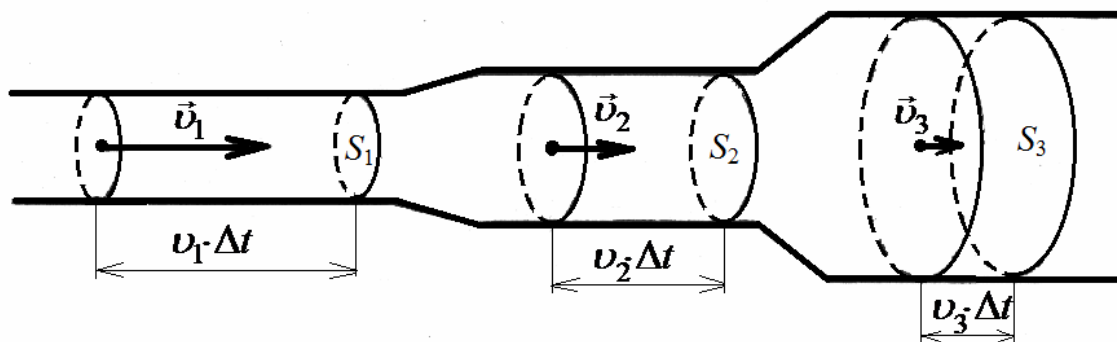


Рис. 6.19

где  $S_1, S_2, S_3$  – площади сечений трубы;

$\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3$  – скорости жидкости в этих сечениях.

Жидкость – несжимаема ( $V \approx \text{const}$ ) и не изменяет свою плотность ( $\rho \approx \text{const}$ ). Тогда объем жидкости, который проходит за время  $\Delta t$ :

$$\left. \begin{array}{l} - \text{ через сечение } S_1 : V_1 = S_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t \\ - \text{ через сечение } S_2 : V_2 = S_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t \\ - \text{ через сечение } S_3 : V_3 = S_3 \cdot v_3 \cdot \Delta t \end{array} \right\} \quad (6.29)$$

Если  $V = \text{const}$ , то  $V_1 = V_2 = V_3 = \dots = \text{const}$ , следовательно:

$$S_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t = S_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t = S_3 \cdot v_3 \cdot \Delta t = \dots = \text{const} . \quad (6.30)$$

Уравнение неразрывности струи:

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = S_3 \cdot v_3 = \dots = \text{const}, \text{ т.е. } S \cdot v = \text{const} . \quad (6.31)$$

Видно, что при увеличении  $S$  - скорость  $v$  уменьшается:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{v_2}{v_1} . \quad (6.32)$$

Следовательно скорость течения жидкости обратно пропорциональна площади сечения струи:

Пример: шприц (рис. 6.20)

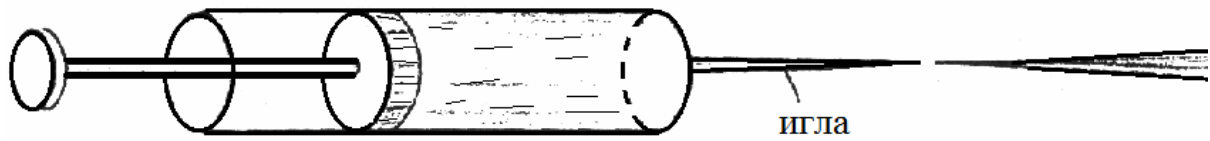
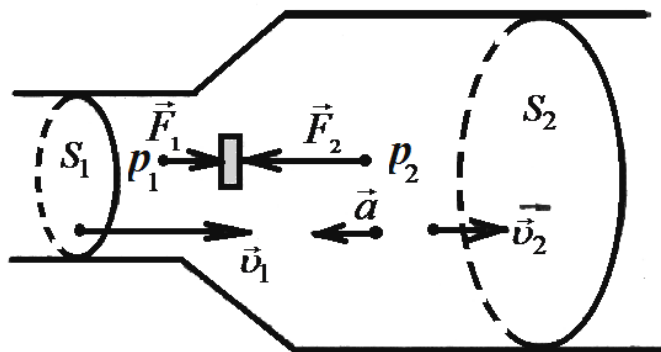


Рис. 6.20

### 6.2.2 Давление движущейся жидкости



Жидкость переходит из  $S_1$  в  $S_2$  (рис. 6.21) ( $S_2 > S_1$ )  
 $\Downarrow$   
 ее скорость уменьшается  
 $v_2 < v_1$ .

Рис. 6.21

Видно, что:

$$\left. \begin{array}{l} \vec{a} \downarrow \uparrow \vec{v} \\ \vec{a} \rightarrow \vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \end{array} \right\} \vec{F} \downarrow \uparrow \vec{v}, \quad (6.33)$$

$$\begin{aligned} F &= F_2 - F_1, \\ F_2 > F_1 &\Rightarrow p_2 > p_1. \end{aligned} \quad (6.34)$$

Чем больше скорость движения жидкости, тем меньше давление в ней:

$$v_1 > v_2 \Rightarrow p_1 < p_2. \quad (6.35)$$

$$\left. \begin{array}{l} S_1 > S_2 > S_3 \\ v_3 > v_2 > v_1 \end{array} \right\} \Rightarrow p_1 > p_2 > p_3. \quad (6.36)$$

Давление (рис. 6.22), которое возникает только за счет движения жидкости – динамическое давление ( $p_{\text{дин}}$ ).

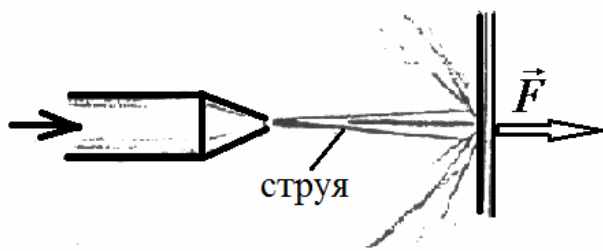


Рис. 6.22

**Динамическое давление** действует в направлении движения жидкости:

$$p_{\text{дин}} = \frac{\rho_{\text{ж}} v^2}{2}, \quad (6.37)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  - плотность жидкости;  $v$  - модуль скорости жидкости.

Если  $v$  - увеличивается  $\begin{cases} p_{\text{ст}} - \text{уменьшается} \\ p_{\text{дин}} - \text{увеличивается} \end{cases}$   $p_{\text{ст}} + p_{\text{дин}} = \text{const}$

**Уравнение Бернулли:** полное давление можно определить

$$p + \frac{\rho_{\text{ж}} v^2}{2} = \text{const}, \quad (6.38)$$

где  $p = p_{\text{атм}} + \rho_{\text{ж}} g h$  - статическое давление жидкости.

### **Новые слова, словосочетания, языковые конструкции**

аэродинамика  
барометр  
взвешивание  
водоизмещение  
выталкивающая  
вытесняемый  
газообразный  
гидравлическая машина  
гидродинамика  
глубина  
грузоподъемность  
давление атмосферное  
давление гидростатическое  
давление нормальное  
давление полное  
давление статическое  
жидкость  
занятый телом  
манометр  
находиться

неразрывный  
несжимаемый  
однородный  
парадокс  
перетекать  
плавать  
площадь поверхности  
площадь сечения  
поршень  
разнородный  
сообщающиеся сосуды  
среда  
стенки сосуда  
столб жидкости  
струя  
течение  
тонуть  
труба  
уровень  
устанавливаться

**1. Что приложено как.**

Архимедова сила приложена к центру тяжести (массы) занятой телом жидкости.

**2. Из чего вычесть что.**

Если из водоизмещения вычесть вес самого судна, то получим грузоподъемность судна

**Контрольные вопросы**

1. Что такое давление? Напишите формулу давления.
2. Какова единица давления?
3. Как зависит давление от площади поверхности ( $S$ ), на которую действует сила? Приведите примеры использования этой зависимости для уменьшения и увеличения давления?
4. Что такое плотность вещества? Назовите единицу плотности.
5. Сформулируйте закон Паскаля. Где он действует?
6. Что такое гидростатическое давление жидкости?
7. Запишите формулу для гидростатического давления.
8. В каком направлении действует гидростатическое давление внутри жидкости?
9. Что такое сообщающиеся сосуды?
10. Как располагается жидкость в сообщающихся сосудах? Почему?
11. Зависит ли расположение жидкости в сообщающихся сосудах от их формы?
12. Чем создается атмосферное давление?
13. Чему равно нормальное атмосферное давление?
14. Можно ли рассчитать атмосферное давление по формуле  $p = \rho gh$ ? Почему?
15. Как изменяется атмосферное давление с высотой над поверхностью Земли?
16. Какой прибор измеряет атмосферное давление?
17. Что такое миллиметр ртутного столба?
18. Объясните, почему на тело в жидкости действует сила Архимеда?
19. Напишите формулу для силы Архимеда.
20. Сформулируйте закон Архимеда.
21. Действует ли сила Архимеда в невесомости?
22. Как найти вес тела в жидкости?
23. Каково условие плавания тела?
24. Что будет с телом в жидкости, если его плотность больше плотности жидкости; равна плотности жидкости; меньше плотности жидкости?
25. Что изучает гидродинамика?
26. Как зависит скорость течения жидкости от площади сечения струи?
27. Что такое динамическое давление?
28. Чему равно полное давление?

## 7 МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

*Молекулярно-кинетическая теория* – это научная теория, которая объясняет тепловые явления, физические свойства тел и веществ в различных агрегатных состояниях на основе их молекулярного строения, взаимодействия и движения частиц.

Основоположником молекулярно-кинетической теории являются *Демокрит* (V – IV в. до нашей эры), *М.В.Ломоносов* (XVIII в.).

### 7.1 Основные положения молекулярно-кинетической теории

**I положение.** Все вещества состоят из молекул или других структурных единиц (атомов, ионов и электронов), разделенных промежутками. Доказательством дискретного состояния вещества являются фотографии, полученные с помощью ионного, электронного и туннельного микроскопов. О наличии промежутков между молекулами свидетельствует изменение объема твердых тел и жидкости при изменении их температуры.

**II положение.** Молекулы или другие структурные частицы находятся в непрерывном хаотическом движении. Подтверждением этого положения служат явления диффузии, осмоса, броуновского движения.

*Диффузия* – это процесс перераспределения концентрации атомов в пространстве благодаря хаотической, т.е. тепловой миграции.

*Осмоз* – односторонняя диффузия.

*Броуновское движение* – хаотическое движение взвешенной в жидкости или газе частицы твердого тела. Открыто в 1827 г. английским ботаником Р. Броуном. Наблюдается в оптический микроскоп с увеличением  $\Gamma \approx 500$ . Объясняется толчками окружающих частицу молекул вследствие их неупорядоченного теплового движения.

**III положение.** Молекулы или атомы одновременно притягиваются и отталкиваются, а равнодействующая этих сил называется силой молекулярного взаимодействия. Доказательством является возникновение упругих сил при деформации тел, возникновение сил поверхностного натяжения.

*Силы молекулярного взаимодействия* являются силами притяжения и отталкивания, зависят от расстояния между молекулами и возникают вследствие взаимодействия электрических зарядов, входящих в их состав. Эти силы являются короткодействующими.

График зависимости силы молекулярного взаимодействия  $F_{м.в.}$  от расстояния между молекулами для простейших молекул изображен на рис. 7.1.



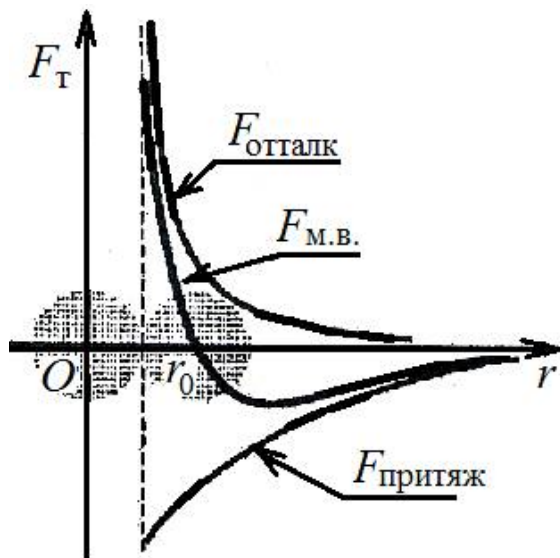


Рис. 7.1

При  $r = r_0 \approx d_m$  ( $d_m$  – диаметр молекулы) молекулы находятся в равновесии.

При  $r < r_0$  преобладают силы отталкивания.

При  $r > r_0$  преобладают силы притяжения.

При  $r \approx 10 r_0$  силы притяжения ничтожно малы, поэтому ими можно пренебречь.

Следовательно, сфера молекулярного действия  $\approx 10^{-9}$  м.

Простейшие молекулы – это 1-3 атомные молекулы, которые можно

представить как шарик определенного диаметра  $d_0 \approx 10^{-10}$  м.

### 7.1.1 Основные параметры молекулярно-кинетической теории

**Молекула** – наименьшая устойчивая частица вещества, сохраняющая его основные химические свойства. Она состоит из атомов одинаковых или разных химических элементов, например,  $H_2$ ,  $NaCl$ ,  $C_6H_{12}O_6$ .

Совокупность молекул сохраняет физические свойства вещества.

**Вещество** – это то, из чего состоит физическое тело.

**Атом** – наименьшая частица вещества, не делящаяся при химических реакциях, например,  $H$ ,  $Na$ ,  $Cl$ ,  $C$ ,  $O$ .

➤ **Относительной молекулярной массой  $M_r$**  называют отношение массы молекулы  $m_0$  к  $1/12$  массы атома углерода  $m_{0C}$  (**атомной единице массы а.е.м.**):

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}} \quad (7.1)$$

где  $M_r$  – безразмерная величина.

Масса молекулы определяется с помощью периодической системы Менделеева, где указаны относительные атомные массы веществ  $M$ .

**Один моль** – количество вещества, в котором содержится столько же молекул или атомов, сколько атомов содержится в изотопе углерода  $^{12}_6C$  массой 0,012 кг.

- **Постоянная Авогадро** ( $N_A$ ) число атомов или молекул в 1 моле любого вещества:

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}. \quad (7.2)$$

- Согласно **закону Авогадро** 1 моль идеального газа при нормальных условиях ( $p_0 = 1,01 \cdot 10^5$  Па,  $T = 273$  К) занимает объем:

$$V_m = 22,4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}. \quad (7.3)$$

- **Количество вещества** ( $\nu$ ) – отношение числа молекул ( $N$ ) в данном теле к постоянной Авогадро ( $N_A$ ), т.е. к числу молекул в 1 моле вещества:

$$\nu = \frac{N}{N_A}, [\nu] = 1 \text{ моль}. \quad (7.4)$$

- **Масса одного моля вещества называется молярной массой:**

$$M = m_0 N_A \text{ или } M = M_r \cdot 10^{-3}, [M] = 1 \text{ кг/моль}. \quad (7.5)$$

- **Масса молекулы** (в кг), выраженная через молярную массу:

$$m_0 = \frac{M}{N_A}. \quad (7.6)$$

- **Масса тела** (в кг), выраженная через массу одной молекулы и число молекул:

$$m = m_0 N. \quad (7.7)$$

- **Количество вещества** ( $\nu$ ) ещё можно определить через отношение массы вещества к его молярной массе:

$$\nu = \frac{m}{M}, [\nu] = 1 \text{ моль}. \quad (7.8)$$

- **Концентрация** ( $n$ ) равна числу частиц в единице объема:

$$n = \frac{N}{V}, [n] = 1 \text{ м}^{-3}. \quad (7.9)$$

## 7.1.2 Тепловые явления. Температура

Физические процессы, связанные с нагреванием или охлаждением тел, изменением их агрегатного состояния, называют **тепловыми явлениями**.

При изучении тепловых явлений вводится физическая величина – **температура**.

**Температура** – это величина, характеризующая тепловое равновесие системы. Во всех частях системы, находящейся в тепловом равновесии, температура одинакова и отсчитывается от состояния, принятого за нулевое.

Температура измеряется жидкостными или газовыми термометрами, соответствующим образом градуированными. Высокая температура измеряется оптическими (по спектру испускания) или электрическими термометрами (полупроводниковые термисторы, термопары).

В *международной практической шкале температур* за нуль ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) принята температура таяния льда при нормальном атмосферном давлении ( $p_0 = 1013,2\text{ гПа}$ ), за  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  – температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении.  $1/100$  этого интервала – это  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Цельсия). Обозначается  $t\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В *термодинамической (теоретической) шкале температур* за нуль принята температура, при которой прекратилось бы тепловое движение частиц, из которых состоит тело. *Эта температура называется абсолютным нулем температур*. Измеряется в Кельвинах (К) и обозначается  $T\text{ К}$ .

Формула связи термодинамической температуры ( $T\text{ К}$ ) и температуры по международной шкале температур ( $t\text{ }^{\circ}\text{C}$ ):

$$T = (273,15 + t\text{ }^{\circ}\text{C})\text{ К.} \quad (7.10)$$

По международной практической шкале *абсолютный нуль* соответствует температуре  $t = -273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  или теоретической шкале  $T = 0\text{ К}$ .

### ***Интересные факты!***

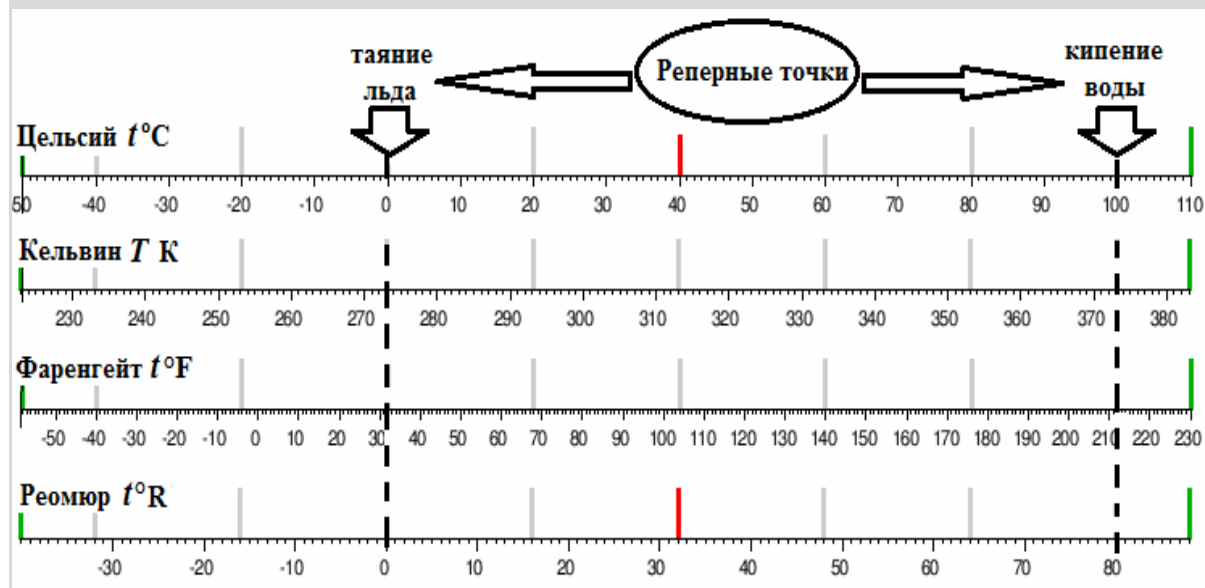
Кроме представленных выше температурных шкал существуют и другие:

➤ ***Шкала Фаренгейта*** ( $t\text{ }^{\circ}\text{F}$ ). Шкала названа в честь предложившего её в [1724 году](#) немецкого учёного [Габриеля Фаренгейта](#). Долгое время шкала Фаренгейта была основной в [англоговорящих](#) странах, но в конце [1960-х](#) — начале [1970-х](#) годов она была практически вытеснена [шкалой Цельсия](#) и Решением Международных организаций при ООН, был намечен постепенный переход на единую шкалу Цельсия после 2010 г. Только в [США](#) и [Белизе](#) шкала Фаренгейта до сих пор широко используется в бытовых целях.

Ноль на этой шкале определяется по температуре замерзания смеси воды, льда и нашатыря (1:1:1), а за  $100\text{ }^{\circ}\text{F}$  принята средняя температура тела здорового человека.

➤ ***Шкала Реомюра*** ( $t\text{ }^{\circ}\text{R}$ ). Предложена в 1730 году Р. А. Реомюром, который описал изобретённый им спиртовой термометр. Один градус этой шкалы равен  $1/80$  разности температур кипения воды и таяния льда (то есть градус Реомюра равен  $5/4$  градуса Цельсия); шкала практически вышла из употребления.

## Диаграмма перевода температур



## Сравнение температурных шкал

Описание	Кельвин	Цельсий	Фаренгейт	Реомюр
Абсолютный ноль	0	-273.15	-459.67	-218.52
Температура таяния смеси Фаренгейта (соли и льда в равных количествах)	255.37	-17.78	0	-14.22
Температура замерзания воды (нормальные условия)	273.15	0	32	0
Средняя температура человеческого тела	310.0	36.8	98.2	29.6
Температура кипения воды (нормальные условия)	373.15	100	212	80
Температура поверхности Солнца	5800	5526	9980	4421

*Температура внутри молнии* обычно около 20000 °С. Иногда больше. Но никогда не превышает 30000 °С в канале молнии, самом горячем месте. В области канала - около 2000-3000 °С, не выше. На расстоянии в 30 см от канала температура невысокая, около 300 °С. При ударе молнии, песок превращается в стекло. После грозы можно обнаружить стеклянные полосы в песке.

### 7.1.3 Особенности теплового движения частиц

Непрерывное хаотическое движение частиц называется **тепловым движением**.

Молекулярная физика рассматривает физические системы, которые состоят из большого числа частиц. Только в этом случае можно говорить о тепловом движении.

Основными свойствами теплового движения являются его массовость, непрерывность и хаотичность.

Положение частиц в процессе теплового движения всё время изменяется, их скорости смогут быть различными как по модулю, так и по направлению. Движение каждой частицы в отдельности подчиняется законам механики.

**Средний квадрат проекции скорости** равен

$$\overline{v^2} = \frac{\vec{v}_1^2 + \vec{v}_2^2 + \vec{v}_3^2 + \dots + \vec{v}_N^2}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N \vec{v}_i^2}{N}, \quad (7.11)$$

где  $N$  - число молекул.

**Средняя квадратичная скорость** молекул ( $\bar{v}$ ) это корень квадратный из среднего квадрата скорости:

$$\bar{v} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \vec{v}_i^2}{N}}. \quad (7.12)$$

Аналогично вводится понятие **средней кинетической энергии** теплового движения частицы:

$$\overline{E_k} = \frac{E_{k1} + E_{k2} + E_{k3} + \dots + E_{kN}}{N} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}, \quad (7.13)$$

где  $m_0$  – масса молекулы (частицы).

На основе количественных измерений некоторых свойств тел и веществ установлено, что повышение температуры приводит к увеличению интенсивности теплового движения. Чем больше температура тела, тем больше средняя скорость движения молекул, тем больше средняя кинетическая энергия молекул.

Средняя кинетическая энергия теплового движения частиц пропорциональна абсолютной температуре:

$$\overline{E_k} \approx T. \quad (7.14)$$

В молекулярно-кинетической теории **температура** – это величина, определяемая средней кинетической энергией частиц, из которых состоит система:

$$\overline{E_k} = \frac{i}{2} kT, \quad (7.15)$$

где  $i = 3$  - для одноатомных молекул;

$i = 5$  - для двухатомных молекул;

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

Тогда **среднюю скорость теплового движения** одноатомных молекул можно ещё определить:

$$\overline{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}, \quad (7.16)$$

где  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$  – **универсальная газовая постоянная**, равная

произведению постоянной Больцмана  $k$  и постоянной Авогадро  $N_A$ :

$$R = kN_A. \quad (7.17)$$

Примеры этой скорости для различных газов при  $0^\circ\text{C}$ : кислород – 475 м/с; азот – 493 м/с; водород – 1840 м/с.

#### 7.1.4 Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа (уравнение Клаузиуса)

**Идеальный газ** — это газ, в котором среднее расстояние между молекулами намного больше размеров молекул, поэтому потенциальной энергией молекул в нем пренебрегают.

**Основное уравнение молекулярно-кинетической теории (МКТ) газа (уравнение Клаузиуса)** связывает микропараметры ( $m_0$ ,  $n$ ,  $\overline{v^2}$ ) и макропараметры ( $p$ ,  $V$ ,  $T$ ):

$$p = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2}, \quad (7.18)$$

где  $m_0$  – масса молекулы;  $n$  – концентрация молекул;  $\overline{v^2}$  – средний квадрат скорости движения молекул.

**Основное уравнение МКТ**, выражающее зависимость давления газа ( $p$ ) от концентрации молекул ( $n$ ) и температуры ( $T$ ):

$$p = nkT. \quad (7.19)$$

**Закон Авогадро:** в равных объемах газов при одинаковых температурах и давлениях содержится одинаковое число молекул:

$$p = nkT = \frac{N}{V} kT, \quad (7.20)$$

где  $n = \frac{N}{V}$ .

### **Новые слова, словосочетания, языковые конструкции**

абсолютный нуль	микроскоп туннельный
агрегатное состояние	микроскоп электронный
атомная единица массы	молекула
безразмерная	молекулярное взаимодействие
движение непрерывное	молекулярно-кинетическая
движение броуновское	молекулярная масса
движение тепловое	моль
движение хаотическое	молярная масса
диффузия	осмос
идеальный газ	отталкивание
изотоп	преобладать
квадрат	преобладают
квадратичный	притяжение
количество вещества	равновесие
концентрация	средний квадрат скорости
короткодействующие	средняя квадратичная скорость
макропараметры	температура
масса тела	теория
миграция	тепловой
микропараметры	термодинамический
микроскоп ионный	термометр
микроскоп оптический	шкала

#### **1. О чем свидетельствует что.**

**О наличии промежутков между молекулами свидетельствует изменение объема твердых тел и жидкости при изменении их температуры.**

#### **2. Подтверждением чего служит что.**

**Подтверждением этого положения служат явления диффузии, броуновского движения.**

#### **3. Что измеряется чем.**

**Температура измеряется жидкостными или газовыми термометрами.**

#### **4. Что выражается чем.**

**Основное уравнение МКТ выражается зависимостью давления газа ( $p$ ) от концентрации молекул ( $n$ ).**

### ***Контрольные вопросы***

1. Сформулируйте основные положения молекулярно-кинетической теории.
2. Какие факты свидетельствуют о том, что физические тела в веществе дискретны?
3. Какие явления доказывают, что частицы тел и веществ находятся в непрерывном хаотическом движении?
4. Какие явления подтверждают, что между молекулами имеются промежутки?
5. Что свидетельствует о том, что между частицами существуют силы молекулярного взаимодействия?
6. Какие силы молекулярного взаимодействия зависят от расстояния между молекулами?
7. Чему равен средний квадрат проекции скорости молекул?
8. Чему равна средняя квадратичная скорость молекул?
9. Чему равна средняя кинетическая энергия теплового движения частиц?
10. Какие физические явления (процессы) называют тепловыми?
11. Какой физический смысл понятия «температура»?
12. При помощи, каких приборов определяется температура?
13. Какая физическая величина определяет температуру тела?
14. Как называется единица, которую применяют для выражения температуры в шкале Цельсия? В шкале Кельвина?
15. Что принято за нулевую точку отсчета температуры  $0^{\circ}\text{C}$ ?
16. Каково соотношение между шкалой Кельвина и Цельсия для измерения температур?
17. Что такое абсолютный нуль температур?
18. Как зависит температура от средней кинетической энергии теплового движения частиц?
19. Каково соотношение между средней кинетической энергией молекулы достаточно разреженного газа и абсолютной температурой?
20. Чему равна постоянная Больцмана?
21. Как определить среднюю скорость теплового движения одноатомных молекул?
22. Чему равна универсальная газовая постоянная?
23. Какая физическая величина называется давлением? Как можно выразить единицу давления (паскаль) через основные единицы?
24. Как можно объяснить давление газа на основе молекулярно-кинетической теории?
25. Что такое «идеальный газ» и для чего вводится это понятие?



## 7.2 Основы кинетической теории газов

### 7.2.1 Уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона-Менделеева)

Уравнение состояния идеального газа связывает макроскопические параметры  $p$ ,  $V$ ,  $T$ , характеризующие состояние любой массы газа.

*Уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона-Менделеева):*

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad \text{или} \quad pV = \nu RT \quad (7.21)$$

Уравнение состояния идеального газа для данной массы газа  $m = const$  при переходе из состояния 1 в состояние 2 можно записать в виде *объединенного газового закона*:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad \text{или} \quad \frac{pV}{T} = const \quad (7.22)$$
$$m = const$$

### 7.2.2 Газовые законы

Газовые законы определяют количественную зависимость между двумя параметрами данной массы газа при фиксированном значении третьего параметра.

*Термодинамические процессы, протекающие при неизменном значении количества вещества и состояния одного физического параметра называются **изопроцессами**.*

- **Закон Бойля-Мариотта (изотермический процесс  $T = const$ ,  $\Delta T = 0$ ,  $m = const$ ).** Из уравнения состояния идеального газа (7.22) видно, что при постоянной температуре ( $T = const$ , ) изменение объёма газа  $V$  влечёт за собой изменение давления  $p$ :

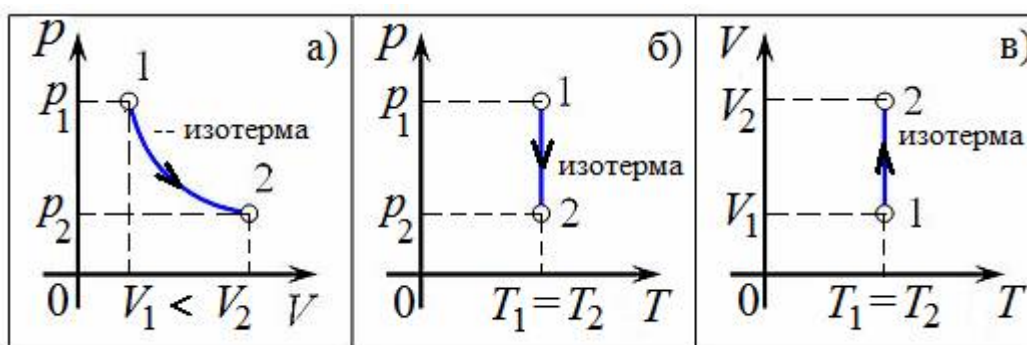
$$pV = const \quad (7.23)$$
$$m = const \quad T = const$$

**Закон Бойля-Мариотта:** для данной массы газа при постоянной температуре произведение объёма газа на давление есть величина постоянная.

Для любых двух состояний газа закон Бойля-Мариотта можно записать в виде

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \text{ или } \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}. \quad (7.24)$$

Графики зависимости между параметрами  $p$ ,  $V$  и  $T$  при постоянной температуре (рис. 7.2).



а) – в координатах  $p, V$  изотерма – гипербола      б) – в координатах  $p, T$  изотерма – прямая линия перпендикулярная оси  $T$   
 в) – в координатах  $V, T$  изотерма – прямая линия перпендикулярная оси  $T$

Рис. 7.2 Графики изотермического сжатия газа ( $V_2 < V_1$ )

**Изотерма** – линия на диаграмме или графике, соединяющая точки с равными значениями температуры  $T = const$ .

Изотермический процесс протекает медленно, так как он обусловлен теплообменом с окружающей средой.

- **Закон Гей-Люссака (изобарический процесс  $p = const$ ,  $\Delta p = 0$ ,  $m = const$ ).** Из уравнения состояния идеального газа (7.22) видно, что при постоянном давлении ( $p = const$ ) изменение температуры газа  $T$  влечёт за собой изменение объёма  $V$ :

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

(7.25)

$$m = const$$

$$p = const$$

**Закон Гей-Люссака.** объём данной массы газа при постоянном давлении прямо пропорционален его абсолютной температуре.

Для любых двух состояний газа закон Гей-Люссака можно записать в виде

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \text{ или } \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (7.26)$$

Закон Гей-Люссака (рис. 7.3) можно представить в виде

$$V = V_0(1 + \beta t), \text{ или } \frac{\Delta V}{V_0} = \beta \Delta T, \quad (7.27)$$

где  $t$  – температура по международной шкале;

$V_0$  – объем при  $0^\circ\text{C}$ ;

$\beta = \frac{1}{273} \text{K}^{-1}$  – коэффициент объемного расширения газа при

постоянном давлении для всех газов.

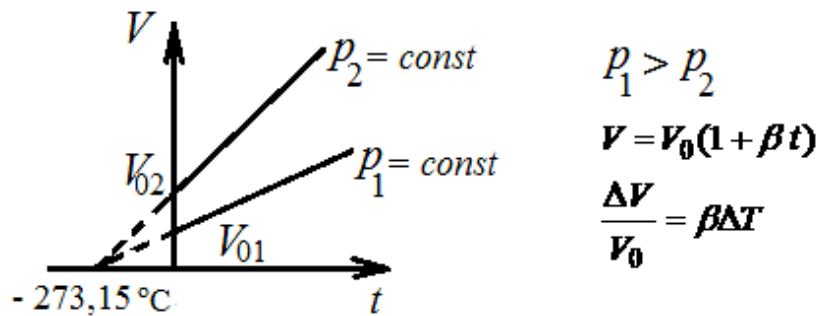
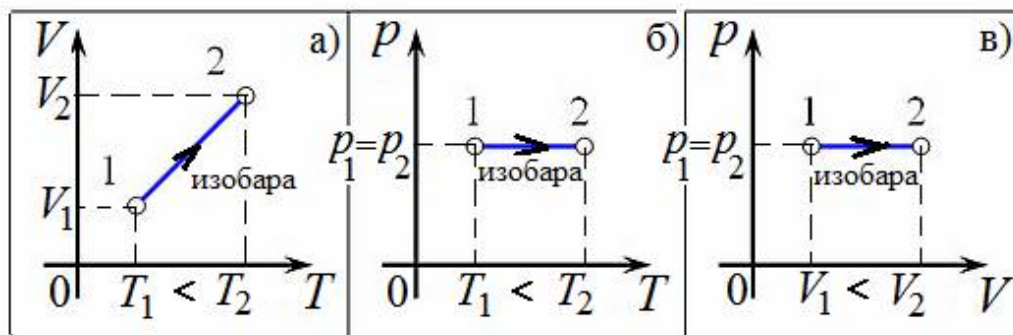


Рис. 7.3

Графики зависимости между параметрами состояния  $p$ ,  $V$  и  $T$  для данной массы газа  $m = \text{const}$  при постоянном давлении  $p = \text{const}$  (рис. 7.4).



а) в координатах  $V, T$   
изобара наклонная  
прямая линия

б) в координатах  $p, T$

изобара - прямая линия, перпендикулярная оси  $p$

в) в координатах  $p, V$

Рис. 7.4 Графики изобарического теплового расширения газа ( $T_2 > T_1$ , и  $V_2 > V_1$ )

**Изобара** – линия на диаграмме или графике, соединяющая точки с равными значениями давления  $p = const$ .

- **Закон Шарля (изохорический процесс  $V = const$ ,  $\Delta V = 0$ ,  $m = const$ ).** Из уравнения состояния идеального газа (7.22) видно, что при постоянном объёме ( $V = const$ ) изменение температуры  $T$  газа влечёт за собой изменение давления  $p$ :

$$\frac{p}{T} = const$$

$$m = const$$

$$V = const$$

(7.28)

**Закон Шарля:** давление данной массы газа при постоянном объёме прямо пропорционально его абсолютной температуре.

Для любых двух состояний газа закон Шарля можно записать в виде

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad \text{или} \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (7.29)$$

Закон Шарля (рис. 7.5) можно представить в виде:

$$p = p_0(1 + \gamma t), \quad \text{или} \quad \frac{\Delta p}{p_0} = \gamma \Delta T, \quad (7.30)$$

где  $p$  – давление газа при температуре  $t$ ;

$p_0$  – давление газа при температуре  $0^\circ\text{C}$ ;

$\gamma = \frac{1}{273} \text{K}^{-1}$  – термический коэффициент давления для всех газов.

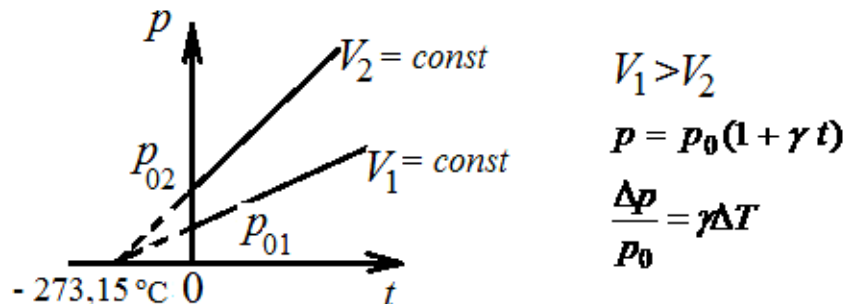
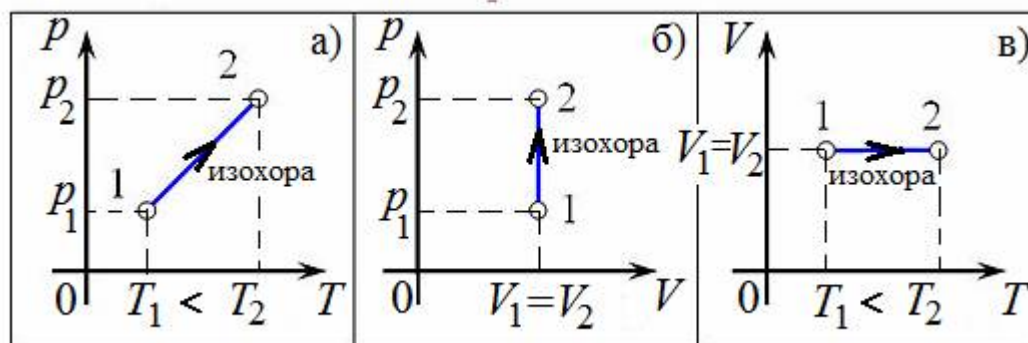


Рис. 7.5

Графики зависимости между параметрами состояния  $p$ ,  $V$  и  $T$  для данной массы газа  $m = const$  при постоянном объеме (рис. 7.6).



а) в координатах  $p, T$   
 изохора наклонная  
 прямая линия

б) в координатах  $p, V$   
 изохора - прямая линия, перпендикулярная оси  $V$

в) в координатах  $V, T$   
 изохора - прямая линия, перпендикулярная оси  $V$

Рис. 7.6 Графики изохорического нагревания газа ( $T_2 > T_1$  и  $p_2 > p_1$ ).

**Изохора** – линия на диаграмме или графике, соединяющая точки с равными значениями объема  $V = const$ .

### 7.2.3 Закон Дальтона

**Закон Дальтона:** давление смеси газов равно сумме парциальных давлений входящих в нее газов:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n. \quad (7.31)$$

**Парциальное давление** – это давление которое оказывал бы газ, занимая данный объем единолично.

**Задача.** При  $10^\circ\text{C}$  газ находится под давлением  $5 \cdot 10^5$  Па. Какое будет давление газа при  $65^\circ\text{C}$ , если его объем не изменяется?

<p><u>Дано:</u>  <math>t_1 = 10^\circ\text{C};</math>  <math>p_1 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па};</math>  <math>t_2 = 65^\circ\text{C}</math>  <math>V_1 = V_2</math></p>	<p><u>Решение</u>                  Из закона Шарля <math>p_1/p_2 = T_1/T_2</math>, где <math>T_1 = 273 + t_1 = 283 \text{ К}</math>,  <math>T_2 = 273 + t_2 = 338 \text{ К}</math>, определим давление газа:  <math>p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1}, \quad p_2 = 5 \cdot 10^5 \frac{338}{283} = 5,97 \cdot 10^5 \text{ Па}.</math></p>
<p><math>p_2 - ?</math></p>	<p>Ответ: <math>p_2 \approx 6 \cdot 10^5 \text{ Па}.</math></p>

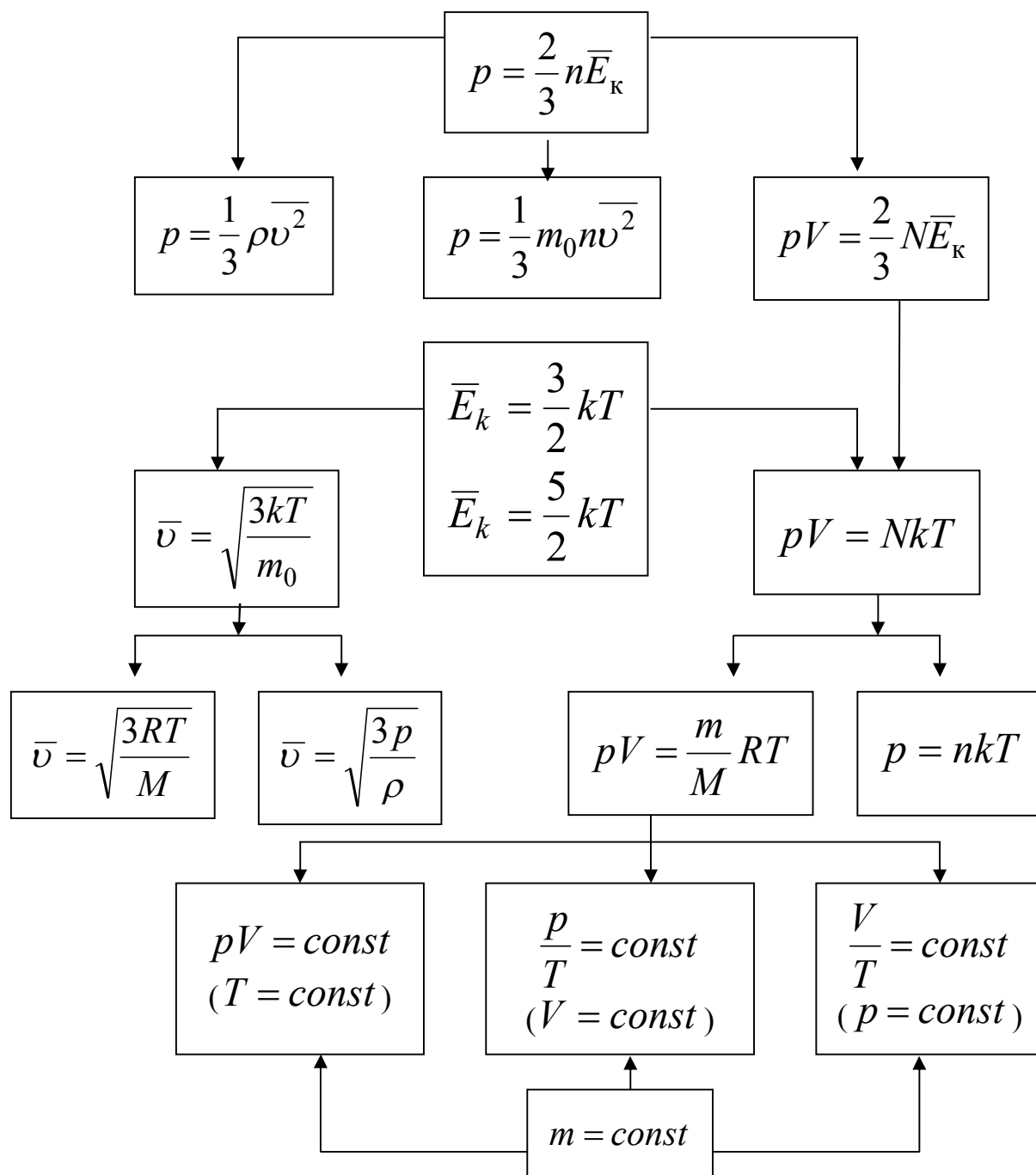


Рис. 7.7 Молекулярно-кинетическая теория идеального газа в формулах

## ***Новые слова, словосочетания, языковые конструкции***

абсолютная температура	коэффициент термический
изобара	макропараметры
изобарный	микропараметры
изопроецесс	объемное расширение
изотерма	парциальное давление
изотермический	прямопропорционально
изохора	расширение
изохорический	сжатие
коэффициент	фиксированный

### **1. Что связывает с чем.**

**Постоянная Больцмана связывает температуру в энергетические единицах с температурой в кельвинах.**

### **2. Что определяется чем.**

**Температура определяется средней кинетической энергией частиц, из которых состоит система.**

## ***Контрольные вопросы***

1. Что такое «идеальный газ» и для чего вводится это понятие?
2. Какие макропараметры связывают уравнение состояние идеального газа (уравнение Клайперона-Менделеева). Напишите это уравнение.
3. Напишите формулу, выражающую объединенный газовый закон (уравнение Клайперона).
4. Какая физическая величина называется давлением? Как можно выразить единицу давления (паскаль) через основные единицы?
5. Как можно объяснить давление газа на основе молекулярно-кинетической теории?
6. Сформулируйте закон Бойля-Мариотта.
7. Сформулируйте закон Гей-Люссака.
8. Сформулируйте закон Шарля.
9. Что показывает термический коэффициент давления?
10. Напишите формулы, выражающие закон Гей-Люссака, если температура выражается: 1) в кельвинах; 2) в градусах Цельсия.
11. Что такое парциальное давление?
12. Сформулируйте закон Дальтона.

### **7.3 Основы термодинамики**

***Термодинамика*** – раздел физики, изучающий общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического

*равновесия.* Термодинамика изучает наиболее общие закономерности превращения энергии, но не рассматривает молекулярное строение вещества.

**Термодинамической системой** называют тело или совокупность тел, в которых происходят процессы, связанные с изменением внутренней энергии.

Это может быть газ, жидкость, твёрдое тело, человеческий организм и т.д. Простейшая термодинамическая система – газ в цилиндре.

Состояние термодинамической системы определяется температурой, объемом, внешним давлением и другими термодинамическими параметрами.

**Изолированной (замкнутой) термодинамической системой** называют систему, у которой отсутствует обмен энергией с внешней средой.

**Термодинамическим равновесием** называют такое состояние системы, в которое изолированная система приходит с течением времени.

В состоянии термодинамического равновесия параметры системы остаются постоянными.

**Термодинамическим процессом** называют переход системы из одного термодинамического состояния в другое.

### 7.3.1 Внутренняя энергия и ее изменение при теплопередаче и совершении работы

**Тепловым движением** называется хаотическое движение атомов и молекул

➤ **Внутренняя энергия ( $U$ )** тела – это сумма кинетических энергий ( $\sum_{i=1}^N E_{ki}$ ) теплового движения всех частиц и потенциальных энергий ( $\sum_{i=1}^N E_{\pi i}$ ) их взаимодействия:

$$U = \sum_{i=1}^N E_{ki} + \sum_{i=1}^N E_{\pi i}, [U] = 1 \text{ Дж}, \quad (7.32)$$

где  $N$  – число частиц.

Известно, что температура ( $T$ ) является мерой средней кинетической энергии теплового движения частиц. Средняя потенциальная энергия взаимодействия частиц зависит от объёма ( $V$ ) вещества (так как при изменении объёма изменяется среднее расстояние между частицами). Следовательно, внутренняя энергия тела зависит от температуры и объёма. Это значит, что внутренняя энергия тел определяется макропараметрами



$(T, V, p)$ , которые характеризуют состояние тел:  $U = f(T, V)$ , или  $U = f(p, T)$ , или  $U = f(p, V)$ .

Внутренняя энергия изменяется при:

- совершении работы над телом или самим телом;
- теплопередаче.

**Внутренняя энергия идеального газа.** Идеальный газ является термодинамической системой. Так как молекулы идеального газа не взаимодействуют друг с другом, то их потенциальную энергию можно считать равной нулю  $\sum_{i=1}^N E_{\text{пi}} = 0$ .

Тогда внутренняя энергия идеального газа равна сумме кинетических энергий теплового движения молекул:

$$U = E_{\kappa 1} + E_{\kappa 2} + E_{\kappa 3} + \dots + E_{\kappa N} = \sum_{i=1}^N E_{\kappa i}, \quad (7.33)$$

где  $N$  – число молекул.

Средняя кинетическая энергия молекул идеального газа определяется выражением  $\overline{E_k} = \frac{i}{2} kT$ . Если газ содержит  $N$  молекул, то их общая энергия:

$$\boxed{U = \frac{i}{2} kT N} \text{ или } \boxed{U = \frac{i}{2} kT \frac{m}{M} N_A = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT}, \quad (7.34)$$

где  $m$  – масса газа;

$M$  – молярная масса этого газа;

$k$  – постоянная Больцмана;

$N_A$  – число Авогадро;

$R = k \cdot N_A$  – универсальная газовая постоянная.

$i$  – число степеней свободы;

$i = 3$  – для одноатомных газов;

$i = 5$  – для двухатомных газов.

Изменение внутренней энергии идеального газа в термодинамическом процессе определяется только изменением его температуры и не зависит от характера этого процесса:

$$\boxed{\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{i}{2} N \cdot k(T_2 - T_1)}. \quad (7.35)$$

➤ **Работа идеального газа. Ее геометрическое истолкование.**

Термодинамическая работа совершается телами при изменении их объема.

Поскольку твердые и жидкие тела при нагревании расширяются незначительно, то незначительна и совершаемая ими термодинамическая работа. Они могут совершать механическую работу. Работу в

термодинамике может совершать только газ, значительно изменяющий свой объем при нагревании (охлаждении).

При совершении работы внутренняя энергия системы может изменяться. Представим цилиндр с подвижным поршнем, заполненный газом под давлением  $p$  (рис. 7.8):

а) Сжатый газ действует на поршень площадью  $S$  с силой давления  $F = p \cdot S$ . Будем считать, что при медленном перемещении поршня на расстояние  $\Delta h$  газ начнёт изобарически расширяться (объём  $V_2 > V_1$ ). Расширяясь, газ совершает положительную работу  $A'$  (рис. 7.8, а):

$$A' = F \cdot \Delta h = p \cdot S \cdot \Delta h = p \cdot \Delta V = p \cdot (V_2 - V_1) > 0, \quad (7.36)$$

а его внутренняя энергия уменьшается ( $\Delta U < 0$ ), так как газ передаёт энергию окружающим телам:  $A' = -\Delta U$ .

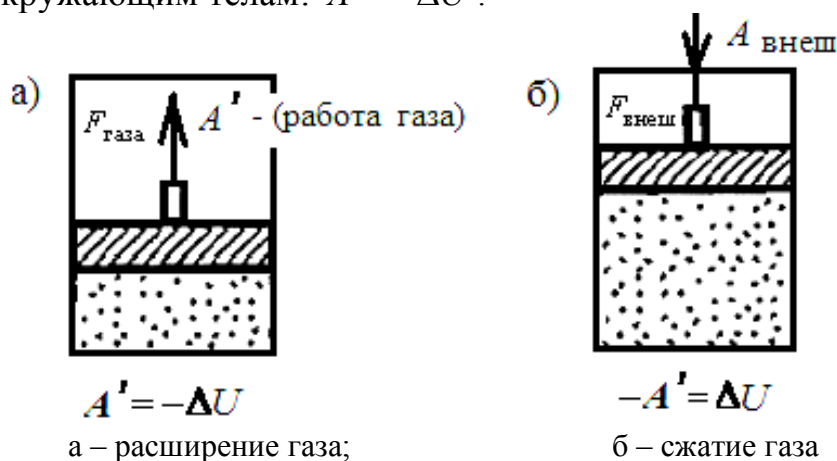


Рис. 7.8

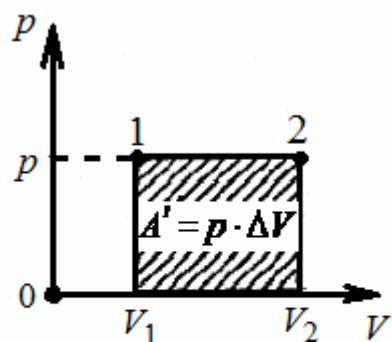


Рис. 7.9 График расширения газа в координатах  $p, V$

Видно (рис. 7.9), что работа газа численно равна площади фигуры под графиком.

б) Наоборот, пусть внешние силы сжимают газ (рис, 7.8, б). Тогда работа газа отрицательна ( $A' < 0$ ). Совершая над газом работу ( $A_{\text{внеш}} = -A'$ ), внешние силы передают газу энергию, и его внутренняя энергия увеличивается ( $\Delta U > 0$ ):  $-A' = \Delta U$ .

Чтобы газ при изобарном расширении совершил положительную работу, он должен нагреваться ( $T_2 > T_1$ ).

Это легко показать на примере идеального газа из уравнения Клапейрона-Менделеева:

$$pV = \frac{m}{M}RT, \quad (7.37)$$

$$V = \frac{m}{M} \cdot \frac{RT}{p}. \quad (7.38)$$

$$\Delta V = V_2 - V_1 = \frac{m}{M} \cdot \frac{R}{p} T_2 - \frac{m}{M} \cdot \frac{R}{p} T_1 = \frac{m}{M} \cdot \frac{R}{p} \cdot (T_2 - T_1). \quad (7.39)$$

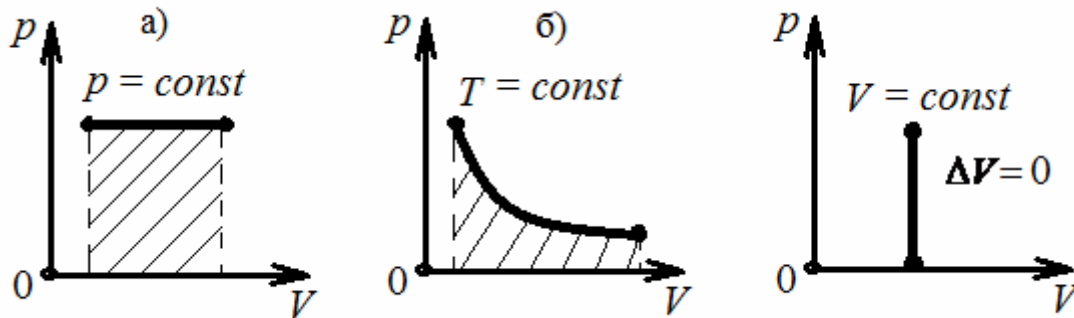
Поэтому работу **изобарического процесса для идеального газа** можно выразить так:

$$A' = p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M}RT(T_2 - T_1). \quad (7.40)$$

**Работа идеального газа при изотермическом процессе:**

$$A' = \frac{m}{M}RT \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (7.41)$$

**Геометрическое истолкование работы газа.** Работа газа численно равна площади фигуры, ограниченной графиком зависимости  $p$  от  $V$ , осью  $V$  и ординатами начального и конечного состояния (рис. 7.10).



а – изобарный процесс; б – изотермический процесс; в – изохорический процесс

Рис. 7.10



Рис. 7.11

**Теплопередача и ее виды.** Теплопередачей или теплообменом называется процесс передачи энергии от одного тела к другому без совершения работы.

Существует три способа теплопередачи:

- 1) теплопроводность,
- 2) конвекция,
- 3) излучение.

**Теплопроводность** – вид теплопередачи, при которой передача внутренней энергии от одних тел к другим происходит при их соприкосновении и обусловлена взаимодействием атомов и молекул.

**Конвекция** – вид теплопередачи, при котором внутренняя энергия от одних тел к другим передается движущимися струями жидкости или газа (рис. 7.11). Конвекция приводит к возникновению ветра (бриза) на берегу моря.

**Излучение** – теплообмен обусловлен передачей энергии световым потоком (инфракрасная область шкалы электромагнитных волн).

➤ **Количество теплоты. Уравнение теплового баланса. Удельная теплоемкость вещества.**

Мера изменения внутренней энергии в процессе теплопередачи называется **количеством теплоты**  $[Q] = \text{Дж}$ .

При теплообмене не происходит превращение энергии из одной формы в другую: часть внутренней энергии горячего тела передается холодному и теплообмен прекращается при выравнивании их температур.

Теплообмен в замкнутой системе описывается **уравнением теплового баланса**:

$$\boxed{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0, \quad \sum Q_{\text{пол}} = \sum Q_{\text{отд}}} \quad (7.42)$$

где  $\sum Q_{\text{пол}}$  – суммарное количество теплоты, полученное телом при теплообмене;

$\sum Q_{\text{отд}}$  – суммарное количество теплоты, отданное телом при теплообмене.

Формулы количества теплоты для процессов нагревания и охлаждения:

$$\boxed{Q = c \cdot m \cdot \Delta T, \quad Q = C \cdot \Delta T}, \quad \text{или} \quad (7.43)$$

$$\boxed{Q = c \cdot m \cdot \Delta t, \quad Q = C \cdot \Delta t},$$

где  $T$  – температура по термодинамической шкале;

$t$  – температура по шкале Цельсия ( $T \text{ К} = t^\circ\text{С} + 273^\circ\text{С}$ ;  $\Delta T \text{ К} = \Delta t^\circ\text{С}$ );

$c$  – **удельная теплоёмкость вещества**, то есть количество теплоты, необходимое для нагревания единицы массы вещества на 1 К или на  $1^\circ\text{С}$ :

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}, \quad [c] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (7.44)$$

$C = cm$  – **теплоёмкость тела**, то есть количество теплоты, необходимое для нагревания тела массой  $m$  на 1 К или на  $1^\circ\text{С}$ :

$$C = \frac{Q}{m}, \quad [C] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}. \quad (7.45)$$

Количество теплоты, необходимое для нагревания тела и выделяемое при его остывании, рассчитывается по формулам:

для нагревания ( $t_2 > t_1$ ):

$$Q = c \cdot m \cdot (t_2 - t_1); \quad Q = C \cdot (t_2 - t_1); \quad (7.46)$$

для охлаждения ( $t_2 < t_1$ ):

$$Q = c \cdot m \cdot (t_1 - t_2); \quad Q = C \cdot (t_1 - t_2). \quad (7.47)$$

Жидкие нетвердые вещества расширяются при нагревании незначительно, их удельные теплоемкости при постоянном давлении остаются постоянными и находятся по таблицам.

Если нагревать газ при постоянном объеме, его молярную теплоемкость ( $C_V$ ) и удельную теплоемкость ( $c_V$ ) можно рассчитать по формулам:

$$C_V = \frac{iR}{2}, \quad (7.48)$$

$$c_V = \frac{C_V}{M} = \frac{iR}{2M} \quad (7.49)$$

где  $M$  – молярная масса вещества.

Если нагревать газ при постоянном давлении, его молярную теплоемкость ( $C_p$ ) и удельную теплоемкость ( $c_p$ ) можно рассчитать по формулам:

$$C_p = C_V + R = \frac{(i+2)}{2} R, \quad (7.50)$$

$$c_p = \frac{(i+2)R}{2M}. \quad (7.51)$$

Для одноатомного газа  $i = 3$ , двухатомного  $i = 5$ , трех- и более атомных газов  $i = 6$ .

**Молярная теплоемкость вещества** – величина, определяемая количеством теплоты, необходимым для нагревания 1 моля вещества на 1 К.

**Единица молярной теплоемкости** – «джоуль на моль-кельвин»:

$$[C] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}. \quad (7.52)$$

### Интересные факты!

$$c_{\text{воды}} = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad c_{\text{льда}} = 2100 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad c_{\text{свинца}} = 140 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$
$$c_{\text{крови человека}} = 3900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad c_{\text{воздуха}} = 1000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \text{ при } p = \text{const.}$$

➤ **Удельная теплота сгорания топлива. КПД нагревателя.**  
**Удельной теплотой сгорания топлива** ( $q$ ) называется величина, измеряемая количеством теплоты, которое выделяется при полном сгорании 1 кг топлива:

$$q = \frac{Q}{m}, \quad [q] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}. \quad (7.53)$$

Устройства, в которых происходит сгорание топлива, называются **нагревателями**. Это печи, топки и горелки различной конструкции или камеры сгорания в тепловых машинах.

Всегда при сгорании топлива в системе выделяется больше теплоты ( $Q$ ), чем используется в полезных целях ( $Q_{\text{п}}$ ), так как есть потери теплоты ( $\Delta Q$ ):

$$Q > Q_{\text{п}}, \quad Q = Q_{\text{п}} + \Delta Q. \quad (7.54)$$

Отношение количества полезной теплоты  $Q_{\text{п}}$  к количеству теплоты  $Q$ , выделенному при полном сгорании топлива, называется **коэффициентом полезного действия (КПД) нагревателя**:

$$\eta = \frac{Q_{\text{п}}}{Q} \quad \text{или} \quad \eta = \frac{Q_{\text{п}}}{Q} \cdot 100\%. \quad (7.55)$$

Видно, что всегда:

$$\eta = \frac{Q_{\text{п}}}{Q} = \frac{Q - \Delta Q}{Q} = 1 - \frac{\Delta Q}{Q} < 1, \quad (7.56)$$

так как потери энергии  $\Delta Q \neq 0$ .

### Интересные факты!

$$q_{\text{бензина}} = 46 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}; \quad q_{\text{дерева}} = 10 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}};$$
$$q_{\text{дизельного топлива}} = 42 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}; \quad q_{\text{пороха}} = 3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

## 7.3.2 Первый закон термодинамики. Адиабатический процесс

Закон сохранения и превращения энергии распространенный на тепловые явления, называется **первым законом термодинамики**

**Первый закон термодинамики:** изменение внутренней энергии  $\Delta U$  системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил  $A$  и количества теплоты  $Q$  переданного системе:

$$\Delta U = Q + A. \quad (7.57)$$

Для системы, которая сама совершает работу  $A'$  над внешними телами:

**Первый закон термодинамики:** количество теплоты  $Q$ , переданное системе, идет на изменение ее внутренней энергии  $\Delta U$  и на совершение системой работы  $A'$ , над внешними телами:

$$Q = \Delta U + A'. \quad (7.58)$$

**Адиабатический процесс** – процесс в теплоизолированной системе (рис. 7.12, а):

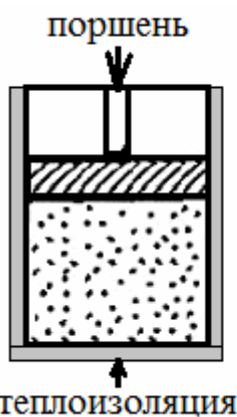
$$Q = 0. \quad (7.59)$$

**Уравнение Пуассона** для адиабатического процесса в идеальном газе:

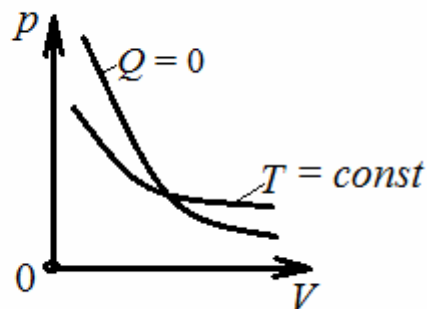
$$pV^\nu = const, \quad (7.60)$$

где  $(\nu)$  отношение молярных (или удельных) теплоемкостей газа при постоянных давлении и объеме:

$$\nu = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i + 2}{i}. \quad (7.61)$$



а) теплоизолированная система  
 $Q = 0$



б) диаграмма адиабатического процесса в координатах  $p, V$

Рис. 7.12

Адиабата ( $pV^\gamma = const$ ) располагается более круто, чем изотерма ( $T = const, pV = const$ ) (рис. 7.12, б). Это объясняется тем, что при адиабатическом сжатии увеличение давления газа обусловлено не только уменьшением его объема, как при изотермическом сжатии, но и повышением температуры. При адиабатическом расширении температура понижается ( $\Delta U = -A'$ ), при сжатии – повышается ( $\Delta U = A$ ).

Поскольку идеальной теплоизолирующей оболочки быть не может, адиабатический процесс в природе может быть только быстро протекающим:  $Q \rightarrow 0$  (теплопередача - процесс очень медленный).

Таблица 7.1 Применение I закона термодинамики к различным изопроцессам в газе

Изотермический $T = const,$ $m = const$	Изохорический $V = const,$ $m = const$	Изобарический $p = const,$ $m = const$	Адиабатический $Q = 0$
$\Delta T = 0$	$\Delta V = 0$	$\Delta p = 0$	$Q = 0$
$\Delta U = 0$	$A' = 0$	$Q = \Delta U + A'$	$\Delta U + A' = 0$
$Q = A'$	$Q = \Delta U$		$\Delta U = -A'$
			$\Delta U = A$

### 7.3.3 Второй закон термодинамики

#### **Второй закон (второе начало) термодинамики:**

- *Невозможно осуществить такой периодический процесс, единственным следствием которого было бы полное превращение в работу теплоты, получаемой от нагревателя (формулировка Кельвина).*
- *Невозможен процесс, единственным результатом которого является передача энергии в форме теплоты от менее нагретого тела к более нагретому (формулировка Клаузиуса).*
- *Вечный двигатель второго рода невозможен, т. е. двигатель. КПД которого равен 100 % превращения теплоты в работу (формулировка Карно).*
- *В циклически действующем тепловом двигателе невозможно преобразовать все количество теплоты, полученное от нагревателя, в механическую работу.*



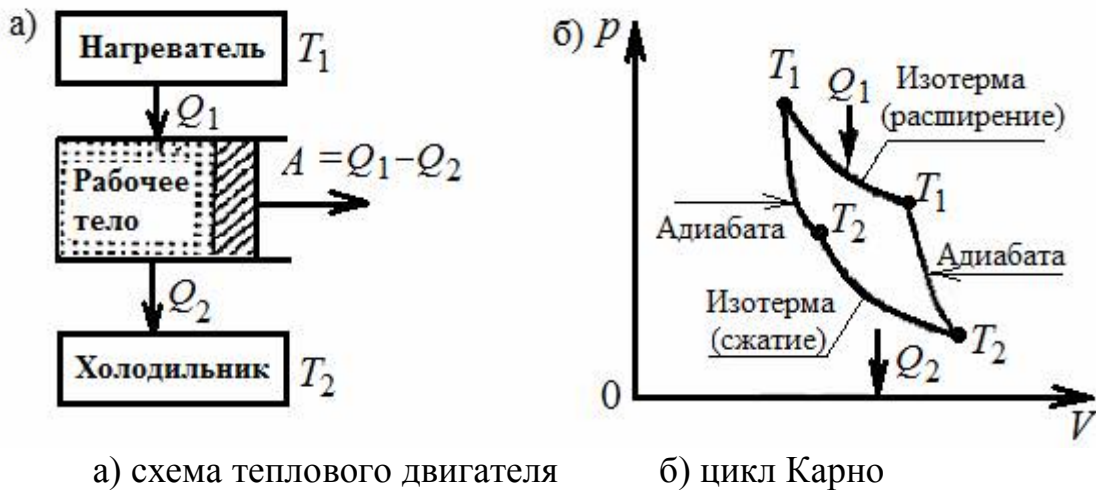


Рис. 7.13 Тепловые двигатели

**Тепловой двигатель** – машина, превращающая внутреннюю энергию топлива в механическую. Тепловой двигатель должен работать циклически; после расширения газа следует сжатие.

Три основные части теплового двигателя (рис. 7.13, а):

- 1) нагреватель ( $T_1$ ) — источник внутренней энергии;
- 2) рабочее тело (газ или пар), производящее механическую работу за счет внутренней энергии, полученной от нагревателя;
- 3) холодильник ( $T_2 < T_1$ ), обеспечивающий естественный процесс передачи тепла от более нагретого тела к более холодному, чем обеспечивает компенсацию процесса превращения тепловой энергии в механическую. Холодильником может служить окружающая среда (двигатель: внутреннего сгорания).

**Цикл Карно** – схема идеальной тепловой машины (с наивысшим КПД) (рис. 7.13, б).

Совершаемая газом работа полностью происходит за счет количества теплоты, отдаваемой нагревателем. При сжатии газа работа внешних сил полностью превращается в теплоту, отдаваемую холодильнику.

**Термодинамический (термический) КПД теплового двигателя:**

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \quad (7.62)$$

где  $Q_1 - Q_2 = A_{\text{рабочего тела}}$ .

**Теорема Карно:** термический КПД цикла Карно не зависит от природы рабочего тела и является только функцией температур нагревателя ( $T_1$ ) и холодильника ( $T_2$ ):

$$\eta_{\text{и}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (7.63)$$

КПД реальных тепловых машин меньше КПД идеальной машины  $\eta_{и}$ . В реальной тепловой машине всегда имеют место потери на нагревание, на механическую работу в механизме машины, полезная работа меньше работы рабочего тела:

$$A_{п} < Q_1 - Q_2. \quad (7.64)$$

**Экономический КПД тепловой машины** – это отношение полезной работы двигателя ( $A_{п} = Nt$ ) к количеству теплоты, выделенной при сгорании топлива ( $Q = qm$ ):

$$\eta_{эк} = \frac{A_{п}}{qm}. \quad (7.65)$$

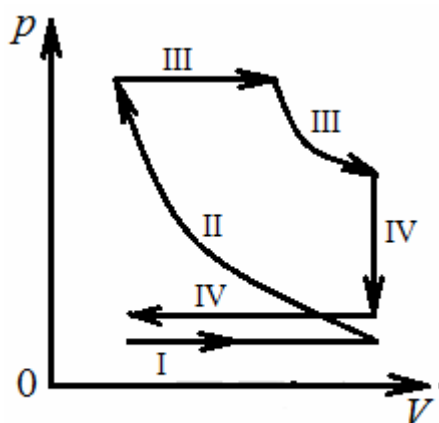


Рис. 7.14

#### Виды тепловых машин:

1. Паровая и газовая турбины.
2. Паровые машины.
3. Поршневые двигатели внутреннего сгорания:
  - а) карбюраторные. (бензиновые),
  - б) дизели.
4. Беспоршневые двигатели внутреннего сгорания (реактивные двигатели).

КПД современных дизелей достигает 40%. В дизельном двигателе сжимается воздух что, допускает большую степень сжатия (II такт). Через форсунку впрыскивается горючее, самовоспламеняется и сгорает, а затем газы сгорания расширяются (III такт), происходят выхлоп (IV такт) и всасывание (I такт) (рис. 7.14).

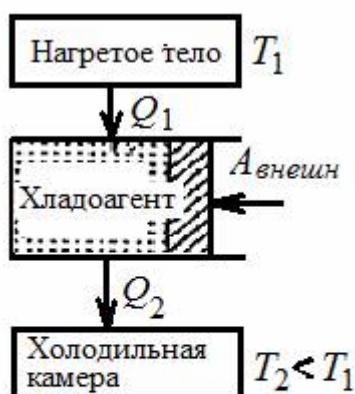


Рис. 7.15 Схема холодильной установки

**Холодильная установка** – машина, поддерживающая в холодильной камере температуру, более низкую, чем в окружающей среде.

Различают установки абсорбционные и парокомпрессионные. В абсорбционных холодильных машинах эффект Охлаждения получается в результате физико-химического процесса (эндотермической химической реакции). В парокомпрессионной холодильной машине осуществляется переход теплоты от более холодного тела к менее холодному благодаря компенсирующему процессу

превращения механической энергии во внутреннюю энергию нагревателя. Рабочее тело при сжатии передает некоторое количество теплоты  $Q_1 = A_{сж}$  в окружающую среду, а при расширении забирает у холодильной камеры теплоту  $Q_2 = A_{расшир}$  (рис. 7.15):

$$A_{сж} > A_{расшир}, \quad (7.66)$$

$$A_{внешн} = A_{сж} - A_{расшир}.$$

**Холодильный коэффициент:**

$$k = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}. \quad (7.67)$$

**Задача.** В нагревателе паровой турбины расходуется 0,35 кг дизельного топлива на каждый 1 кВт·ч полезной энергии. Температура поступающего в турбину пара 25°C, температура охладителя 30°C. Вычислить фактический КПД турбины и сравнить его с КПД идеальной тепловой машины, работающей при тех же температурах.

Дано:

$$m_T = 0,35 \text{ кг};$$

$$q = 4,2 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг};$$

$$Q_n = 1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж};$$

$$T_1 = 273 + 250 = 523 \text{ К};$$

$$T_2 = 273 + 30 = 303 \text{ К}.$$

$$\eta_{\text{факт}} - ?$$

$$\eta_{\text{идеал}} - ?$$

Решение

При полном сгорании топлива получается тепловая энергия (затраченная энергия):  $Q = q \cdot m_T$ . Так как происходят потери энергии, то только часть этой энергии  $Q \cdot \eta_{\text{факт}}$  превращается в полезную энергию  $Q_n$ :  $Q_n = Q \cdot \eta_{\text{факт}}$ .

Откуда фактическое значение КПД турбины равно:

$$\eta_{\text{факт}} = \frac{Q_n}{Q} = \frac{Q_n}{q \cdot m_T}.$$

КПД идеальной тепловой машины определяем через абсолютные температуры нагревателя  $T_1$  и охладителя

$$T_2 : \eta_{\text{идеал}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

$$\text{Вычисляем: } \eta_{\text{факт}} = \frac{3,6 \cdot 10^6}{4,2 \cdot 10^7 \cdot 0,35} = 0,245, (24,5\%);$$

$$\eta_{\text{идеал}} = 1 - \frac{303}{523} = 1 - 0,58 = 0,42, (42\%).$$

Ответ:  $\eta_{\text{факт}} = 24,5\%$ ,  $\eta_{\text{идеал}} = 42\%$ .

## ***Новые слова, словосочетания, языковые конструкции***

абсорбция	микроскопическая система
адиабата	молярная теплоемкость
адиабатический процесс	нагреватель
аморфный	парокомпрессионный
внутренний	плазменный
вплотную	площадь фигуры
высокотемпературный	полезная работа
газообразный	рабочее тело
двигатель бензиновый	равновесие
двигатель поршневой	тепловое движение
двигатель тепловой	теплоемкость тела
дизель	теплоемкость удельная
жидкость	тепловой баланс
излучение	теплопередача
инфракрасные	термодинамика
ионизированный газ	термодинамический процесс
инфракрасные	термодинамическое равновесие
истолкование	термодинамическая система
источник энергии	удельная теплота сгорания
колебательное движение	форсунка
количество теплоты	характер процесс
конвекция	холодильная установка
контакт	холодильник
кристаллический	цикл
машина паровая	шкала
машина тепловая	

### **1. Что является мерой чего.**

Температура является мерой средней кинетической энергии *теплого* движения частиц ( $E_{KN}$ ) и потенциальной энергий ( $E_{ПН}$ ) их взаимодействия.

### **2. Что совершается когда.**

Термодинамическая работа совершается *телами* при изменении их объема.

### **3. Что может изменяться когда.**

Внутренняя энергия *системы* может изменяться при совершении работы.

## ***Контрольные вопросы***

1. Что изучает термодинамика?
2. Что такое термодинамическая система?

3. Какую термодинамическую систему называют изолированной (замкнутой)?
4. Что такое термодинамическое равновесие?
5. Что такое термодинамический процесс?
6. Что такое внутренняя энергия тела?
7. Чему равна внутренняя энергия идеального газа?
8. Чем определяется изменение внутренней энергии идеального газа?
9. Какие существуют способы изменения внутренней энергии тела?
10. В каких процессах изменяется кинетическая энергия молекул тела?
11. В каких процессах изменяется потенциальная энергия молекул тела?
12. Чему равна работа газа при его изобарном расширении?
13. Когда работа газа положительная? Когда отрицательная?
14. Как изменяется внутренняя энергия газа при его расширении? сжатии?
15. Что такое количество теплоты?
16. Когда происходит теплопередача?
17. Какие вы знаете виды теплопередачи?
18. Когда наступает тепловое равновесие?
19. От чего зависит количество теплоты, которым система обменивается с внешними телами?
20. От чего зависит теплоемкость тела? Что показывает удельная теплоемкость?
21. Что называют уравнением теплового баланса? В чем физический смысл теплового баланса?
22. Может ли все тепло, выделяемое при сгорании топлива, использоваться для полезного нагревания? Почему?
23. Почему КПД нагревателя не может быть равен единице (или 100%)?
24. Что такое адиабатический процесс?
25. Сформулируйте закон сохранения и превращения энергии (Первый закон термодинамики).
26. Сформулируйте второй закон термодинамики.
27. Объясните принцип действия теплового двигателя.
28. Почему тепловой двигатель не может работать без охладителя?
29. Почему в полезную работу не может быть превращено все полученное газом количество теплоты?
30. От чего зависит КПД теплового двигателя?
31. Чему равна полезная работа идеального теплового двигателя?
32. Что такое коэффициент полезного действия (КПД) теплового двигателя?
33. Напишите формулу для вычисления термического КПД теплового двигателя (цикл Карно)?
34. Почему КПД идеального теплового двигателя меньше единицы?
35. Чему равен экономический КПД тепловой машины?
36. Объясните принцип действия холодильной установки.

## 8 АГРЕГАТНОЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА. СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА В РАЗЛИЧНЫХ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЯХ

### 8.1 Агрегатные состояния вещества

Каждое вещество в природе может находиться в четырёх агрегатных состояниях: *твёрдом, жидком, газообразном и плазменном.*

Твёрдые вещества могут быть двух видов: *кристаллические и аморфные.*

В разных состояниях вещество имеет разное строение и разный характер движения молекул (частиц).

*Молекулы (атомы или ионы) **твёрдых тел** находятся в близком контакте друг с другом, поэтому между ними существуют значительные силы взаимодействия.* Благодаря этим силам они не могут свободно перемещаться, и всё твёрдое в целом, сохраняет постоянную форму и объём.

В твёрдых телах частицы совершают хаотическое колебательное движение около положений равновесия.

*Молекулы **жидкости** находятся почти вплотную друг к другу.* Вот почему жидкость трудно сжать (она сохраняет объём) и жидкость передаёт давление в любом направлении (закон Паскаля). Но молекулы жидкости не так сильно связаны между собой, как молекулы твёрдого тела. Под действием внешней силы, например силы тяжести, молекулы жидкости могут переходить в направлении действия силы. Вот почему жидкость течёт и принимает форму сосуда, в котором она находится.

*В жидкостях частицы совершают хаотическое колебательное движение около положений равновесия и прямолинейное перемещение в новые положения равновесия.*

*В **газах** среднее расстояние между молекулами (атомами) достаточно большое по сравнению с размерами молекул.* Силы молекулярного взаимодействия на таких расстояниях практически не действуют. Вот почему газы легко сжимаются и расширяются и не сохраняют форму и объём.

*В газах частицы движутся прямолинейно и хаотически до столкновения с другими частицами или со стенками сосуда.*

***Плазменное состояние**, или **плазма**, представляет собой ионизированный газ, состоящий из электронов и ионов.* Высокотемпературная плазма в природе содержится в недрах Солнца и горячих звёзд.

## 8.2 Тепловое расширение твердых и жидких тел

**График зависимости потенциальной энергии взаимодействия простейших молекул от расстояния между ними (потенциальная яма).**

В жидкостях и твердых телах при повышении температуры увеличивается амплитуда колебательного движения молекул около положения, соответствующего минимуму потенциальной энергии взаимодействия между ними (дну потенциальной ямы). Поскольку потенциальная кривая несимметрична, переход молекул на более высокий энергетический уровень приводит не только к возрастанию амплитуды, но и к увеличению среднего расстояния между молекулами: происходит смещение центра колебаний молекулы. Поэтому и жидкости, и твердые тела расширяются при повышении их температур (рис. 8.1).

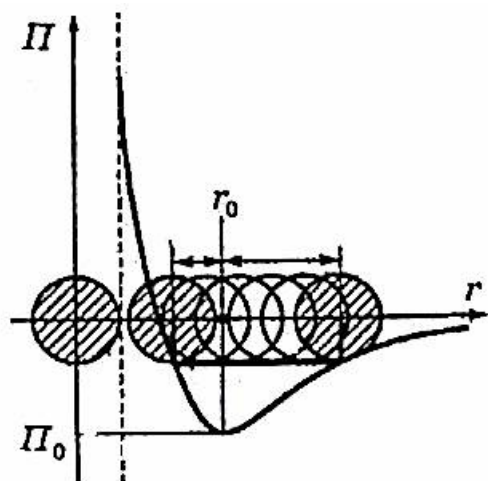


Рис. 8.1

**Линейное и объемное расширение твердых и жидких тел.**

**Линейное расширение:**

$$l = l_0(1 + \alpha t), \quad (8.1)$$

где  $l_0$  — длина тела при температуре  $0^\circ\text{C}$ ;

$l$  — длина тела температуре  $t$ ;

$\alpha$  — коэффициент линейного расширения;

$[\alpha] = \text{K}^{-1}$ .

$$\alpha_{\text{воды}} \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}; \quad \alpha_{\text{эфира}} \approx 16 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}.$$

**Объемное расширение:**

$$V = V_0(1 + \beta t), \quad (8.2)$$

где  $V_0$  — объем тела при температуре  $0^\circ\text{C}$ ;  $V$  — объем тела при температуре  $t$ ;  $\beta$  — коэффициент объемного расширения;  $[\beta] = \text{K}^{-1}$ .

Связь между коэффициентами объемного и линейного расширения для твердых тел:

$$\beta_{\text{т.т.}} \approx 3\alpha. \quad (8.3)$$

**Особенности теплового расширения воды.** Вода при нагревании от  $0$  до  $4^\circ\text{C}$  уменьшается в объеме (её плотность максимальна при  $4^\circ\text{C}$ ). Дальнейшее нагревание воды приводит к увеличению ее объема.

Другой особенностью воды является уменьшение ее плотности при замерзании, вследствие чего лед плавает на поверхности воды. Эти особенности связаны с тем, что в твердом состоянии кристаллическая структура имеет менее плотную упаковку, чем в жидком. А максимум плотности упаковки молекул воды достигается при 4°C.

Особенность теплового расширения воды имеет важное значение для сохранения живых организмов в водоемах зимой. Охлаждаемые воздухом верхние слои воды опускаются вниз, а теплые поднимаются вверх. Такое перемешивание воды происходит до тех пор, пока температура воды не опустится до 4°C. При дальнейшем охлаждении верхние слои не опускаются и при 0°C сверху образуется лед, плавающий на поверхности и предохраняющий водоем от полного промерзания.

### 8.3 Фазовые переходы

*Изменение агрегатного состояния вещества называется **фазовым переходом**.*

*Все фазовые переходы — это **термодинамические процессы**.* Таких фазовых переходов можно указать шесть (рис. 8.2):

- 1) переход вещества из твёрдого состояния в жидкое – **плавление**;
- 2) переход вещества из жидкого состояния в твёрдое – **отвердевание** (ясно, что отвердевание – это процесс, обратный плавлению);
- 3) переход вещества из жидкого состояния в газообразное – **парообразование**;
- 4) переход вещества из газообразного состояния в жидкое – **конденсация** (процесс, обратный парообразованию);
- 5) переход вещества из твёрдого состояния в газообразное – **сублимация** (или возгонка);
- 6) переход вещества из газообразного состояния в твёрдое – **кристаллизация** (процесс, обратный сублимации).

Во время фазового перехода изменяется объём тела (тепловое расширение) и его внутренняя энергия, так как при этом изменяется расположение молекул и расстояние между ними, а значит, и их потенциальная энергия взаимодействия. Наименьшим запасом потенциальной энергии обладают молекулы твёрдого тела, так как расстояние между молекулами *минимальное*. Поэтому в прямых фазовых переходах внутренняя энергия вещества увеличивается, в обратных фазовых переходах – уменьшается (на величину теплоты фазового перехода  $Q_{\text{фаз}} = \Delta U$ ):  $U_{\text{твёрд}} < U_{\text{жидк}} < U_{\text{пар}}$ .



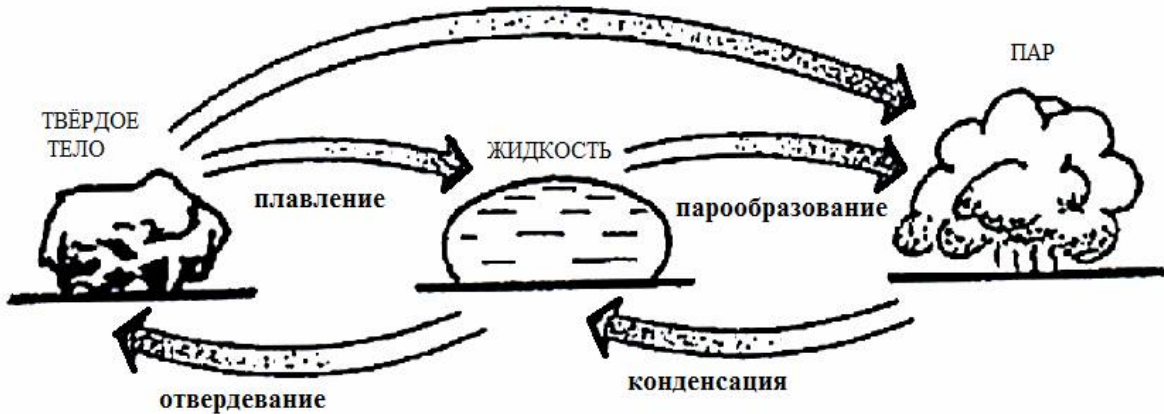


Рис. 8.2 Фазовые переходы

Фазовые переходы происходят только при определённых условиях, то есть при определённых значениях давления  $p_{\text{фаз}}$  и температуры  $T_{\text{фаз}}$ . Зависимости  $p_{\text{фаз}} = f(T_{\text{фаз}})$  разделяются экспериментально.

Во время фазового перехода средняя кинетическая энергия молекул не изменяется, поэтому температура вещества остаётся постоянной (при определенном давлении):  $T_{\text{фаз}} = \text{const}$ .

**Теплота фазовых переходов.** Прямые процессы происходят при подводе теплоты ( $Q > 0$ ), обратные процессы – при отводе теплоты ( $Q < 0$ ).

Количество теплоты, которое идёт на превращение определённой массы  $m$  вещества из одной фазы в другую, называется **теплотой фазового перехода**:

$$Q_{\text{фаз}} = q_{\text{фаз}} \cdot m, \quad (8.4)$$

где  $q_{\text{фаз}}$  - **удельная теплота фазового перехода**, которая зависит от природы вещества и определяется экспериментально (её значения даются в справочниках):

$$q_{\text{фаз}} = \frac{Q_{\text{фаз}}}{m}, \quad [q_{\text{фаз}}] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}. \quad (8.5)$$

➤ **Для плавления** (и отвердевания):

$q_{\text{фаз}} = \lambda$  – удельная теплота плавления;

$Q_{\text{пл}} = \lambda \cdot m$  – при температуре плавления  $T_{\text{пл}} = \text{const}$  (для кристаллических тел).

➤ **Для парообразования** (и конденсации):

$q_{\text{фаз}} = L$  – удельная теплота парообразования;

$Q_{\text{кип}} = L \cdot m$  – при температуре кипения  $T_{\text{кип}} = \text{const}$ .

Отметим следующее:

- 1) аморфные тела (смола, стекло и др.) не имеют определённой температуры плавления и отвердевания. Это связано с тем, что в твёрдом состоянии частицы аморфных тел расположены в беспорядке. Поэтому при плавлении нет резкого перехода от упорядоченного расположения атомов к беспорядочному, как это наблюдается при плавлении кристаллических тел;
- 2) переход из жидкой фазы в газообразную может происходить различными процессами:

**Испарение** — это парообразование, которое происходит только со свободной поверхности жидкости (при любой температуре).

**Кипение** – это парообразование, которое происходит в объёме всей жидкости (при постоянной температуре  $T_{\text{кип}}$ ).

**Составление теплового баланса при фазовых переходах.** Вид уравнения теплового баланса зависит от конкретного вида теплообмена. Рассмотрим пример превращения определённой массы  $m$  твёрдого вещества в газообразное состояние. Во всех фазовых переходах происходит теплообмен между нагревателем и системой. Поэтому в общем виде суммарное количество теплоты  $\sum Q$  идёт и на нагревание системы, и на фазовые переходы:

$$\sum Q = \underbrace{c_1 \cdot m \cdot \Delta T}_{\text{нагревание (твёрдого тела)}} + \underbrace{\lambda \cdot m}_{\text{фазовый переход (плавление)}} + \underbrace{c_2 \cdot m \cdot \Delta T_2}_{\text{нагревание (жидкости)}} + \underbrace{L \cdot m}_{\text{фазовый переход (кипение)}} + \underbrace{c_3 \cdot m \cdot \Delta T_3}_{\text{нагревание (пара, газа)}} \quad (8.6)$$

При этом масса вещества при нагревании и при фазовых переходах не меняется:

$$m_{\text{твёрд}} = m_{\text{жидк}} = m_{\text{пар}} = m. \quad (8.7)$$

Все эти процессы хорошо иллюстрируются на рис. 8.3.

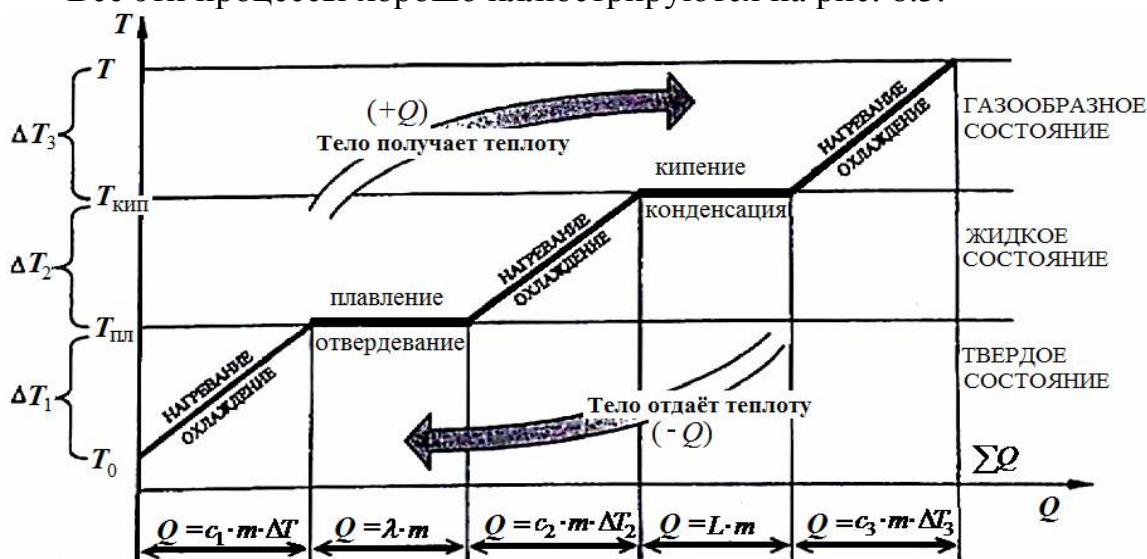


Рис. 8.3 Теплота фазовых переходов

## 8.4 Свойства твердых тел

1. Сохраняют форму.
2. Сохраняют объем.

**Характер молекулярного движения** – колебания атомов или молекул около положения равновесия:  $E_{\text{п}} \gg E_{\text{к}}$ .

**Кристаллические и аморфные тела. Их свойства.** Различают кристаллические и аморфные твердые тела.

У аморфных тел сохраняется ближний порядок в расположении атомов, но отсутствует дальний. Отсюда вытекают их свойства:

1. Они не имеют температуры плавления, так как нет кристаллической решетки. При нагревании они размягчаются.
2. Они изотропны: их физические свойства одинаковы по всем направлениям.

**Кристаллы** – это твердые тела, атомы и молекулы которых занимают определенное, упорядоченное положение в пространстве. Следствием упорядоченного расположения атомов в кристалле является геометрическая правильность его внутреннего строения.

**Свойства кристаллов:**

1. Анизотропия физических свойств (их зависимость от выбранного в кристалле направления).
2. Наличие температуры плавления. Кристаллическое тело, достигая температуры плавления, начинает плавиться. Вся подводимая энергия расходуется на увеличение потенциальной энергии взаимодействия молекул при разрушении кристаллической решетки, а кинетическая энергия молекул стабильна, поэтому температура тела при плавлении не меняется.
3. Свойства кристалла определяются не только тем, из каких атомов он состоит, но и видом кристаллической решетки. Например, из одних и тех же атомов углерода состоят алмаз и графит, но физические свойства у них различны.

**Механические свойства твердых тел.** Материалы, обнаруживающие упругие свойства при значительной деформации, называют **упругими**. При малых деформациях напряжение  $\sigma$  прямо пропорционально относительному удлинению  $\varepsilon$ . Выполняется закон Гука:

$$\sigma = |\varepsilon|E. \quad (8.8)$$

**Деформация упругая.** Максимальное напряжение, при котором еще не возникает заметной остаточной деформации, называют **пределом упругости**  $\sigma_{\text{упр}}$ .

При достижении максимального значения механического напряжения  $\sigma_{\text{п.п.}}$  (*предел прочности*) образец растягивается без увеличения внешней нагрузки вплоть до разрушения.

**Запас прочности** ( $n$ ) равен отношению предела прочности  $\sigma_{n.n.}$  к допускаемому механическому напряжению  $\sigma_{доп.}$ :

$$n = \frac{\sigma_{n.n.}}{\sigma_{доп.}} \quad (8.9)$$

Материалы, у которых незначительные нагрузки вызывают пластическую деформацию, называют *пластичными*.

Удлинение происходит практически без увеличения нагрузки.

### **Интересные факты!**

Предел прочности при растяжении, МПа: алюминия – 100; меди – 400; серебра – 16; золота – 140; стали – 500.

Допустимое механическое напряжение, МПа: алюминия – 30 – 80; меди – 30 – 120; стали – 100 – 400.

## **8.5 Свойства жидкостей**

Жидкости сохраняют объем, но не сохраняют форму (принимают форму сосуда, в который помещаются):  $E_k \approx E_{II}$ .

*Основное свойство жидкости – текучесть.*



Рис. 8.4

**Характер молекулярного движения:**

молекулы колеблются вокруг положения равновесия и «перескакивают» в другие позиции (рис. 8.4). Время «оседлой» жизни больше времени перескоков. Молекулы расположены на сравнительно близких расстояниях, поэтому свойства жидкости определяются силами взаимодействия молекул.

Под действием сил поверхностного натяжения жидкость в состоянии невесомости или в малых количествах (капля) принимает форму шара, так как при этом минимальна площадь свободной поверхности, а следовательно, поверхностной энергии. Всякая же система стремится к состоянию с минимальной потенциальной энергией.

**Особенности поверхностного слоя жидкости.** Наиболее характерным свойством жидкого состояния является наличие резкой границы, разделяющей жидкость и её пар.

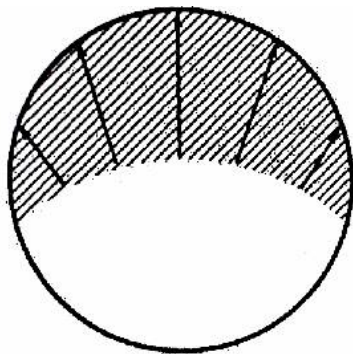


Рис. 8.5

Молекулы жидкости, находящиеся на ее поверхности, притягиваются молекулами, находящимися внутри жидкости.

На поверхности остается такое количество молекул, при котором ее площадь оказывается минимальной для данного объема жидкости.

**Сила поверхностного натяжения** – это сила, действующая на границе соприкосновения с твердым телом перпендикулярно к границе по

касательной к поверхности жидкости (рис. 8.5).

**Поверхностная энергия. Поверхностное натяжение** - величина, измеряемая отношением модуля силы поверхностного натяжения к длине соприкосновения с твердым телом:

$$\sigma = \frac{F_{\text{н}}}{l_{\text{гр}}}, \quad [\sigma] = \text{Н/м} \quad (8.10)$$

Величина поверхностного натяжения зависит от рода жидкости и температуры.

**Энергия поверхностного слоя** жидкости площадью  $S$ :

$$\Pi = \sigma \cdot S. \quad (8.11)$$

**Работа** при изменении площади **поверхностного слоя пленки**

$$A = \sigma \Delta S = \Delta \Pi. \quad (8.12)$$

Величину поверхностного натяжения можно определить методом отрыва капель:

$$\sigma = \frac{m_{\text{к}} g}{l}, \quad (8.13)$$

где  $l$  – длина границы поверхностного слоя;  
 $m_{\text{к}}$  – масса капли;  
 $g$  – ускорение свободного падения.

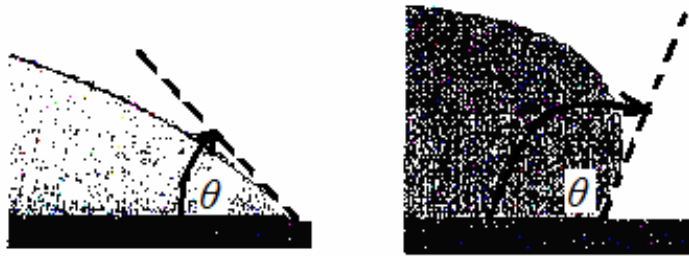
### **Интересные факты!**

Поверхностное натяжение при температуре 20°C, Н/м: воды –  $7,2 \cdot 10^{-2}$ ; ртути –  $47 \cdot 10^{-2}$ ; мыльного раствора –  $\approx 4 \cdot 10^{-2}$ .

Поверхностное натяжение крови человека при 36,7°C –  $60 \cdot 10^{-2}$  Н/м.

### **Явление смачивания. Капиллярные явления**

**Жидкость, которая растекается по твердому телу, называется смачивающей** данное твердое тело (вода по стеклу и т.п.). При этом равнодействующая сил притяжения молекул на границе соприкосновения с молекулами жидкости меньше, чем с молекулами твердого тела (рис. 8.6. а).



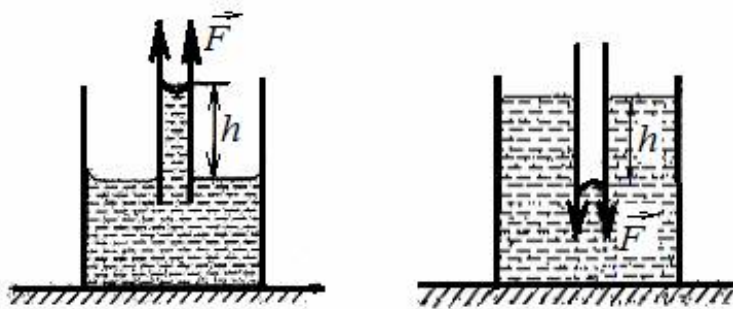
а – смачивающая жидкость; б – не смачивающая жидкость

Рис. 8.6

Жидкость, которая не растекается, а стягивается межмолекулярными силами в капли, называется **несмачивающей** данное твердое тело (вода на жирной поверхности и т.п.). Равнодействующая сил притяжения молекул на границе соприкосновения с молекулами жидкости больше, чем с молекулами твердого тела (рис. 8.6, б).

$\theta$  – краевой угол:

- при полном смачивании  $\theta = 0$ .
- при полном несмачивании  $\theta = \pi$ .



а – смачивающаяся; б – несмачивающаяся

Рис. 8.7 Жидкость в капилляре

**Смачивание** – это трехфазное явление, так как оно происходит на границе трех фаз: твердой, жидкой и газообразной.

В тонкой трубке – капилляре в случае смачивания жидкость поднимается по стенке, образуется вогнутая поверхность жидкости (вогнутый мениск) (рис. 8.7, а).

Высота подъема жидкости в трубке

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}, \quad (8.14)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение;

$r$  – радиус трубки;

$\rho$  – плотность жидкости.

Несмачивающая жидкость опускается в капилляре на  $h$ , мениск при этом выпуклый (рис. 8.7, б).

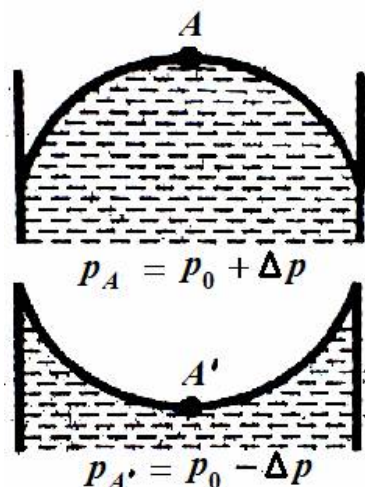


Рис. 8.8

**Формула Лапласа.** Добавочное давление, обусловленное кривизной поверхности жидкости, определяется так:

$$\Delta p = \pm \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (8.15)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных сечений поверхности жидкости; знак «+» – для выпуклого мениска, «-» – для вогнутого.

Давления в точках  $A$  и  $A'$  указаны на рис. 8.8:  $p_0$  – давление на свободную поверхность.

Если  $R_1 = R_2 = R$  (сферическая поверхность), то:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R}. \quad (8.16)$$

Для тонкостенной полый сферы (пузыря), имеющей две поверхности – внешнюю и внутреннюю, лапласово давление равно

$$\Delta p = 2 \cdot \frac{2\sigma}{R} = \frac{4\sigma}{R}. \quad (8.17)$$

## 8.6 Свойства пара

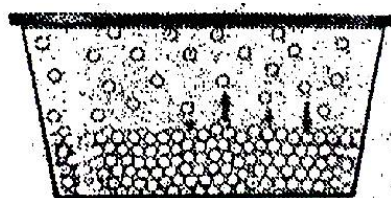


Рис. 8.9

*Пар* – это газообразное состояние вещества, в которое могут переходить как жидкости (*испарение*) (рис. 8.9), так и твердые тела (*сублимация или возгонка*).

*Испарение* – процесс превращения жидкости в пар. Происходит при любой температуре.

Жидкость при испарении охлаждается, так как ее покидают наиболее «быстрые» молекулы, находящиеся вблизи поверхностного слоя. Значительная часть кинетической энергии движения молекул тратится на работу выхода ( $E_k > A_{\text{вых}}$ ).

Для того чтобы температура жидкости при испарении не понижалась, к ней нужно подводить тепло.

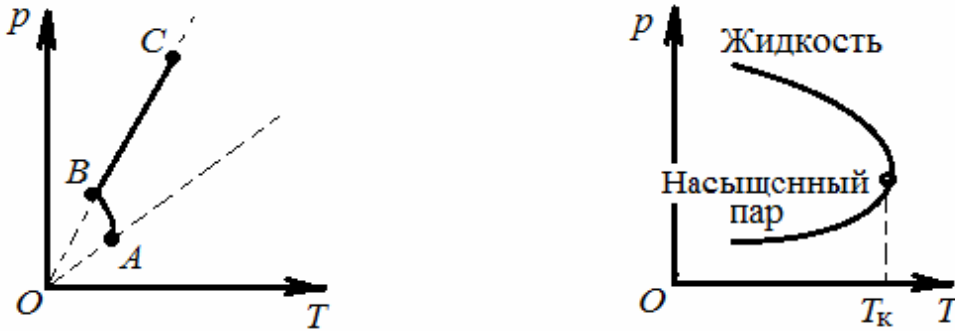
**Скорость испарения зависит от:**

- 1) вида жидкости;
- 2) температуры жидкости;
- 3) площади свободной поверхности;
- 4) наличия ветра.

**Конденсация** – процесс превращения пара в жидкость.

Пар, находящийся в динамическом (подвижном) равновесии со своей жидкостью, называется **насыщенным паром**.

Динамическое равновесие наступает тогда, когда скорость парообразования становится равной скорости конденсации. Если испарение преобладает над конденсацией – **пар ненасыщен**.



а) зависимость давления от температуры; б) зависимость плотности жидкости и ее насыщенного пара от температуры

Рис. 8.10

График зависимости давления от температуры для насыщенного и ненасыщенного пара изображен на рис. 8.10, а:

$AB$  – насыщенный пар; зависимость  $p$  от  $T$  нелинейна, так как от  $T$  зависит концентрация молекул насыщенного пара.

$BC$  – ненасыщенный пар или идеальный газ;

$$p \approx T (p = nkT). \quad (8.18)$$

График зависимости плотности жидкости и ее насыщенного пара от температуры приведен на рис. 8.10, б.

Кривые сливаются при  $T = T_k$ , где  $T_k$  – критическая температура.

### **Интересные факты!**

Критические температуры, °C: гелия – 268; азота – 147.

### **Характеристики влажности воздуха.**

**Влажность воздуха** характеризует количество водяных паров в воздухе.

Различают следующие основные характеристики влажности:

- **Абсолютная влажность** – это парциальное давление водяного пара  $p$  (или плотность водяного пара  $\rho$ ) находящегося в воздухе при данной температуре.



- **Относительная влажность** ( $\varphi$ ) показывает, как близок данный водяной пар к насыщению. **Относительная влажность** – это отношение парциального давления водяного пара  $p$  (или плотности водяного пара  $\rho$ ) к давлению ( $p_n$ ) или плотности ( $\rho_n$ ) насыщенных паров при данной температуре:

$$\varphi = \frac{p}{p_n} 100\%, \text{ или } \varphi = \frac{\rho}{\rho_n} 100\%. \quad (8.19)$$

Относительная влажность измеряется в процентах.

- **Точка росы** – это температура, при которой данный водяной пар, который содержится в воздухе, становится насыщенным (конденсируется).

Для измерения относительной влажности воздуха используют:

1. **психрометр** вместе с психометрической таблицей;
2. **гигрометр** – непрерывная регистрация влажности воздуха.

**Кипением** называется процесс быстрого образования и роста пузырьков насыщенного пара, прорывающегося сквозь свободную поверхность.

**Кипение** – парообразование, происходящее, как во всем объеме жидкости, так и с ее поверхности при постоянной температуре, называемой **температурой кипения**.

**Условие кипения:**

- Жидкость кипит при равенстве давления насыщенных паров и внешнего давления на жидкость. Температура кипения воды равна 100 °С, если внешнее давление – нормальное атмосферное давление:

$$\begin{aligned} p_{\text{нас. } 100} &= p_{\text{атм}} \approx 10^5 \text{ Па,} \\ p_{\text{н.п.}} &= p_{\text{внешн}}, \\ p_{\text{н.п.}} &= p_{\text{атм.}} \end{aligned} \quad (8.20)$$

- **Температура кипения** жидкости зависит от рода жидкости, наличия примесей, внешнего давления на жидкость.

При уменьшении внешнего давления температура кипения понижается, и наоборот. Если из жидкости удалить растворенный воздух (многократным кипячением) и возможные центры испарения (пылинки, ионы и др.), то температура жидкости может стать выше температуры кипения. Такое состояние называется **перегретой жидкостью**. Перегретую жидкость можно получить при условии, чтобы внешнее давление стало меньше по сравнению с давлением насыщенных паров при данной температуре.

### **Интересные факты!**

Температура кипения при нормальном давлении: воды – 100 °С; ртути – 357 °С; спирта – 78 °С.

## ***Новые слова, словосочетания, языковые конструкции***

агрегатное состояние	пар
алмаз	переходить
аморфные	перегретая
анизотропия	плавить
влажность абсолютная	плавление
влажность относительная	плазменное
вплотную	пластичные
газообразный	поверхностное натяжение
граница	поверхностная энергия
графит	потенциальная
жидкий	предел прочности
замерзание	предел упругости
ионизированный	промерзание
ионы	психрометр
испарение	слой
капиллярные явления	сжать
кипение	сжимаемый
конденсация	смачивающий
кристаллический	твердый
линейное	точка росы
нагревание	фаза
насыщенный	фазовый
ненасыщенный	электронный
несмачиваемый	яма
объемное	

### **1. Что находится как.**

Молекулы жидкости находятся почти вплотную друг к другу.

### **2. Что может переходить как.**

Молекулы жидкости могут переходить в направлении действия силы.

### **3. Во время чего изменяется что.**

Во время фазового перехода изменяется объем тела и его внутренняя энергия.

### **4. Что происходит когда.**

Фазовые переходы происходят только при определенных значениях давления  $P_{\text{фаз}}$  и температурах  $T_{\text{фаз}}$ .

## ***Контрольные вопросы***

1. В каких агрегатных состояниях могут находиться вещества в природе?
2. Как движутся молекулы жидкости?
3. Как движутся молекулы газа? Почему?

4. Объясните на основе молекулярно-кинетической теории явление расширения твердых тел и жидкостей.
5. Что такое линейное расширение?
6. Как объясняется тепловое расширение тел?
7. Что показывает коэффициент линейного расширения?
8. Что показывает коэффициент объемного расширения?
9. Каковы особенности теплового расширения воды?
10. Что такое фазовый переход?
11. Сколько фазовых переходов вы можете указать? Назовите их.
12. Какие процессы с точки зрения молекулярного строения происходят в веществе при фазовых переходах?
13. Почему в прямых фазовых переходах внутренняя энергия вещества увеличивается?
14. Как изменяется внутренняя энергия при плавлении кристаллических твердых тел?
15. Что нужно знать, чтобы определить количество теплоты, необходимое для плавления тела, взятого при температуре плавления?
16. Напишите формулу количества теплоты, необходимого для плавления тела, нагретого ниже температуры плавления.
17. Как изменяется внутренняя энергия тела при отвердевании? Изменяется ли при этом температура тела?
18. Как происходит плавление и отвердевание аморфных веществ?
19. В чем отличие процессов испарения и кипения?
20. При какой температуре происходит кипение? От чего зависит температура кипения?
21. Что такое твердое тело? Назовите виды твердых тел.
22. Какие свойства у аморфных тел?
23. Какие свойства у кристаллических твердых тел?
24. Что такое упругая деформация, предел упругости, запас прочности?
25. Какие свойства у жидкости?
26. Что такое поверхностное натяжение, поверхностная энергия?
27. Что такое явление смачивания? Какие капиллярные явления происходят в жидкости?
28. Какие свойства у пара?
29. Что такое испарение, конденсация?
30. Какой пар называют насыщенным, ненасыщенным?
31. Что такое влажность воздуха, абсолютная влажность, относительная влажность?
32. Что такое кипение? Каковы условия кипения?

## 9 ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

Электромагнитные силы (электромагнитное взаимодействие) проявляются в природе весьма разнообразно. Ими объясняются, например, ранее изученные силы трения, силы упругости и силы взаимодействия молекул. Электромагнитные силы возникают между телами, которые имеют **электрический заряд**. Электрический заряд (заряд) – это одно из свойств материи, которое проявляется в том, что между заряженными телами действуют силы отталкивания и притяжения. Эти силы в огромное число ( $10^4$ ) раз больше гравитационных сил.

### 9.1 Электростатика

**Электростатика** – раздел электродинамики, изучающий взаимодействие неподвижных (статических) электрических зарядов.

#### 9.1.1 Электрический заряд. Электризация тел. Закон сохранения заряда

**Электрический заряд ( $q$ )** – физическая величина, характеризующая свойство тел и частиц вступать в электромагнитное взаимодействие. Различают **положительные и отрицательные заряды**.

Минимальный электрический заряд, существующий в природе, это **заряд элементарных частиц**. Электрический заряд любого тела равен целому числу **элементарных зарядов ( $e$ )**.

Электрический заряд дискретен, т.е. *не может быть в природе заряда меньше, чем заряд электрона ( $-e$ ) или протона ( $+e$ )*.

**Точечным зарядом** называется любое заряженное тело, размерами которого можно пренебречь в данной задаче.

**Единица изменения заряда в СИ:**

$$[q] = 1 \text{ А} \cdot \text{с} = 1 \text{ Кл (кулон)}$$

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

**1 кулон** – это заряд, протекающий через поперечное сечение проводника за одну секунду при силе постоянного тока 1 ампер.

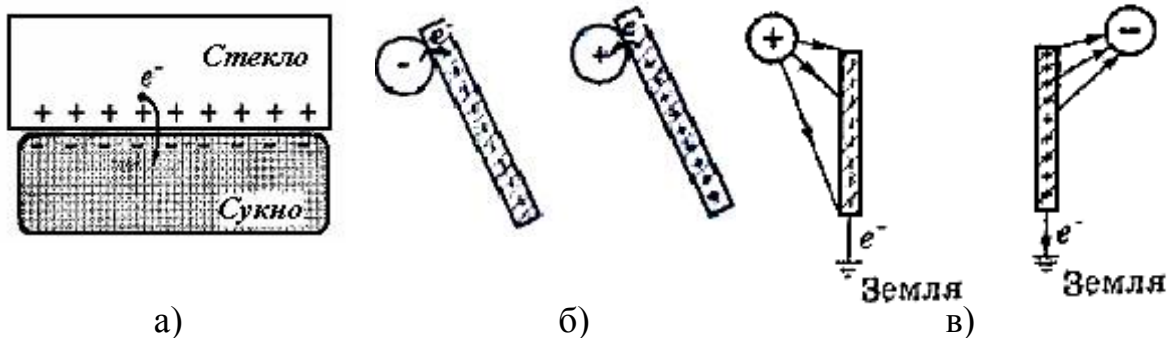


Рис. 9.1

Если создать избыток (или недостаток) электрических зарядов того или иного знака, то тело будет **наэлектризовано**.

Различают **три вида электризации**:

1. *Электризация соприкосновением (трением) разнородных тел.* При контакте разнородных веществ небольшая часть электронов атомов одного из веществ (того, где связь электронов с атомом относительно слаба) переходит в другое вещество. Тело с избытком электронов заряжается отрицательно, с недостатком – положительно (рис. 9.1, а).
2. *Электризация проводников соприкосновением с наэлектризованным телом.* При этом проводник электризуется, а наэлектризованное тело частично разряжается (рис. 9.1, б).
3. *Электризация через влияние.* Проводник вносится в электрическое поле и кратковременно заземляется (достаточно прикосновения руки). Проводник оказывается наэлектризованным равноименно с телом, образующим электрическое поле (рис. 9.1, в).

Электризация тел при тесном контакте применяется в электрокопировальных устройствах («Ксерокс»).

**Закон сохранения заряда:** алгебраическая сумма зарядов всех тел изолированной системы сохраняется неизменной при любых процессах или явлениях внутри системы:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = const \quad (9.1)$$

### 9.1.2 Взаимодействие зарядов. Закон Кулона

Разноименно заряженные тела и частицы притягиваются, одноименно заряженные – отталкиваются.

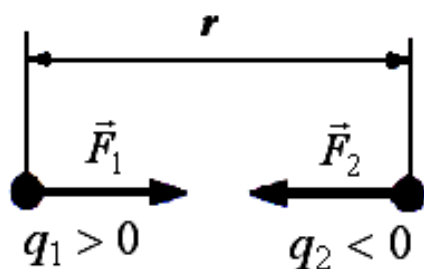


Рис. 9.2

**Закон Кулона:** модуль силы электростатического взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами  $q_1$  и  $q_2$  прямо пропорционален произведению модулей этих зарядов и обратно пропорционален квадрату расстояния  $r$  между ними (рис. 9.2):

$$F_k = \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot r^2} \quad (9.2)$$

здесь  $q_1$  и  $q_2$  – взаимодействующие заряды (их абсолютные значения), Кл;  $r$  – расстояние между ними, м;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которой находятся заряды (для вакуума  $\epsilon = 1$ ).

**Диэлектрическая проницаемость** – это физическая величина, характеризующая электрические свойства вещества и показывающая, во сколько раз сила взаимодействия зарядов в данной среде меньше силы их взаимодействия в вакууме.

Значение силы  $F$  выражается в ньютонах (Н) и вектор силы  $\vec{F}_k$  направлен по прямой, соединяющей заряды. Закон Кулона можно применять для заряженных тел, которые имеют форму шара.

При решении задач с помощью формул, в которые входит множитель  $1/(4\pi\epsilon_0)$ , рекомендуется подставлять просто его числовое значение

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}. \quad (9.3)$$

Тогда формула закона Кулона:

$$F_k = k \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon \cdot r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon \cdot r^2}. \quad (9.4)$$

### 9.1.3 Электрическое поле. Электростатическое поле. Напряженность электрического поля. Принцип суперпозиции полей

**Электрическое поле** – это вид материи (частный случай электромагнитного поля), основной особенностью которой является действие на тела или частицы, обладающие электрическим зарядом.

Различают два основных вида электрических полей: электростатическое и вихревое (индукционное).

**Электростатические поля** – это электрические поля, существующие вокруг неподвижных в данной системе отсчета тел или частиц, обладающих электрическим зарядом.

**Напряженность электрического поля** ( $\vec{E}$ ) – силовая характеристика поля. Это векторная величина, равная отношению силы, с которой поле действует на пробный заряд, к величине этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_k}{q_0}, \quad (9.5)$$

$$[E] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}. \quad (9.6)$$

**Пробный заряд** ( $q_0$ ) – это неподвижный точечный положительный заряд, вносимый в поле.

Сила, с которой электростатическое поле действует на точечный электрический заряд называется **кулоновской силой**:

$$\vec{F}_k = q \cdot \vec{E}. \quad (9.7)$$

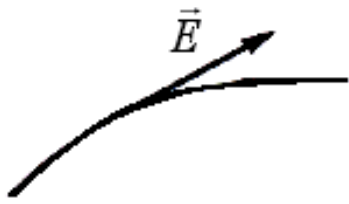


Рис 9.3

**Линии напряженности (силовые линии)** электрического поля – линии, касательные к которым в каждой точке, через которую они проходят, совпадают с вектором напряженности поля. (рис. 9.3)

Линии напряженности электростатического поля начинаются на положительно заряженном теле и заканчиваются на отрицательно заряженном теле (рис. 9.4).

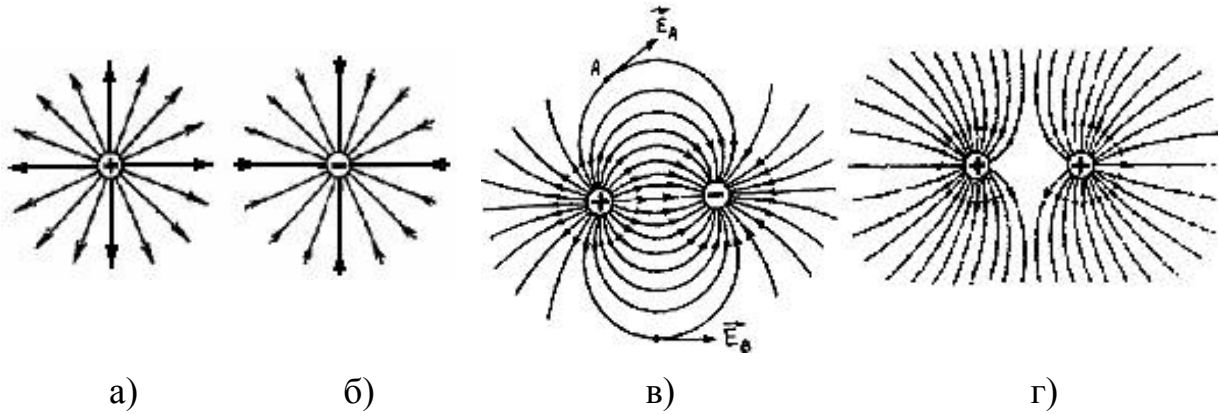


Рис. 9.4

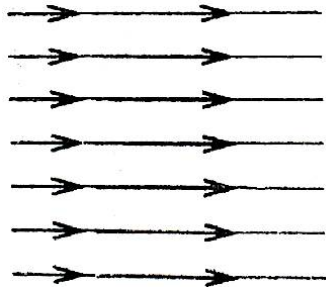


Рис. 9.5

Силовые линии непрерывны и нигде в пространстве *не пересекаются*. Силовые линии проходят ближе одна к другой (т.е. чаще) там, где напряжённость поля больше.

**Однородным** называется такое поле, (рис. 9.5) у которого напряжённость одинакова во всех точках

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_2 = \dots = \vec{E}_n = const . \quad (9.8)$$

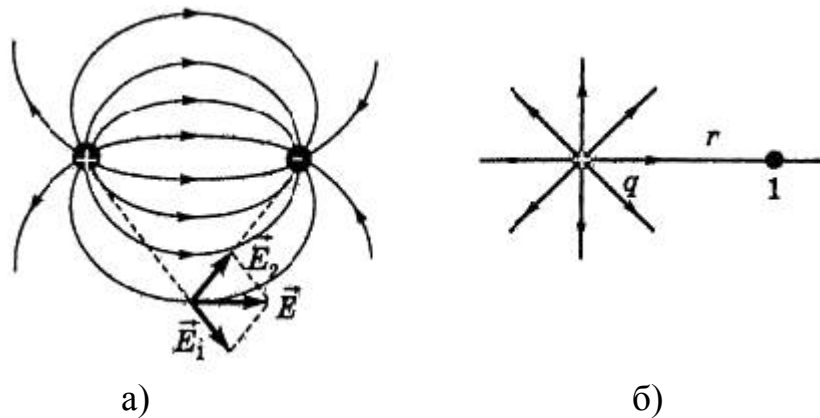


Рис. 9.6

**Принцип суперпозиции (наложения):** напряженность электрического поля системы зарядов равна векторной сумме напряженности полей, создаваемых каждым из них в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n. \quad (9.9)$$

Поля не взаимодействуют, а накладываются. Заряды взаимодействуют, так как поле одного заряда действует на другой, и наоборот (рис. 9.6, а).

**Напряженность поля точечного заряда:**

$$E_1 = k \cdot \frac{|q|}{\varepsilon \cdot r^2} = \frac{|q|}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}. \quad (9.10)$$

Такой же вид имеет напряженность поля заряженной сферической поверхности, где  $r$  – расстояние от центра сферы (рис. 9.6, б).

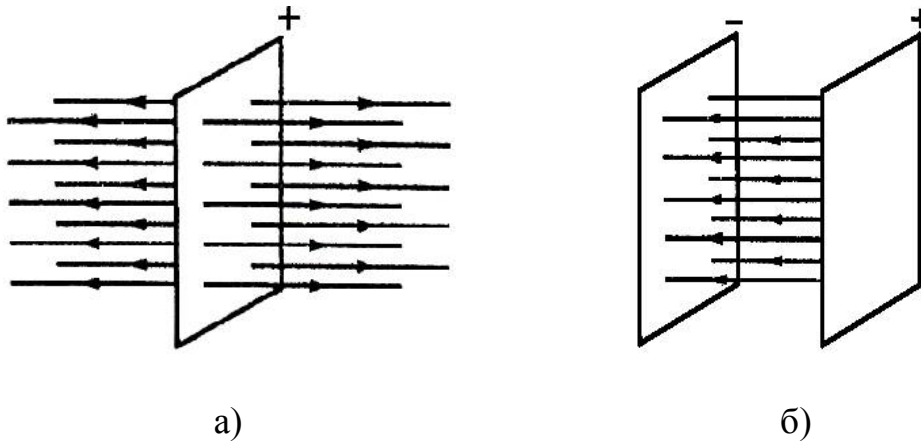


Рис. 9.7

**Поверхностная плотность заряда ( $\sigma$ )** – это величина, равная электрическому заряду, распределенному на единице площади поверхности (рис. 9.7, а):

$$\sigma = \frac{q}{S}, \quad [\sigma] = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}, \quad (9.11)$$

**Напряженность поля бесконечной плоской поверхности (однородное поле):**

$$E_{\text{пл}} = \frac{|\sigma|}{2\varepsilon_0\varepsilon}. \quad (9.12)$$

Для равномерно разноименно заряженных параллельных бесконечных плоскостей напряженность удваивается (рис. 9.7, б):

$$E = 2E_{\text{пл}} = \frac{|\sigma|}{\varepsilon_0\varepsilon}. \quad (9.13)$$

В окружающем пространстве  $E = 0$ .



### 9.1.4 Работа в электростатическом поле. Потенциал поля. Разность потенциалов двух точек поля. Напряжение

Любое взаимодействие, включая электромагнитное описывается физическими величинами, введенными в механике (сила, перемещение, работа силы, энергия).

Движение заряженной частицы в однородном ( $\vec{E} = const$ ) электростатическом поле аналогично её движению в однородном ( $g = const$ ) гравитационном поле.

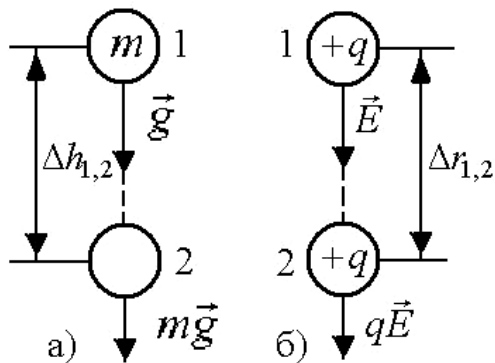


Рис. 9.8

При перемещении частицы на  $\Delta h_{12} (\Delta r_{12})$ :

а) в гравитационном поле  $A_{гр} = mg\Delta h_{12}$ ;

б) в электростатическое поле

$$A_k = F_k \Delta r_{12} = qE\Delta r_{12} = k \frac{qq_0 \cdot \Delta r_{12}}{\epsilon \Delta r_{12}^2} = k \frac{q \cdot q_0}{\epsilon \Delta r_{12}} \quad (9.14)$$

Так же, как и в случае гравитационного поля, **работа сил** электростатического поля при перемещении заряженной частицы из одной точки (1) в другую (2)

**не зависит** от формы траектории, а **зависит** лишь от **начального и конечного положения частицы**. Это означает, что **электростатическое поле потенциально**.

**Работа** электростатического поля равна разности (убыли) потенциальной энергии ( $W$ ) заряженной частицы в её начальном и конечном положении.

$$A_{12} = W_1 - W_2 = \frac{kq_0q}{\epsilon \Delta r_{12}} \quad (9.15)$$

Энергетическая характеристика поля – потенциал ( $\varphi$ ).

**Потенциал электростатического поля в данной точке** – скалярная физическая величина, равная отношению потенциальной энергии, которой обладает пробный положительный заряд, помещенный в данную точку поля, к значению этого заряда, (если его потенциальную энергию в бесконечности считать равным нулю).

$$\varphi_1 = \frac{W_{n1}}{q_0}, \text{ если } W_{n\infty} = 0; [\varphi] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кл}} = 1\text{В (вольт)} \quad (9.16)$$

Потенциал электростатического поля, созданного точечным зарядом  $q$  на расстоянии  $r$  от него,

$$\varphi = k \frac{q}{\epsilon r} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r} \quad (9.17)$$

Потенциальная энергия заряда  $q$  в точке, имеющий потенциал  $\varphi$ :

$$W = q\varphi . \quad (9.18)$$

Эквипотенциальная поверхность  $\varphi_1, \varphi_2$

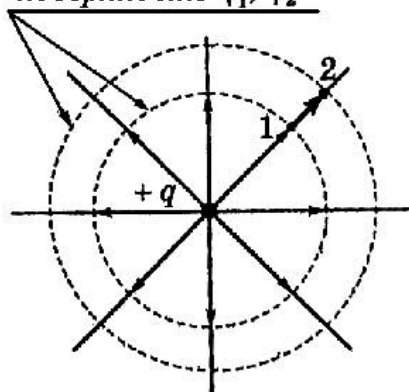


Рис. 9.9

**Эквипотенциальная поверхность** – это поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал (рис. 9.9).

Эквипотенциальная поверхность и линии напряженности поля в каждой точке взаимно перпендикулярны.

Поверхность проводящего заряженного тела эквипотенциальна.

Работа по перемещению заряда по эквипотенциальной поверхности равна нулю.

**Разность потенциалов** двух точек поля – это величина, численно равная работе кулоновских сил по перемещению единичного положительного заряда из 1-й точки во 2-ю:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{К1-2}}{q} , \quad (9.19)$$

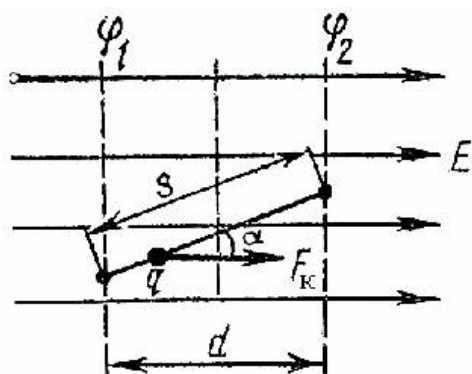
**Сторонние силы** – это любые, кроме кулоновских, силы, действующие на заряд.

**Напряжение ( $U$ )** – это величина, численно равная работе всех (кулоновских и сторонних) сил при перенесении единичного положительного заряда через данный участок:

$$U = \frac{A_{К} + A_{ст}}{q} . \quad (9.20)$$

Если действуют только кулоновские силы, то  $A = A_{К}$

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = -\Delta\varphi = \frac{A}{q} \quad (9.21)$$



--- Эквипотенциальные поверхности  
 → Линии напряженности

Рис. 9.10

Работа по перемещению заряда ( $q$ ) в электростатическом поле:

$$A = qU = q(\varphi_1 - \varphi_2) . \quad (9.22)$$

В однородном электростатическом поле вектор напряженности – постоянная величина ( $\vec{E} = const$ ). Для однородного электростатического поля работа перемещения заряда  $q$  на расстояние  $d$  равна (рис. 9.10).

$$A = F_k s \cos\alpha = qEd . \quad (9.23)$$

Модуль вектора напряженности

$$E = \frac{A}{qd} \quad (9.24)$$

где  $d$  – проекция перемещения заряда на линию  $\vec{E}$ .

Из формул (9.22, 9.24) следует, что напряженность в любой точке электростатического поля равна изменению потенциала ( $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ ), приходящемуся на единицу длины линии напряженности поля ( $d$ ):

$$E_x = -\frac{\Delta\varphi}{d} = \frac{U}{d}, \quad [E] = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}. \quad (9.25)$$

Вектор напряженности поля всегда направлен в сторону убывания потенциала.

**Задача.** Электрон, который двигался со скоростью  $10^7$  м/с, попадает в однородное электрическое поле. Он проходит разность потенциалов 1136 В и ускоряется. Найти скорость электрона после ускорения.

Дано:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = 1136 \text{ В}$$

$$v_1 = 10^7 \text{ м/с}$$

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

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$v_2 = ?$$

Решение:

На электрон массой  $m$  и зарядом  $e$  в электрическом поле действует сила  $\vec{F}_k = e\vec{E}$ , под действием которой он летит равноускоренно.

При этом электрическое поле совершает работу  $A = |e| \cdot U$ . По закону сохранения и превращения энергии эта работа равна изменению кинетической

$$\text{энергии электрона } A = \Delta E_k = E_{k2} - E_{k1} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Из равенства  $|e| \cdot U = \frac{m}{2}(v_2^2 - v_1^2)$  найдём новую скорость электрона:

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 + \frac{2|e|U}{m}}.$$

Вычисления:

$$v_2 = \sqrt{(10^7)^2 + \frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1136}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 2,24 \cdot 10^7 \text{ м/с}.$$

Ответ:  $v_2 = 2,24 \cdot 10^7$  м/с.

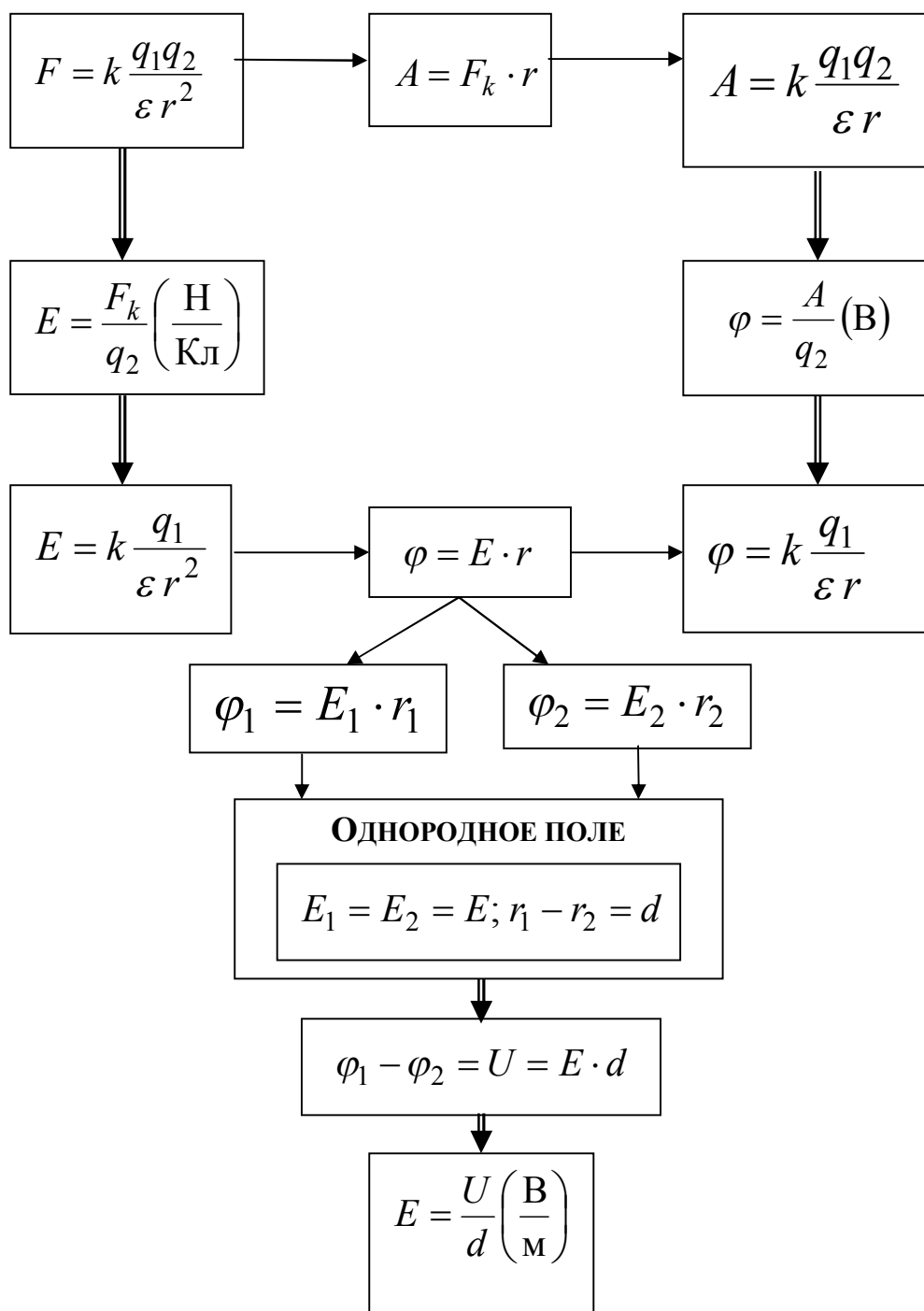


Рис. 9.11 Характеристики электростатического поля точечного заряда  $q_1$ , в котором на расстоянии  $r$  находится заряд  $q_2$

### 9.1.5 Электрическое поле в веществе

По способности проводить электрические заряды все вещества условно делятся на проводники, диэлектрики (непроводники) и полупроводники.

**Проводники** – это вещества, в которых электрические заряды свободно перемещаются. Это почва, тело человека, все металлы в твердом и жидком состояниях, водные растворы солей, кислот, щелочей, расплавленные соли и ионизированные газы.

**Диэлектрики** – вещества в которых электрические заряды, принадлежащие им, остаются на одних и тех же местах. К диэлектрикам относятся янтарь, эбонит, каучук, фарфор, воздух, сухое дерево, капрон.

**Полупроводники** при комнатной температуре имеют хоть и очень низкую, но все же заметную электропроводность, то есть способны проводить электрический ток. С повышением температуры (или при облучении) их электропроводность увеличивается. Полупроводники занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками. К ним относятся селен, кремний, германий, закись меди.

**Диэлектрики в электростатическом поле (поляризация диэлектрика).** Молекулы диэлектриков можно рассматривать как

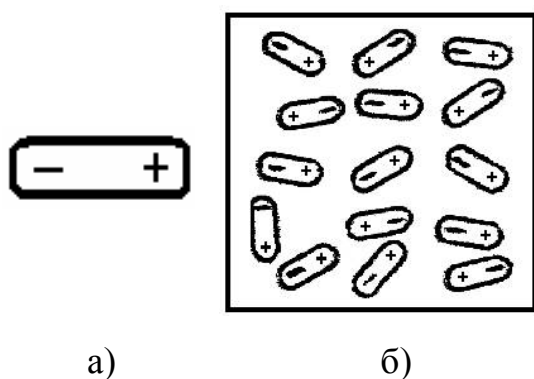


Рис. 9.12

электрические диполи (рис. 9.12, а). Тепловое движение приводит к хаотической ориентации диполей по отношению друг к другу. Из-за этого в любом объеме диэлектрика, который содержит большое число молекул, и на его поверхности электрический заряд в среднем равен нулю (рис. 9.12, б). Напряженность электростатического поля в диэлектрике в среднем также равна.

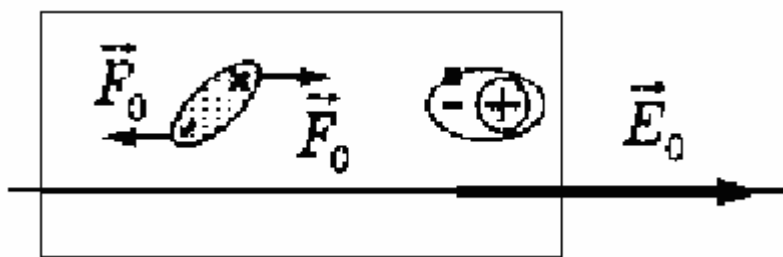


Рис. 9.13

Если поместить диэлектрик в однородное электростатическое поле, то это поле создает момент сил (рис. 9.13).

Под действием момента сил диполь поворачивается. Его ось направляется по силовым линиям поля. Положительные заряды смещаются при этом в направлении электростатического поля, а отрицательные – в противоположную сторону (рис. 9.14). Такие заряды называются связанными.

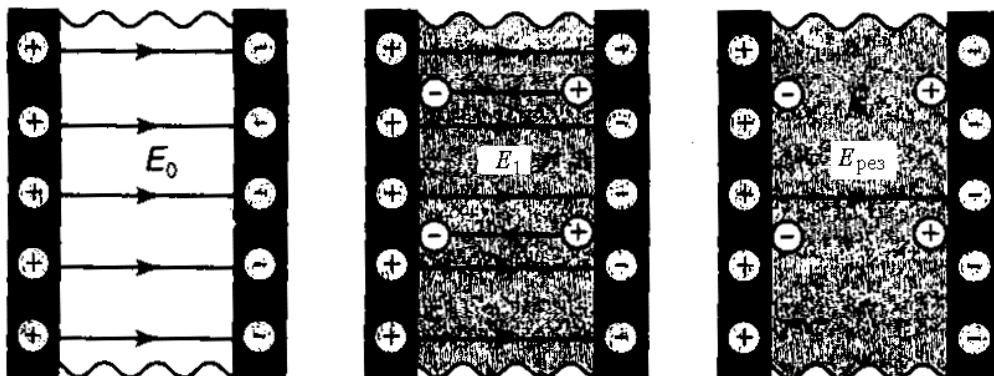


Рис. 9.14

$$E_{\text{рез}} = E_0 - E_1 \quad (9.26)$$

Смещение положительных и отрицательных связанных зарядов диэлектрика в противоположные стороны называют **поляризацией**.

Связанный заряд создает электрическое поле напряженностью  $\vec{E}_1$ , направленное в диэлектрике против напряженности внешнего поля  $\vec{E}_0$ . Из-за этого поле внутри диэлектрика ослабляется в  $\epsilon$  раз:

$$E_{\text{рез.}} = \frac{E_0}{\epsilon}. \quad (9.27)$$

**Относительная диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ) среды** – это число, определяющее, во сколько раз напряженность внешнего поля  $\vec{E}_0$  больше напряженности поля в диэлектрике. Ее величина зависит от вида материала среды:

$$\epsilon = \frac{E_0}{E_{\text{рез}}}. \quad (9.28)$$

**Интересные факты!**

$$\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 81; \quad \epsilon_{\text{парафина}} = 2; \quad \epsilon_{\text{воздуха}} = 1.$$

**Проводники в электрическом поле (электростатическая индукция).** В металлах носителями свободных зарядов являются электроны. Когда поля нет, свободные электроны расположены в проводнике беспорядочно (рис. 9.15, а). Под действием внешнего электростатического поля ( $\vec{E}_0$ ) электроны металлической пластины движутся противоположно этому полю. На противоположных сторонах

проводника накапливаются разноименные заряды. Левая часть пластины заряжается отрицательно, а правая – положительно. Это явление называется электростатической индукцией. Если разделить пластину вдоль линии MN, то обе половины окажутся заряженными (рис. 9.15, в).

Накопившиеся заряды создают свое поле  $\vec{E}_1$ , которое накладывается на внешнее поле и компенсирует его. Поэтому результирующее поле внутри проводника при равновесии зарядов равно нулю  $E_{рез.} = 0$  (рис. 9.15. б).

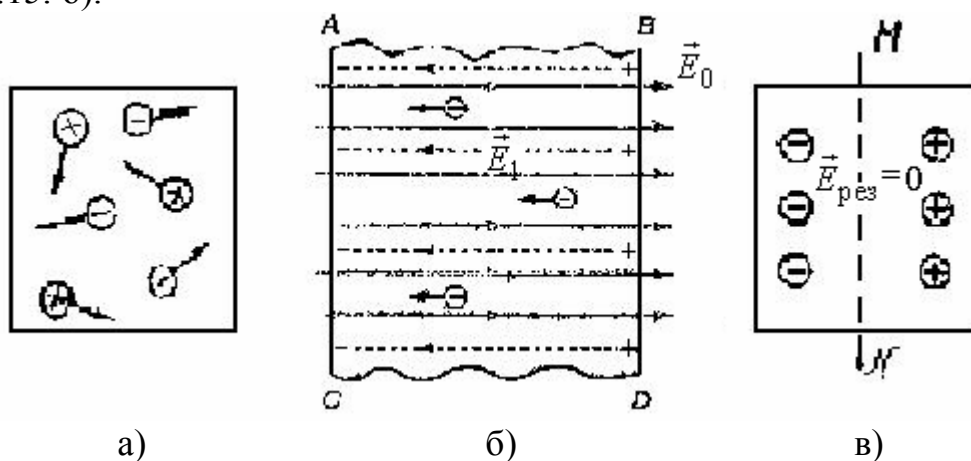


Рис. 9.15

**Распределение электрических зарядов на поверхности проводника.** Так как  $E_{рез.} = 0$ , то, при равновесии зарядов, заряд внутри проводника также равен нулю.

*Весь статический заряд проводника расположен на его поверхности.*

Распределение заряда на поверхности характеризуется **поверхностной плотностью заряда  $\sigma$** .

$$\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta S}, \quad (9.29)$$

где  $\Delta q$  - заряд, который находится на участке поверхности  $\Delta S$ .

Чем больше кривизна поверхности, тем больше  $\sigma$  (рис. 9.16).

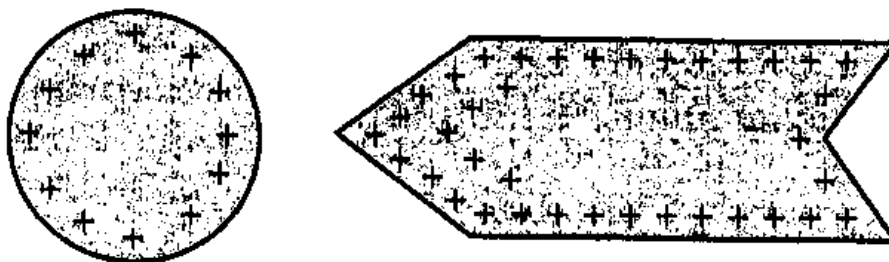


Рис. 9.16

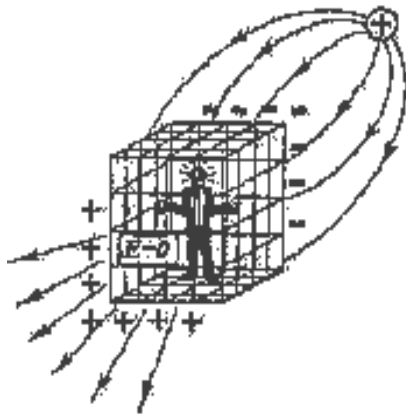


Рис. 9.17

**Потенциал проводника.** Так как внутри проводника нет электрического поля, то

$$E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta x} = 0 \text{ и } \Delta\varphi = 0. \quad (9.30)$$

Между двумя любыми точками

$$\Delta\varphi_{1,2} = \varphi_2 - \varphi_1 \text{ или } \varphi_2 = \varphi_1. \quad (9.31)$$

**Потенциал во всех точках поверхности проводника имеет одинаковую величину.**

**Электростатическая защита** – изоляция от электрического поля металлической сеткой и т.п., окружающей, например, тело человека, электролампу (рис. 9.17).

### 9.1.6 Электрическая емкость. Конденсаторы. Энергия электрического поля

**Емкость.** Когда на проводнике увеличивается заряд  $q$ , то прямо пропорционально заряду возрастает потенциал проводника  $\varphi$ . Это справедливо для проводников любой геометрической формы. Отношение заряда проводника к его потенциалу не зависит от величины заряда, находящегося на проводнике, и определяется свойствами самого проводника, а также среды, в которой он находится. *Характеристикой электрических свойств проводника, определяющей возможность накопления зарядов на данном проводнике, является емкость.*

*Физическая величина, измеряемая отношением заряда  $q$  уединенного проводника к его потенциалу  $\varphi$ , называется емкостью (емкостью) уединенного проводника:*

$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (9.32)$$

Иными словами, **емкостью (емкостью) уединенного проводника** называется физическая величина, численно равная заряду, который изменяет потенциал проводника на одну единицу.

**Уединенным** называют проводник, находящийся вдали от заряженных тел, и других проводников.

Емкость проводника зависит от его линейных размеров и геометрической формы, но не зависит от материала проводника и его агрегатного состояния. Геометрически подобные проводники имеют емкости прямо пропорциональные их линейным размерам. Емкость проводника прямо пропорциональна относительной диэлектрической проницаемости среды, в которой находится проводник.



### Емкость уединенного шара.

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R, \quad (9.33)$$

где  $R$  – радиус шара,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится шар.

**Взаимной электроемкостью** (взаимной емкостью) *двух проводников называется физическая величина, численно равна заряду  $q$ , который нужно перенести с одного проводника на другой для того, чтобы изменить разность потенциалов между ними ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) на единицу:*

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}, \quad \text{где } U = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (9.34)$$

Взаимная емкость зависит от геометрической формы, линейных размеров и взаимного расположения проводников и не зависит от материала проводников их агрегатных состояний. Взаимная емкость прямо пропорциональна относительной диэлектрической проницаемости среды, в которой находятся проводники.

**Фарад** – это электрическая емкость таких двух проводников, между которыми при сообщении каждому из них заряда 1 Кл (+1 Кл и -1 Кл) возникает разность потенциалов 1 В:

$$[C] = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = 1 \text{Ф}. \quad (9.35)$$

Поскольку емкость 1 Ф очень велика, то в практике используют 1 мкФ =  $10^{-6}$  Ф, 1 пФ =  $10^{-12}$  Ф.

**Конденсаторы.** Конденсатор состоит из двух проводников, заряженных разноименно равными по абсолютному значению зарядами.

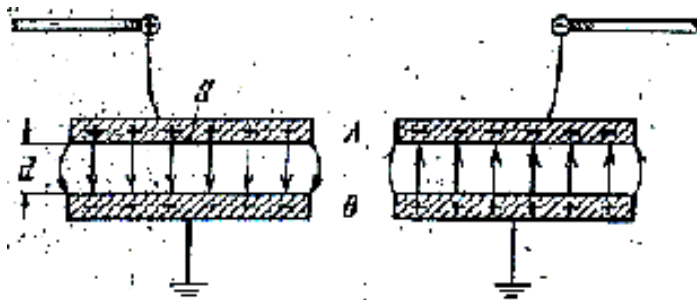


Рис. 9.18

Проводники должны иметь такую геометрическую форму и должны быть расположены друг относительно друга так чтобы электрическое поле, созданное этими проводниками, было сосредоточено в пространстве между ними. Проводники, образующие конденсатор, называются его **обкладками** (обкладки конденсатора).

Емкость конденсатора является взаимной емкостью его обкладок. Конденсаторы служат накопителями электрической энергии.

**Плоский конденсатор** представляет собой две параллельные плоские пластины, заряженные одинаковыми по абсолютному значению, но разноименными зарядами. Пластины (обкладки) конденсатора находятся на расстоянии  $d$  друг от друга (рис. 9.18). При зарядке конденсатора можно

сообщить одной из обкладок некоторый заряд, а другую обкладку заземлить. Тогда на заземленной обкладке останется заряд, противоположный по знаку и равный по значению заряду, сообщенному первой обкладке.

### Емкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} \quad (9.36)$$

где  $S$  – площадь каждой обкладки или меньшей из них,  $d$  – расстояние между обкладками,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость вещества, находящегося между обкладками.

**Соединение конденсаторов.** Для получения нужной емкости конденсаторы соединяют друг с другом в батареи параллельно и последовательно. На рис. 9.19 показано **параллельное соединение конденсаторов**. Разность потенциалов на и х пластинах одинаковые:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi = \text{const}. \quad (9.37)$$

Общий заряд на всех  $n$  конденсаторах

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n. \quad (9.38)$$

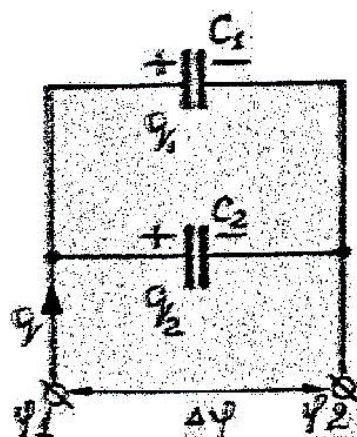


Рис. 9.19

Если подставить значение  $q$  из формулы, то получим:

$$C\Delta\varphi = C_1\Delta\varphi + C_2\Delta\varphi + \dots + C_n\Delta\varphi, \quad (9.39)$$

или

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (9.40)$$

Следовательно, емкость батареи параллельно соединенных конденсаторов равна сумме емкостей этих конденсаторов. На рис. 9.20 показано **последовательное соединение конденсаторов**. Здесь:

$$q_1 = q_2 = \dots = q_n; \quad q = \text{const}; \quad (9.41)$$

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + \dots + \Delta\varphi_n; \quad (9.42)$$

$$\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \dots + \frac{q}{C_n}; \quad (9.43)$$

или

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (9.44)$$

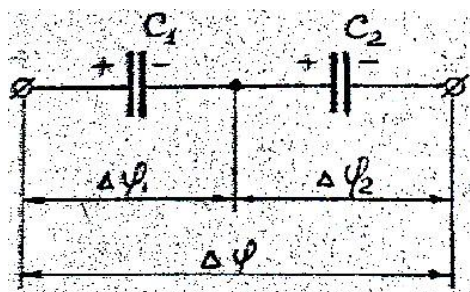


Рис. 9.20

Емкость батареи последовательно соединенных конденсаторов всегда меньше, чем емкость каждого из этих конденсаторов в отдельности.

**Энергия электростатического поля. Энергия заряженного проводника ёмкостью  $C$  (заряженного конденсатора):**

$$W = \frac{C\Delta\phi^2}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C}. \quad (9.45)$$

Взаимная энергия двух точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$

$$W = \frac{q_1q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_{12}} = k \frac{q_1q_2}{\epsilon r_{12}}. \quad (9.46)$$

**Электронвольт (эВ)** – энергия, которую приобретает частица с зарядом, равным элементарному заряду  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, прошедшая в вакууме ускоряющую разность потенциалов, равную 1 вольту.  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж.

### *Новые слова, словосочетания и языковые конструкции*

батарея	поляризация
вихревое	поперечное сечение
диполь	постоянный ток
диэлектрик	потенциал
диэлектрическая проницаемость	принцип
ёмкость	проводник
заземлять	разность потенциалов
заряд пробный	силовые линии
заряд точечный	соединение параллельное
заряд электрический	соединение последовательное
зарядка	строение силы
заряженный конденсатор	суперпозиция (наложение)
защита	уединенный проводник
индукция	эквипотенциальный
конденсатор	элементарные частицы
напряжение	электризация
напряженность поля	электрическое поле
наэлектризованный	электромагнитные силы
обкладки конденсатора	электропроводность
однородное поле	электростатика
плоский конденсатор	электростатическая индукция
полупроводник	электростатическое поле
поверхностная плотность	

#### **1. Что возникает между чем.**

**Электромагнитные силы возникают между телами, которые имеют электрический заряд.**

**2. Что можно рассматривать как.**

Молекулы диэлектриков можно рассматривать как электрические диполи.

**3. Что характеризуется чем.**

Распределение заряда на поверхности характеризуется поверхностной плотностью заряда.

***Контрольные вопросы:***

1. Объясните явление электризации и электрической индукции с точки зрения электронной теории.
2. Чему равен элементарный электрический заряд?
3. Какие виды зарядов существуют в природе?
4. В каких единицах мы измеряем электрический заряд в системе СИ?
5. Может ли наэлектризованное тело обладать зарядом, меньшим чем заряд электрона?
6. Что происходит при контакте заряженного и незаряженного тел?
7. Как могут взаимодействовать заряженные тела?
8. Как взаимодействуют одноименные электрические заряды?
9. Как взаимодействуют разноименные электрические заряды?
10. От чего зависит модуль силы взаимодействия наэлектризованных тел?
11. Запишите математический закон взаимодействия точечных зарядов. Как его выражают словами?
12. Что такое электрическое поле?
13. Что называется напряженностью электростатического поля? Запишите формулу напряженности электростатического поля точечного заряда на расстоянии  $r$  от него.
14. Дайте определение единицы напряженности электрического поля в системе СИ.
15. Что называется линией напряженности электростатического поля?
16. Какие правила нужно соблюдать при построении электрических силовых линий?
17. Какое электрическое поле называется однородным?
18. В чем заключается принцип суперпозиции (наложения) электрических полей?
19. От чего зависит работа силы электростатического поля?
20. Что такое потенциал поля?
21. Что называют эквипотенциальной поверхностью?
22. Чему равна разность потенциалов?
23. Что такое напряжение?
24. Какие силы называют сторонними?
25. Какие вещества называют проводниками, диэлектриками, полупроводниками?
26. Что называют поляризацией?

27. Что такое диэлектрическая проницаемость?
28. Что называют электростатической индукцией?
29. Как распределяется электростатический заряд в проводнике?
30. Что называют электрической емкостью? В каких единицах она измеряется?
31. Как устроен конденсатор? Чему равна емкость плоского конденсатора?
32. Чему равна емкость конденсаторов, соединенных параллельно?
33. Чему равна емкость конденсаторов, соединенных последовательно?
34. Чему равна энергия электростатического поля?

## 9.2 Постоянный электрический ток

### 9.2.1 Электрический ток. Сила тока. Плотность тока

**Электрический ток** – это упорядоченное (направленное) движение свободных носителей заряда.

За **направление тока** принято направление, в котором двигался бы положительный заряд.

Вещества, в которых возможно такое движение, называются **проводниками электричества**.

Ток, возникающий в проводниках, называется **током проводимости**.

**Условия существования тока:**

1. Наличие свободных носителей заряда.
2. Наличие электрического поля.
3. Замкнутая электрическая цепь.

В металлах свободные носители заряда – это «свободные» электроны.

**Сила тока (I)** – скалярная физическая величина, численно равная количеству электричества (заряду  $q$ ), которое переносится за единицу времени сквозь площадь поперечного сечения проводника:

$$I = \frac{q}{t}, \quad [I] = 1 \text{ А}, \text{ (ампер)}, \quad (9.47)$$

$$q = It, \quad [q] = 1 \text{ А} \cdot \text{с} = 1 \text{ Кл}. \quad (9.48)$$

**Ампер** – сила постоянного тока, который, проходит по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга в вакууме, вызвал бы между ними силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на каждый метр их длины.

**Плотность тока ( $\vec{j}$ )** – векторная физическая величина, модуль которой равен отношению силы тока к площади сечения, через которое проходит ток:

$$j = \frac{I}{S}, \quad [j] = \frac{\text{А}}{\text{м}^2} \quad (9.49)$$

Вектор плотности тока направлен вдоль тока.

Если заряд свободного носителя заряда  $q_0$ , концентрация их в проводнике  $n$  (количество в единице объема), средняя скорость упорядоченного движения  $\bar{v}$ ; а площадь поперечного сечения проводника  $S$ , то сила тока  $I$  в проводнике равна:

$$I = q_0 n \bar{v} S. \quad (9.50)$$

Плотность тока проводимости в металлах, где  $q_0 = e$ :

$$j = ne\bar{v}. \quad (9.51)$$

**Постоянный ток** – это ток, сила и направление которого не изменяется с течением времени.

### 9.2.2 Сопротивление металлических проводников. Проводимость

**Сопротивление проводника ( $R$ )** – это собственные свойства проводника оказывать противодействие проходящему по нему току.

Единица сопротивления называется **ом** (Ом). 1 Ом – сопротивление такого проводника, в котором при напряжении на его концах 1 вольт течет ток силой 1 ампер

$$[R] = 1 \frac{\text{В}}{\text{А}} = 1 \text{ Ом}. \quad (9.52)$$

**Сопротивление металлического проводника** зависит от его размеров, материала и температуры:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (9.53)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала проводника, Ом·м;  $l$  – длина проводника, м;  $S$  – площадь поперечного сечения проводника, м<sup>2</sup>.

$\rho$  – **удельное сопротивление проводника**. Эта величина численно равна сопротивлению проводника длиной 1 м и поперечным сечением 1 м<sup>2</sup>:

$$[\rho] = 1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}, \quad (9.54)$$

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t). \quad (9.55)$$

**Термический коэффициент сопротивления ( $\alpha$ )** – относительное изменение сопротивления проводника при нагревании его на один градус.

Для чистых металлов:

$$\alpha \approx \frac{1}{273} \text{ К}^{-1} \quad (9.56)$$

У некоторых металлов и сплавов при температурах  $T_c$ , близких к абсолютному нулю (0,2 ... 25 К), удельное сопротивление становится равным нулю – **сверхпроводимость**.

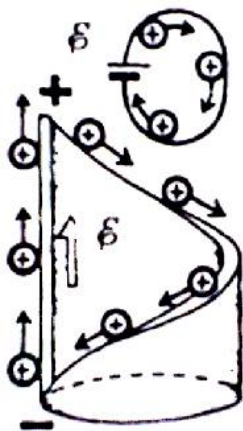
**Электрическая проводимость** проводника ( $G$ ) – это величина, обратная сопротивлению проводника:

$$G = \frac{1}{R}. \quad (9.57)$$

Электрическая проводимость измеряется единицами, называемыми сименс (См):

$$[G] = \frac{1}{\text{Ом}} = 1 \text{ См}. \quad (9.58)$$

### 9.2.3 Электродвижущая сила (ЭДС)



Для поддержания тока в проводнике на имеющиеся в нем свободные заряды должно действовать электрическое поле, создаваемое неэлектрическими сторонними силами. Такое постоянное во времени электрическое поле называют **стационарным полем**. Наличие в проводнике стационарного электрического поля равносильно существованию постоянной разности потенциалов ( $\varphi_1 - \varphi_2 = const$ ) на концах проводника. К числу источников сторонних сил (источников электропитания) относятся химические (батарейки, аккумуляторы), электромагнитные (обычные электромашинные генераторы), световые (фотоэлементы) и др. Все они преобразуют различные формы энергии в электрическую.

Рис. 9.21

При перемещении электрических зарядов производится работа.

**Источник ЭДС** – это устройство, в котором действуют сторонние силы, разделяющие заряды (рис. 9.21)

Кулоновские силы всегда соединяют разноименные заряды.

В замкнутой цепи действуют сторонние силы в источнике и кулоновские силы во всей цепи, но работа кулоновских сил в замкнутом контуре равна нулю.

**Электродвижущая сила источника** ( $\varepsilon_{ист}$ ) – скалярная физическая величина, численно равная работе сторонних сил в источнике по перенесению единичного положительного заряда через всю цепь.

$$\varepsilon_{ист} = \frac{A}{q}, \quad [\varepsilon] = 1 \text{ В} \quad (9.59)$$

Работа по перенесению заряда через всю цепь равна сумме работ по внешним участкам цепи и внутри источника (внутренний участок цепи с сопротивлением  $r$ ):

$$A = A_{внешн} + A_{внутр}. \quad (9.60)$$

$$\boxed{\varepsilon_{ист} = U_{внешн} + U_{внутр}} \quad (9.61)$$

### 9.2.4 Электрическая цепь

**Электрической цепью** называют совокупность электрических устройств, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которой могут быть описаны с помощью электрических величин – электродвижущей силы, тока и напряжения.

Для анализа процессов и расчёта электрическую цепь заменяют *эквивалентной схемой замещения (схемой цепи)*.

Участок электрической цепи, по которому проходит *один и тот же ток*, называется **ветвью**. Электрическая цепь, которая состоит из одной ветви, называется **неразветвленной**. Схема такой цепи показана на рис. 9.22, а. Если электрическая цепь состоит из нескольких ветвей, то она называется **разветвлённой**. Пример схемы такой цепи показан на рис. 9.22, б. Место соединения трёх и более ветвей называют **узлом** (точки 1, 2, 3, 4). Видно, что ветвь – это участок цепи между двумя узлами.

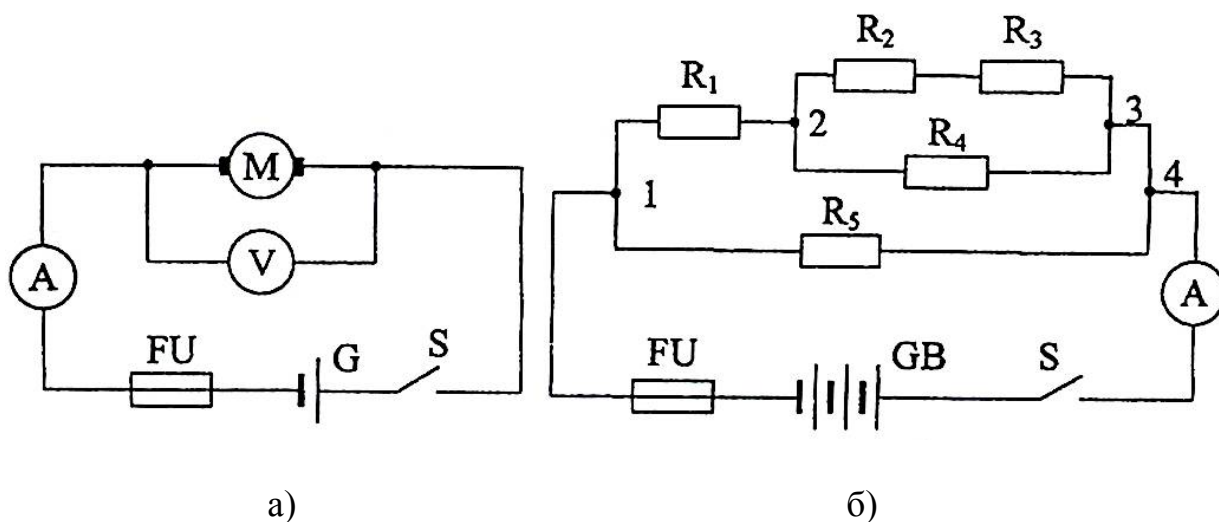
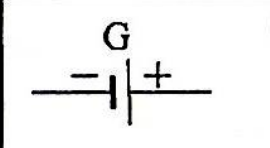
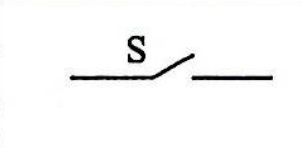
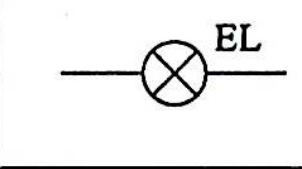
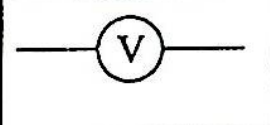


Рис. 9.22 Электрическая цепь: а – неразветвленная; б – разветвленная



Таблица 9.1

Условные обозначения некоторых элементов, которые используются в электрических схемах

	Резистор		Предохранитель плавкий
	Источник электропитания ( $\mathcal{E}$ ; $r$ )		Ключ (включатель)
	Батарея источников электропитания		Электродвигатель постоянного тока
	Амперметр		Лампа накаливания (осветительная)
	Вольтметр		Катушка индуктивности

### 9.2.5 Закон Ома

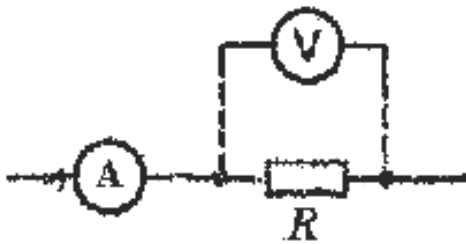


Рис. 9.23

**Закон Ома для участка цепи** (рис. 9.23): сила тока в участке цепи прямо пропорциональна приложенному напряжению  $U$  и обратно пропорциональна сопротивлению проводника  $R$ :

$$I = \frac{U}{R} \quad (9.62)$$

**Закон Ома для полной цепи:** сила тока в замкнутой цепи равна электродвижущей силе источника, деленной на полное сопротивление цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}_{\text{ист}}}{R + r} \quad (9.63)$$

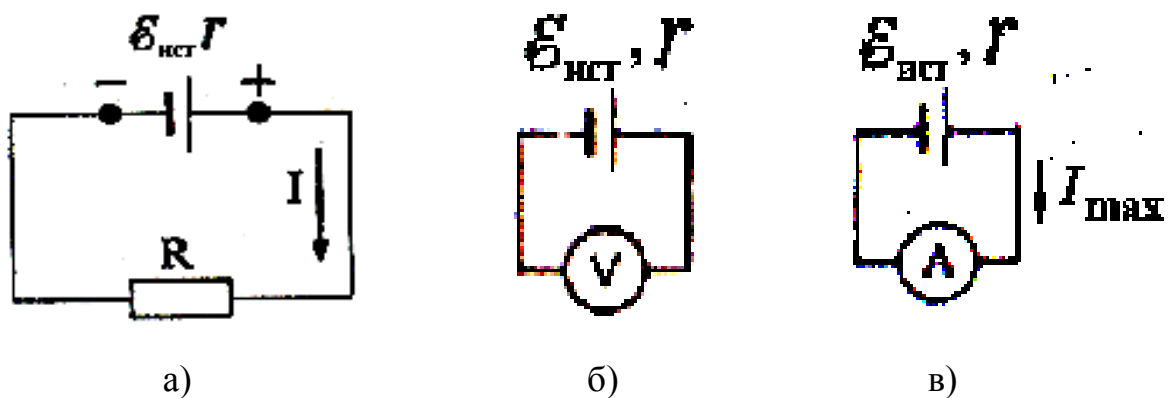


Рис. 9.24

**Следствия из закона Ома для полной цепи:**

– Напряжение на полюсах замкнутого источника ЭДС (рис. 9.24, а):

$$U = \varepsilon_{\text{ист}} - Ir. \quad (9.64)$$

– Напряжение на полюсах не замкнутого источника ЭДС (рис. 9.24,б):

$$U = \varepsilon_{\text{ист}}. \quad (9.65)$$

– Короткое замыкание источника ЭДС т.е.  $R \rightarrow 0$  (рис. 9.24, в):

$$I_{\text{max}} = \frac{\varepsilon_{\text{ист}}}{r}. \quad (9.66)$$

**КПД источника ЭДС:**

$$\eta = \frac{U}{\varepsilon_{\text{ист}}}. \quad (9.67)$$

где  $U$  – напряжение на внешнем участке цепи.

**9.2.6 Способы соединения проводников**

На практике используются электрические цепи с несколькими проводниками, которые образуют различные соединения друг с другом (последовательное, параллельное, смешанное).

**Последовательное соединение** проводников – это такое соединение, при котором на любом участке цепи проходит один и тот же ток (рис. 9.25).

При последовательном соединении проводников электрическая цепь не имеет разветвлений.

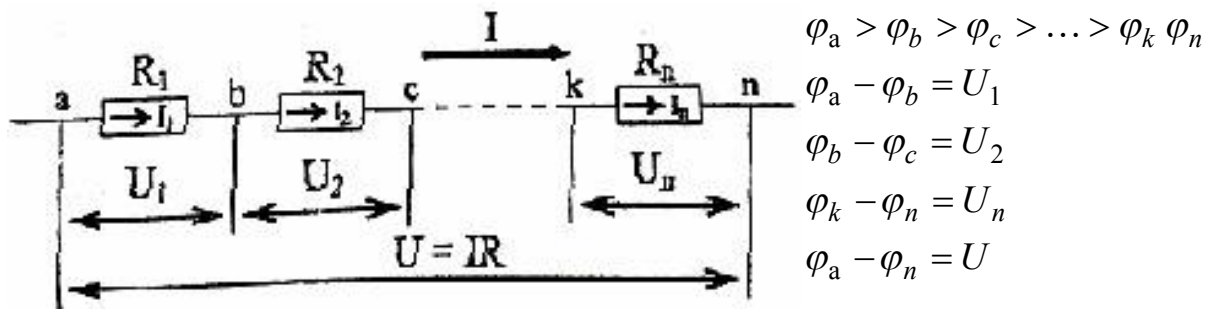


Рис. 9.25

Таблица 9.2 – Свойства последовательного соединения проводников

$I_1 = I_2 = \dots = I_n = I = const$	– через все проводники идёт один и тот же ток;
$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$ $IR = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_n$	– приложенное к концам цепи напряжение $U$ распределяется по всем проводникам;
$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ $R = \sum_{i=1}^n R_i$	– эквивалентное сопротивление всей цепи равно сумме сопротивлений отдельных участков цепи.
$U_1 : U_2 : U_n = R_1 : R_2 : R_n$	– напряжения на каждом из проводников прямо пропорциональны их сопротивлениям;

**Параллельное соединение** проводников – это такое соединение, при котором на каждый проводник действует одно и то же напряжение (рис. 9.26).

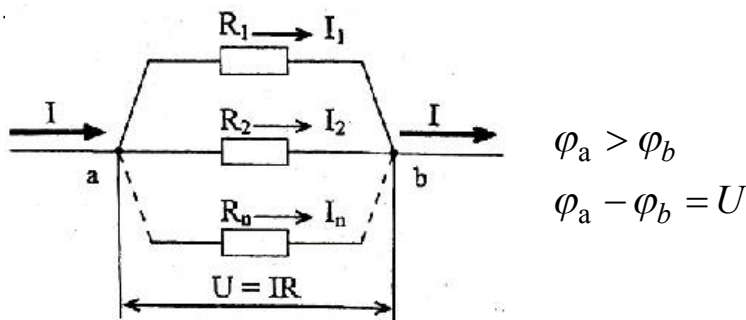


Рис. 9.26

Таблица 9.3 – Свойства параллельного соединения проводников

$U = IR = I_1 R_1 = I_2 R_2 = \dots$ $\dots = I_n R_n = const$	– напряжение на всех проводниках (ветвях) одно и то же;
$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$ $I = \sum_{i=1}^n I_i$	– ток в цепи равен сумме токов в отдельных ветвях;

Продолжение таблицы 9.3

$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$ $\frac{1}{R} = \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \right)$	<p>– эквивалентное сопротивление всей цепи меньше, чем минимальное сопротивление одной из ветвей;</p>
$G = G_1 + G_2 + \dots + G_n$ $G = \sum_{i=1}^n G_i$	<p>– общая электропроводность параллельного разветвления равна сумме электропроводностей его ветвей;</p>
$I_1 : I_2 : I_n = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_n}$	<p>– силы тока в отдельных ветвях разветвления обратно пропорциональны сопротивлениям этих ветвей.</p>

**Параллельное соединение** – основной способ включения в электрическую цепь различных потребителей.

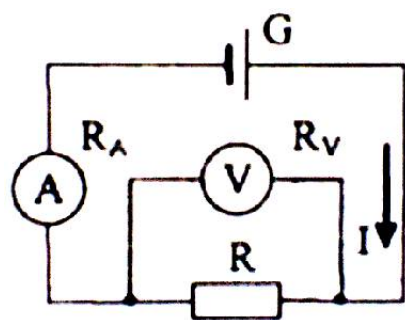


Рис. 9.27

**Электроизмерительные приборы** (амперметр, вольтметр) представляют собой проводники со своими сопротивлениями  $R_A$  и  $R_V$ . Для измерения силы тока в цепь последовательно включают амперметр. Для измерения напряжения на участке цепи  $R$  параллельно этому участку включают вольтметр (рис. 9.27). Чтобы подключение этих приборов существенно не изменяло величину (силу тока, напряжение), делают:

а) сопротивление амперметра маленьким  $R_A \ll R$ ;

б) сопротивление вольтметра большим  $R_V \gg R$ .

**Расчет шунтов и добавочных сопротивлений**

На шкалах приборов обозначены максимальное (номинальное) значение силы тока амперметра  $I_A$ , допустимое для измерения, и их внутреннее сопротивление  $R_A$ . Если нужно измерить силу тока  $I > I_A$  в  $n$  раз, то то параллельно амперметру включают малое сопротивление  $R_{Ш}$ , которое называют *шунтом* (рис. 9.28). Отношение  $I / I_A$  называется коэффициентом шунтирования  $n (n = I / I_A)$ .

Сопротивление шунта вычисляют по формуле

$$R_{Ш} = R_A / (n - 1) \tag{9.68}$$

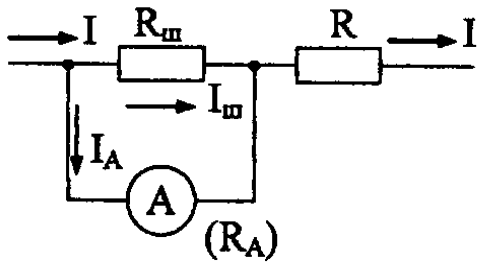


Рис. 9.28

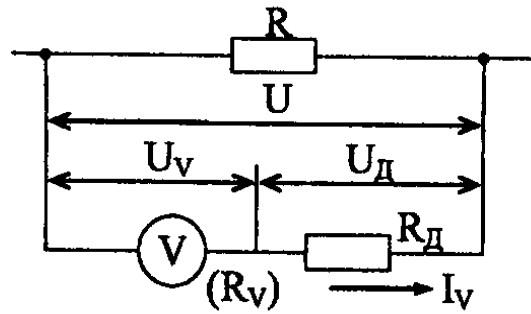


Рис. 9.29

Если необходимо измерить напряжение  $U$ , которое в  $k$  раз больше напряжения  $U_V$ , которое в  $k$  раз больше напряжения  $U_V$ , указанного на шкале вольтметра, то *последовательно* с вольтметром включают **добавочное сопротивление**  $R_Д$  (рис. 9.29). Отношение  $U / U_V$  называется *коэффициентом расширения пределов измерения вольтметра*  $k$  ( $k = U / U_V$ ).

Значение добавочного сопротивления вычисляют по формуле

$$R_Д = R_V (k - 1) \quad (9.69)$$

### 9.2.7 Соединения источников электропитания (источников ЭДС)

Для получения большего напряжения либо большей мощности во внешней цепи несколько источников электропитания соединяют в *батареи*. Обычно батарею составляют из  $n$  однородных (одинаковых) источников. Тогда мощность всей батареи  $P_Б = I_Б \cdot \varepsilon_Б$  будет в  $n$  раз больше мощности одного источника  $P_i = I_i \cdot \varepsilon_i$ :

$$P_Б = nP_i \text{ или } I_Б \cdot \varepsilon_Б = nI_i \cdot \varepsilon_i. \quad (9.70)$$

На рис. 9.30 показано последовательное соединение источников ЭДС. – При последовательном соединении элементов в батарею электродвижущая сила батареи равна алгебраической сумме ЭДС элементов:

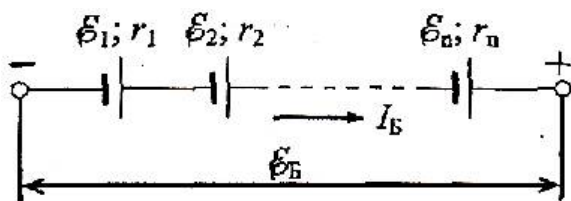


Рис. 9.30

$$\varepsilon_Б = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n. \quad (9.71)$$

$$P_Б = I_i (n\varepsilon_i) \quad (9.72)$$

т.е.  $\varepsilon_Б = n\varepsilon_i, I_Б = I_i$ ;

$$I = \frac{n\varepsilon_i}{R + nr_i} = \frac{\varepsilon_i}{\frac{R}{n} + r_i} \quad (9.73)$$

На рис. 9.31 показано параллельное соединение источников ЭДС, когда соединены вместе все одноимённые полюса источников.

- При параллельном соединении элементов с одинаковой ЭДС электродвижущая сила батареи равна ЭДС одного элемента:

$$I_B = nI_i, \quad \varepsilon_B = \varepsilon_i; \quad (9.74)$$

$$P_B = I_i(nI_i)\varepsilon_i \quad (9.75)$$

$$I = \frac{\varepsilon_i}{R + r_i/n} = \frac{n\varepsilon_i}{nR + r_i} \quad (9.76)$$

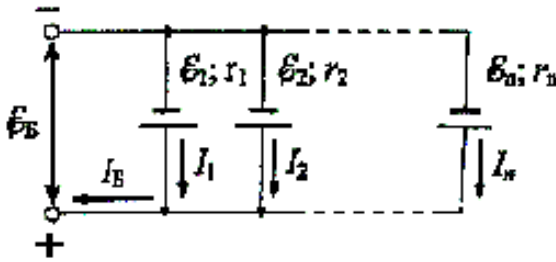


Рис. 9.31

### 9.2.8 Работа и мощность тока. Закон Джоуля-Ленца

Работа и мощность электрического тока в полной цепи (численно равной израсходованной источником энергии по созданию электрического тока):

$$A_{\text{полн}} = I\varepsilon t; \quad (9.77)$$

$$P_{\text{полн}} = \frac{A_{\text{полн}}}{t} = I\varepsilon = I(U + Ir) = I^2(R + r). \quad (9.78)$$

Полезная работа и мощность электрического тока на внешнем участке цепи (на потребителе)

$$A_{\text{внеш}} = IUt = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t, \quad (9.79)$$

$$P_{\text{внеш}} = \frac{A}{t} = IU = I^2R = \frac{U^2}{R}, \quad (9.80)$$

$$[P] = 1\text{А} \cdot \text{В} = 1\text{Вт}.$$

**Закон Джоуля-Ленца.** Количество теплоты, выделяемое в проводнике с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени прохождения по нему тока:

$$Q = I^2Rt. \quad (9.81)$$

Если в проводнике ток производит только тепловое действие, то  $A=Q$ :  
Коэффициент полезного действия (КПД) цепи

$$\eta = \frac{P_{\text{внеш}}}{P_{\text{полн}}} = \frac{U}{\varepsilon} = \frac{R}{R + r}. \quad (9.82)$$

## *Новые слова, словосочетания и языковые конструкции*

амперметр	сверхпроводимость
ветвь	сила тока
вольтметр	сопротивление
замкнутый	схема замещения
источник электропитания	схема цепи
катушка индуктивности	узел
ключ	упорядоченные
лампа накаливания	участок цепи
неразветвленная	эквивалентный
носитель заряда	электрический ток
плотность тока	электрическая цепь
постоянный ток	электроизмерительные приборы
предохранитель	электромотор
проводимость	электропроводность
разветвленная	

### **1. Что заменяют чем.**

Электрическую цепь заменяют эквивалентной схемой замещения (схемой цепи).

### ***Контрольные вопросы:***

1. Что такое электрический ток?
2. При каких условиях может существовать длительный электрический ток?
3. Какие свободные носители зарядов участвуют в электрическом токе в металлах? В жидкостях? В газах?
4. Дайте определение силы тока как физической величины. В каких единицах она измеряется?
5. Что называется плотностью тока? В каких единицах она выражается?
6. Какой электрический ток называется постоянным?
7. Дайте определение электрического сопротивления проводника как физической величины. В каких единицах оно измеряется?
8. От чего зависит сопротивление данного проводника?
9. Какая зависимость сопротивления проводника от температуры?
10. Что называется электропроводностью проводника и в каких единицах она выражается?
11. Что такое источник электропитания (источник электродвижущей силы)?
12. Назовите примеры разных источников электропитания.
13. Дайте определение ЭДС. В каких единицах она измеряется?
14. Назовите основные характеристики (параметры) источника электропитания.

15. Чему равна работа источника питания?
16. Что такое электрическая цепь?
17. Чем отличается замкнутая электрическая цепь от разомкнутой?
18. Какая электрическая цепь называется разветвленной? Неразветвленной?
19. Нарисуйте схему включения амперметра и вольтметра в цепь.
20. Почему амперметр включают в цепь последовательно, а вольтметр параллельно участку цепи?
21. Сформулируйте закон Ома для металлического проводника (участка цепи).
22. Что называется напряжением (падением напряжения) на участке цепи?
23. Какое соединение проводников называется последовательным? Чему равно эквивалентное соединение двух проводников, соединенных последовательно?
24. Какое соединение проводников называется параллельным? Как найти эквивалентное сопротивление двух проводников, соединенных параллельно?
25. Какое соединение проводников в цепи дает наименьшее (минимальное) сопротивление цепи?
26. Какое соединение проводников в цепи дает наибольшее (максимальное) сопротивление цепи?
27. Как измерить ток силой  $10\text{ А}$  амперметром, рассчитанным на  $1\text{ А}$ ?
28. Что нужно сделать, чтобы вольтметром, рассчитанным на  $1\text{ В}$ , измерить напряжение  $110\text{ В}$ ?
29. С какой целью несколько источников питания соединяют в батарею?
30. Чему равна ЭДС пяти одинаковых источников при их последовательном соединении? При параллельном соединении?
31. Запишите три формулы для вычисления работы электрического тока. Как зависит работа от сопротивления?
32. Как подсчитать электрическую мощность на данном участке цепи?
33. В какой вид энергии превращается электрическая энергия на участке цепи, где включен металлический проводник?
34. Сформулируйте закон Джоуля Ленца для теплового действия тока.
35. Какая работа и мощность электрического тока в цепи называется полезной?
36. Какая работа и мощность электрического тока в цепи называется полной (или затраченной)?
37. По какой формуле можно вычислить коэффициент полезного действия (КПД) цепи?
38. Почему КПД электрической цепи всегда меньше единицы?



## 9.3 Токи проводимости

### 9.3.1 Электрический ток в металлах. Контактная разность потенциалов

**Ток в металлах** – упорядоченное перемещение свободных электронов под действием электрического поля:

$$I = en\vec{v}S, \quad (9.83)$$

где  $e$  – заряд электрона;  $n$  – концентрация свободных электронов,  $\vec{v}$  – скорость дрейфа электронов.

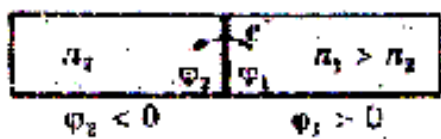


Рис. 9.32

**Контактная разность потенциалов** возникает при контакте различных металлов (рис. 9.32) и близка к линейной функции абсолютной температуры.

**Термопара** – цепь из двух различных металлов (сплавов), в которой возникает термоэлектродвижущая сила, прямо пропорциональная разности температур ( $T_2 - T_1$ ) в контактах  $A, B$  (рис. 9.33):

$$\varepsilon_{\text{терм}} = U_{1,2} + U_{2,1}, \quad (9.84)$$

$$I = \frac{\varepsilon_{\text{терм}}}{R}. \quad (9.85)$$

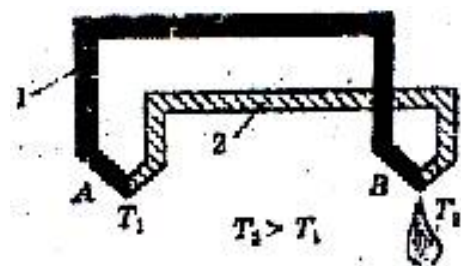


Рис. 9.33

**Термобатарея** – последовательное соединение нескольких термопар.

### 9.3.2 Электрический ток в электролитах. Законы электролиза

**Электролиты** – это водные растворы солей, кислот и оснований, а также их расплавы, в которых носителями тока являются ионы.

Например, это раствор  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CuSO}_4$ , расплав  $\text{NaOH}$ .

**Механизм ионной проводимости:** под действием электрического поля положительные ионы двигаются к катоду (катионы), а отрицательные – к аноду (анионы) и замыкают электрическую цепь. При этом вместе с зарядом переносится вещество (рис. 9.34).

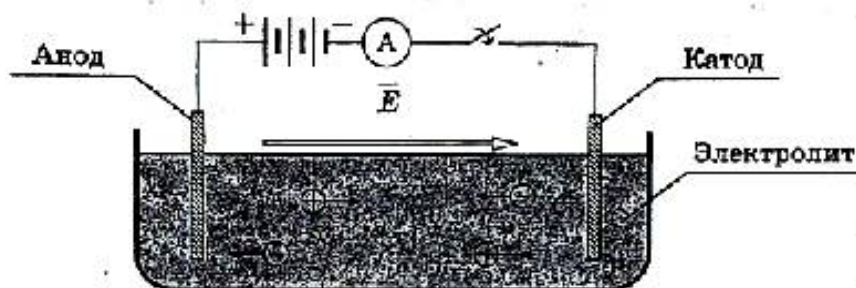


Рис. 9.34

**Электролиз** – выделение вещества на электродах при прохождении тока через электролит. Электролиз сопровождается окислительно-восстановительными реакциями.

**Закон электролиза (закон Фарадея):** масса выделенного на электроде вещества прямо пропорциональна прошедшему через электролит заряду:

$$m = kq, \text{ или } m = kIt. \quad (9.86)$$

(поскольку  $q = It$ , где  $I$  – сила постоянного тока, протекающего через раствор за время  $t$ ).

Коэффициент пропорциональности  $k$  называется **электрохимическим эквивалентом вещества**.

Электрохимические эквиваленты веществ прямо пропорциональны отношениям их атомных (молярных) масс  $M$  к валентности  $n$ :

$$k = \frac{M}{neN_A}, \quad (9.87)$$

$$[k] = \frac{\text{КГ}}{\text{Кл}}. \quad (9.88)$$

Величина  $F = eN_A$  называется **числом (постоянной) Фарадея**.

Постоянная Фарадея равна электрическому заряду, который нужно пропустить через электролит для выделения на электроде массы любого вещества, равной в килограммах отношению  $M/n$ .

Значение числа Фарадея в СИ:

$$eN_A = F; \quad F = 9,648 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}. \quad (9.89)$$

**Объединенный закон электролиза Фарадея:**

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} It, \text{ или } m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} q, \quad (9.90)$$

Из объединенного закона электролиза определяется электрический заряд  $q$  любого иона:

$$q = \pm \frac{nF}{N_A}, \quad (9.91)$$

где  $n$  – валентность иона,  $F$  – постоянная Фарадея,  $N_A$  – число Авогадро.

Заряд одновалентного иона ( $n = 1$ ) равен по абсолютному значению заряду электрона:

$$q = e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}. \quad (9.92)$$

Любой электрический заряд является кратным элементарному заряду  $e$ .

**ЭДС поляризации.** Металлические электроды диссоциируют в электролит в виде положительных ионов. При этом на электродах освобождаются электроны. В результате возникают сторонние силы, противоположные сторонним силам источника тока.

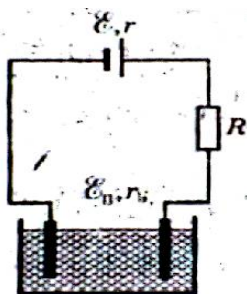


Рис. 9.35

Мерой удельной работы ( $\frac{A_{\text{стор}}}{q}$ ) этих сил является величина, называемая ЭДС поляризации (рис. 9.35):

$$I = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{\text{п}}}{R + r_3 + r} \quad (9.93)$$

### Применение электролиза.

#### 1. Гальванотехника:

- а) **гальваностегия** – покрытие деталей тонким слоем металла (золочение, никелирование, хромирование и т.п.);
  - б) **гальванопластика** – отложение толстого слоя металла, который отслаивается и используется самостоятельно (получение матриц для печатных пластинок, барельеф и т.п.).
2. **Электрометаллургия** – выделение чистых металлов из природных смесей (меди из медного колчедана, алюминия из расплавленного боксита, серебра из отходов фотопроизводства).
  3. **Очистка металлических деталей** (деталь является анодом).

### 9.3.3 Электрический ток в газах. Газовый разряд. Понятие о плазме

Газы в нормальных условиях являются диэлектриками. Носители электрического тока в газах могут возникать только при ионизации газов – отрыве от их атомов или молекул электронов. При этом атомы (молекулы) газов превращаются в положительные ионы. Отрицательные ионы в газах могут возникнуть, если атомы (молекулы) присоединят к себе электроны.

**Газовый разряд** – прохождение электрического тока через газы:

**Несамостоятельный газовый разряд** – электропроводность газов, вызванная внешними ионизаторами: сильного нагревания, ультрафиолетовых и рентгеновских лучей, радиоактивных излучений, при бомбардировке атомов (молекул) газов быстрыми электронами или ионами.

**Самостоятельный газовый разряд** – это газовый разряд, который продолжается после того, как прекращается действие внешнего ионизатора. Он поддерживается и развивается за счет ионов и электронов, возникших, главным образом, в результате ударной ионизации.

**Ударной ионизацией (ионизацией электронным или ионным ударом)** называется отрыв от атома (молекулы) газа одного или

нескольких электронов, вызванный соударением с атомами (или молекулами) газа электронов или ионов, разогнанных электрическим полем в разряде. Ударная ионизация одноатомного газа электронами или ионами возможна при выполнении условия:

$$\frac{mv^2}{2} \geq A_{и} \left(1 + \frac{m}{M}\right), \quad (9.94)$$

где  $m$  – масса ионизирующей частицы,  $\frac{mv^2}{2}$  – её кинетическая энергия,  $A_{и}$  – работа ионизации,  $M$  – масса атома. Для того чтобы одновалентный ион произвел ударную ионизацию, он должен пройти в ускоряющем электрическом поле бóльшую разность потенциалов  $\varphi$ , чем электрон. Это видно из того, что:

$$\frac{mv^2}{2} = e\varphi \text{ и } \frac{m_{иона}}{M} \gg \frac{m_{эл}}{M}. \quad (9.95)$$



Рис. 9.36

Несамостоятельный газовый разряд (рис. 9.36) переходит в самостоятельный при напряжении  $U_3$  между электродами, называемом **напряжением зажигания**. Процесс такого перехода называется **электрическим пробоем газа**.

**Электрическая дуга** является формой разряда, возникающего при большой плотности тока и сравнительно небольшом *напряжении между электродами*. Применение электрической дуги:

электросварка, электрорезка, мощные источники света.

**Плазма** – *частично или полностью ионизированный газ*. Плазма возникает при всех видах газовых разрядов: тлеющем, дуговом, искровым.

В лампах дневного освещения и других осветительных трубках используют плазму положительного столба тлеющего разряда.

Газоразрядную плазму используют в газовых лазерах – квантовых источниках света.

Наиболее значительные перспективы физики видят в использовании высокотемпературной плазмы (с температурой до десятков миллионов градусов) в управляемых термоядерных реакциях.

Плазмой окружена наша планета. Верхний слой атмосферы на высоте 100 – 300 км представляет собой ионизированный газ – ионосферу.

В плазменном состоянии находится 99 % веществ во Вселенной.

**Молния** – плазменный шнур, замыкающий наэлектризованные тучи или наэлектризованную тучу и Землю. Сила тока в молнии достигает 500 000 А, а разность потенциалов между тучей и Землей – 100 000 000 В.

### 9.3.4 Электрический ток в вакууме (ток переноса)

**Вакуум** – газ, разреженный до такой степени, что средняя длина свободного пробега молекул превышает линейные размеры сосуда.

В вакууме практически отсутствуют свободные носители заряда.

Ток в вакууме возможен только за счет заряженных частиц, возникающих при эмиссионных явлениях.

**Термоэлектронная эмиссия** – испускание электронов твердыми и жидкими телами при их нагревании. Вылетают электроны, кинетическая энергия которых больше или равна работе выхода их из металла (работе по преодолению связей электрона с металлом) (рис. 9.37).



Рис. 9.37

**Фотоэлектронная эмиссия** – вырывание электронов с поверхности тела под действием света.

**Вторичная эмиссия** – выбивание электронов из металлов в вакууме при его бомбардировке заряженными частицами.

**Электронные лампы** – это устройства, основанные на применении явления термоэлектронной эмиссии.

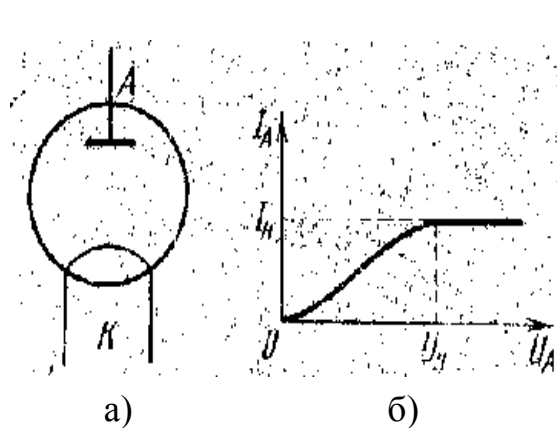


Рис. 9.38

Простейшим типом электронных ламп является двухэлектродная лампа – **диод прямого накала**, который изображается схематически, как показано на рис. 9.38, а. Если анод лампы (А) присоединить к положительному полюсу источника постоянного тока, а катод (К) – к отрицательному, то в цепи лампы устанавливается постоянный термоэлектронный ток  $I_A$ .

**Вольт-амперная характеристика диода прямого накала** (рис. 9.38, б). Ток насыщения  $I_n$  достигается тогда, когда все термоэлектроны переносятся от катода к аноду.

Итак, вакуумный **диод** обладает односторонней проводимостью, что позволяет использовать его как выпрямитель.

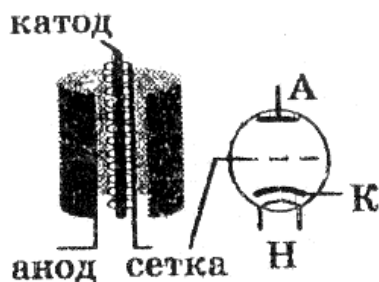


Рис. 9.39

В трехэлектродных вакуумных лампах (триодах) содержится еще один электрод (сетка, управляющий электрод). Изменение разности потенциалов между сеткой и катодом приводит к изменению тока через лампу. Подавая «на вход» лампы (катод-сетка) слабый переменный электрический сигнал, получают «на выходе» (катод-анод) усиленный сигнал такой же формы, как у входного сигнала.

Вакуумный триод благодаря наличию сетки может использоваться в роли усилителя.

**Электронно-лучевая трубка** – основной элемент телевизора, монитора в компьютере.

Электронно-лучевая трубка с электростатическим управлением (рис. 9.40) – основной элемент **осциллографа** – прибора для исследований быстропеременных процессов в электрических цепях.

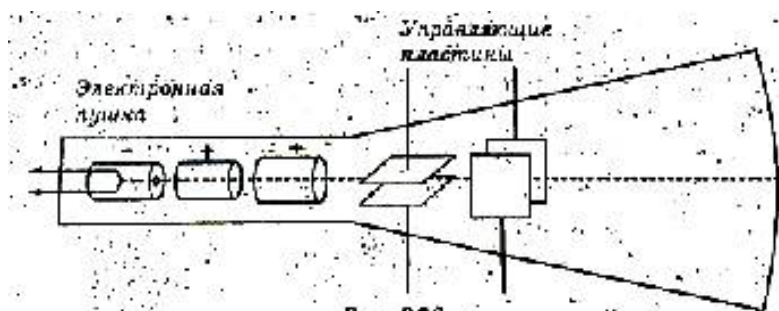
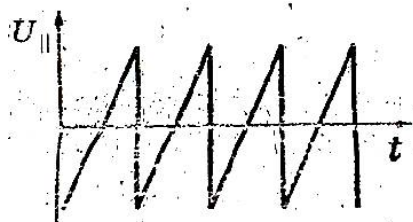
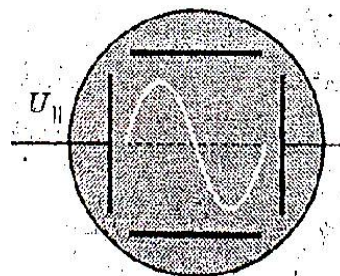


Рис. 9.40

Из электронной пушки, где электроны испускаются нитью накала и ускоряются электрическим полем электродов, сфокусированный и ускоренный пучок электронов направляется в центр экрана и в месте попадания вызывает его свечение. На вертикальные управляющие пластины



а)



б)

Рис. 9.41

подается пилообразное напряжение (рис. 9.41, а), благодаря которому электронный пучок отклоняется и прописывается на экране

горизонтальную светящуюся линию. Если при этом на горизонтальные отклоняющие пластины подается переменное напряжение, то линия на экране изгибается в соответствии с формой напряжения. Например, если на горизонтальные пластины подают синусоидальное напряжение, то на экране наблюдается синусоидальная кривая (рис. 9.41, б).

В телевизионных трубках управление электромагнитное: отклонение пучка происходит под действием силы Лоренца.

### 9.3.5. Электрический ток в полупроводниках

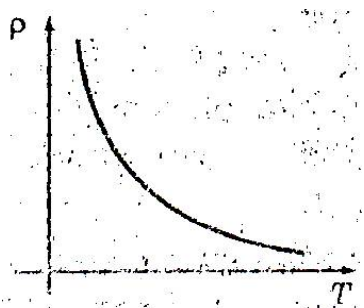


Рис. 9.42

**Полупроводники** (Ge, Si и др.) – вещества, по проводимости находящиеся между проводниками и диэлектриками. В отличие от проводников (металлов) сопротивление полупроводников резко возрастает при понижении температуры (рис. 9.42).

**Типы полупроводников.** Чистые полупроводники (кремний, германий) имеют собственную электронную проводимость возникающую в результате разрыва ковалентной

связи в кристаллах и появлению свободных электронов.

Разрыв ковалентной связи может быть вызван:

- а) нагреванием – терморезисторы, термометры, термореле;
- б) освещением – люксометры, фотореле;
- в) действием сильных электрических полей.

Существует два механизма собственной проводимости – электронная и дырочная.

**Электронная проводимость** осуществляется направленным перемещением в межатомном пространстве свободных электронов, покинувших на валентную оболочку атома в результате нагревания полупроводника или под действием внешних полей.

Вакантное электронное состояние в атоме, образовавшееся при возникновении свободного электрона, обладает положительным зарядом и называется *дыркой*. Валентный электрон соседнего атома, притягиваясь к дырке, может перескочить на нее (*рекомбинировать*). При этом на её прежнем месте образуется новая дырка, которая затем может аналогично перемещаться по кристаллу.

**Дырочная проводимость** осуществляется при направленном перемещении валентных электронов между электронными оболочками соседних атомов на вакантные места (дырки).

Собственная проводимость полупроводников обычно невелика, так как мало число свободных зарядов.

### Донорные и акцепторные примеси.

**Примеси в полупроводнике** – атомы посторонних химических элементов, содержащиеся в основном полупроводнике.

Дозированное введение в чистый полупроводник примесей позволяет целенаправленно изменять его проводимость.

**Примесная проводимость** – проводимость полупроводников, обусловленная внесением в их кристаллические решетки примесей.

Изменяя концентрацию атомов примеси, можно значительно изменить число носителей заряда того или иного знака.

Знак носителей заряда определяется валентностью атомов примеси. Различают *донорные* (от лат. donor – дарить) и *акцепторные* (от лат. acceptor – принимать) примеси. Валентность атомов донорной примеси больше валентности основного полупроводника. Валентность атомов акцепторной примеси меньше валентности основного полупроводника.

Полупроводник с акцепторной примесью называют *полупроводником p-типа* (от лат. positivus – положительный), так как дырка имеет положительный заряд.

Полупроводник с донорной примесью называют *полупроводником n-типа* (от лат. negativus – отрицательный), так как он обладает преимущественно электронной проводимостью.

В месте контакта примесных полупроводников образуется особый слой: **p–n-переход**.

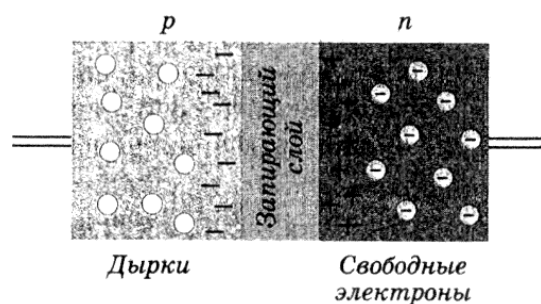


Рис. 9.43 Полярность напряжения

на *p–n-переходе* (рис. 9.43), препятствующее свободному разделению зарядов.

Напряженность поля этого запирающего слоя направлена от *n-* к *p-* полупроводнику (от плюса к минусу).

Способность *p–n-перехода* пропускать ток практически только в одном направлении используется для преобразования (с помощью диода) переменного тока, изменяющего свое направление, в постоянный (точнее пульсирующий) ток одного направления.

Характерной особенностью *p–n-перехода* является его односторонняя проводимость: он пропускает ток практически только в одном направлении (от полупроводника *p*-типа к полупроводнику *n*-типа).

Таким образом, в *p–n-переходе* образуется **запирающий слой** – двойной слой разноименных электрических зарядов, создающий



### Полупроводниковый диод. Выпрямление переменного тока.

Для преобразования переменного тока в постоянный в электронных системах используется *полупроводниковый диод*.

**Полупроводниковый диод** – элемент электрической системы, содержащий *p-n-переход* и два вывода для включения в электрическую цепь.



Рис. 9.44

На электрических схемах полупроводниковый диод изображается символом (9.44), в котором направлении стрелки соответствует направлению прямого тока через диод (от *p*- к *n*-полупроводнику).

Разность потенциалов на запирающем слое у германия оказывается порядка  $U_3 = 0,3 \text{ В}$ .

В некотором смысле запирающий слой аналогичен заряженному конденсатору.

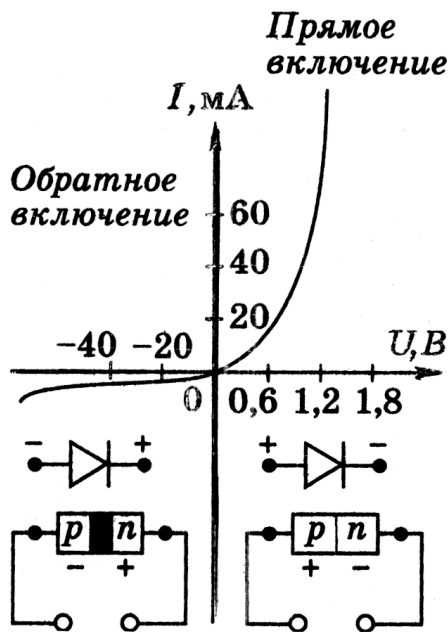


Рис. 9.45 Вольт-амперная характеристика *p-n*-перехода

Приложение к *p-n*-переходу напряжения противоположной полярности – *прямое включение*: плюс – к *p*-полупроводнику и минус – к полупроводнику *n*-типа, ослабляет запирающее поле. При этом на контакте вновь возникает движение зарядов электронов из *n*- в *p*-область, а дырок – из *p*- в *n*-область. При прямом включении *p-n*-перехода в цепь к источникам напряжения электрический ток протекает в прямом направлении: из *p*- в *n*-область. Чем больше приложенное напряжение, тем больше сила тока. Сила тока через *p-n*-переход резко возрастает, когда приложенная разность потенциалов превосходит напряжение на запирающем слое, т.е. при  $U > U_3$ .

*Обратное включение p-n-перехода*, когда плюс внешнего источника напряжения подсоединяется к *n*-проводнику, а минус – к *p*-полупроводнику, увеличивает запирающее напряжение. Увеличение запирающего напряжения блокирует движение *основных носителей тока* (заряженных частиц, имеющих максимальную концентрацию) – электронов из *n*-области и дырок из *p*-области. Поэтому незначительный ток в *p-n*-переходе может протекать лишь вследствие движения неосновных носителей (заряженных частиц, концентрация которых значительно меньше концентрации основных носителей) – свободных электронов из *p*-области и дырок из *n*-области. Небольшая

концентрация неосновных носителей приводит к тому, что при обратном включении ток через  $p-n$ -переход оказывается пренебрежимо малым.

Зависимость силы тока через  $p-n$ -переход от напряжения, приложенного к нему, или вольт-амперная характеристика  $p-n$ -перехода. приведена на рис. 9.45.

**Транзистор** – это устройство из трех полупроводниковых кристаллов с примесной проводимостью. В транзисторах различного типа чередование кристаллов различно:  $n-p-n$  или  $p-n-p$  (рис. 9.46, а, б).

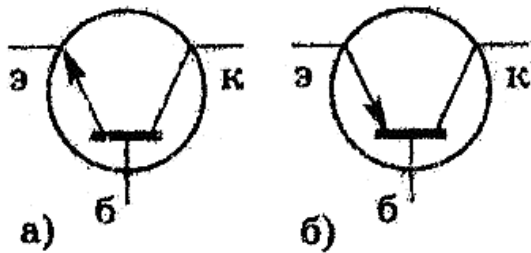


Рис. 9.46

- а)  $(n-p-n)$ -транзистора
- б)  $(p-n-p)$ -транзистора

Транзисторы в основном используют для генерирования и усиления радиосигналов. Транзистор ( $n-p-n$ ) по принципу действия подобен вакуумному триоду (рис. 9.47, а, б).

Левый  $n$ -кристалл по своей роли похож на катод вакуумного триода и называется **эмиттером**;

правый  $n$ -кристалл подобен аноду и называется **коллектором**;

$p$ -кристалл подобен сетке и называется **базой**. Меняя разность потенциалов между эмиттером и базой (подавая на них изменяющееся  $U_{вх}$ ), можно управлять коллекторным током.

Транзисторы ( $p-n-p$ ) также используются во многих схемах, но объяснение принципа их действия сложнее (приходится говорить об эмиссии дырок, а не электронов).

**Достоинства** полупроводниковых диода и триода: малые размеры, большие механическая прочность и долговечность, невысокое рабочее напряжение.

**Недостаток** – резкая зависимость электрических характеристик от температуры окружающей среды.

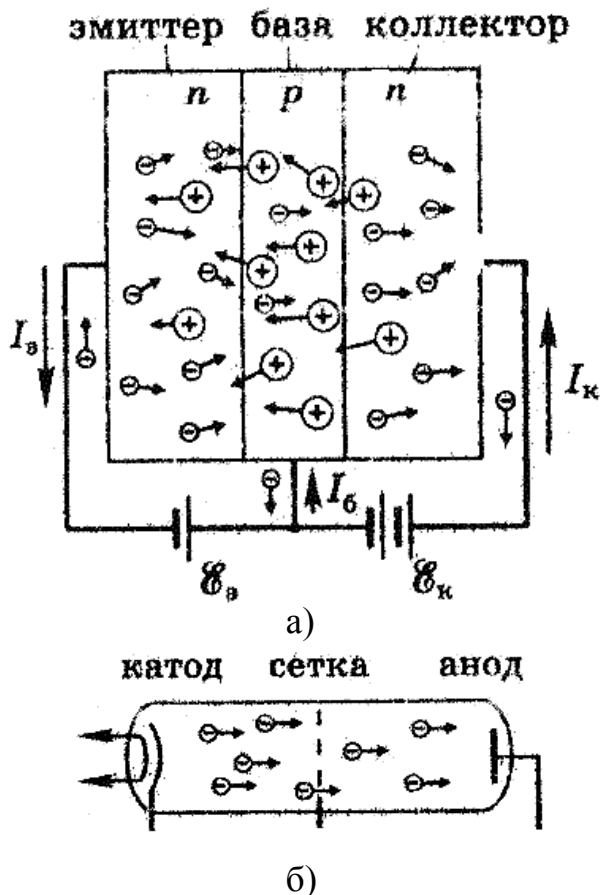


Рис. 9.47 а) транзистор; б) триод

## *Новые слова, словосочетания и языковые конструкции*

анод	разряд несамостоятельный
вакуум	разряд самостоятельный
вольт-амперная	термобатарея
гальванопластика	термопара
гальваностегия	ток переноса
гальванотехника	трубка
зажигание	ударная ионизация
ионная проводимость	характеристика
катод	эквивалент
контактная	электролиз
лазер	электролит
молния	электронно-лучевая
осциллограф	электрохимический
плазма	эмиссия вторичная
поляризация	эмиссия термоэлектронная
разряд	эмиссия фотоэлектронная
разряд газовый	

### **1. Что возникает когда.**

**Контактная разность потенциалов возникает при контакте различных металлов.**

### **2. Что используют где.**

*Газоразрядную лампу используют в газовых лазерах.*

### ***Контрольные вопросы:***

1. Какие свободные носители участвуют в электрическом токе в твердых телах? В жидкостях? В газах?
2. От чего зависит ток в металлах?
3. Когда возникает контактная разность потенциалов? Что такое термопара?
4. Что называется электролитом?
5. Какой процесс называется электролизом?
6. Как возникают носители тока в жидкостях?
7. От чего зависит сопротивление электролита?
8. Сформулируйте первый и второй законы Фарадея.
9. Чему равно число Фарадея?
10. Какие свободные носители участвуют в электрическом токе в газе?
11. Какой процесс называется рекомбинацией ионов?
12. Когда появляется ток насыщения в газе?
13. Какой разряд называется самостоятельным? Самостоятельным?
14. Что такое плазма?
15. Опишите явление термоэлектронной эмиссии.

16. Как можно увеличить ток насыщения при термоэлектронной эмиссии?
17. Опишите устройство термоэлектронной лампы.
18. Какими свойствами обладают катодные лучи?
19. Опишите устройство электроннолучевой трубки.
20. Опишите принцип работы и свойства чистых полупроводников.
21. Опишите принцип работы и свойства примесных проводников.
22. Почему диод обладает односторонней проводимостью?
23. Начертите схему триода.

## 10 ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

### 10.1 Магнитное поле. Магнитная индукция

**Магнитное поле** – это вид материи (частный вид электромагнитного поля), основной особенностью которой является силовое действие на движущиеся тела или частицы, обладающие электрическим зарядом, и на частицы, обладающие магнитным моментом.

Магнитное поле:

- 1) определяет магнитное взаимодействие, которое возникает:
  - между двумя токами;
  - между током и движущимся зарядом;
  - между двумя движущимися зарядами.
- 2) создается:
  - токами;
  - магнитами;
  - движущимися зарядами.
- 3) влияет на внесенные в него:
  - токи;
  - магниты;
  - движущиеся заряды.

**Магнитная индукция** ( $\vec{B}$ ) – это векторная физическая величина, которая определяет силовые свойства магнитного поля.

Направление вектора  $\vec{B}$  в каждой точке магнитного поля совпадает:

- с направлением оси (S-N) магнитной стрелки (рис. 10.1, а);
- с нормалью  $\vec{n}$  к витку с током (рис. 10.1, б).

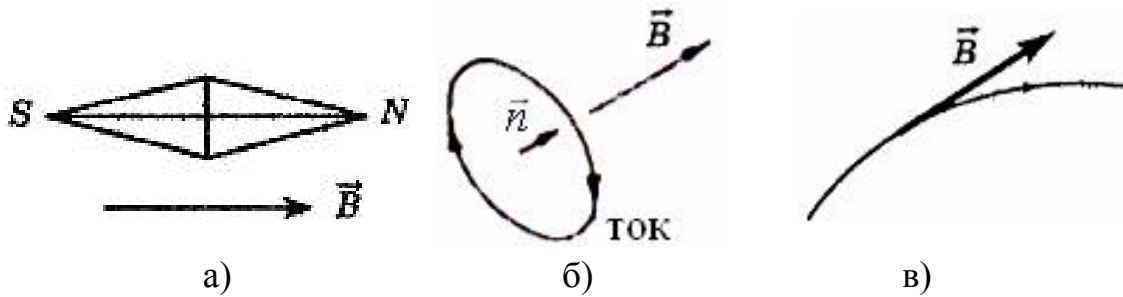


Рис. 10.1

Магнитное поле графически изображается линиями магнитной индукции (магнитными силовыми линиями).

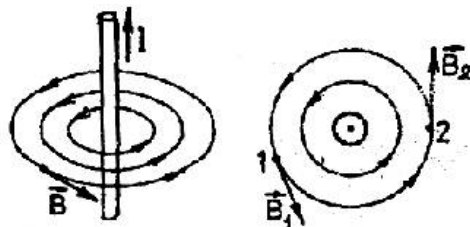
**Линии магнитной индукции** – непрерывные линии, касательные к которым в каждой точке совпадают по направлению с вектором магнитной индукции. Эти линии всегда замкнуты, поскольку магнитное поле вихревое (рис. 10.1, в).

### 10.1.1 Магнитная индукция прямого, кругового тока и соленоида

Магнитная индукция определяется по закону Био-Савара-Лапласа.

**Магнитная индукция прямолинейного бесконечной длины проводника с током** (рис. 10.2):

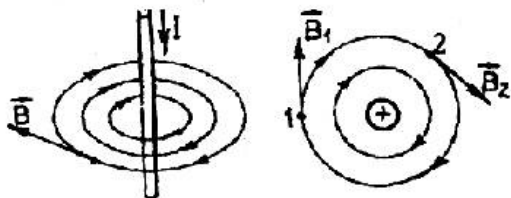
$$B = \mu \mu_0 \frac{I}{2\pi r} \quad (10.1)$$



$r$  – расстояние от проводника до точки, в которой определяется индукция.

Здесь  $\mu_0$  – магнитная постоянная (коэффициент):

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}, \quad (10.2)$$



$\mu$  – магнитная проницаемость среды – число, определяющее, во сколько раз магнитная индукция поля в среде больше (или меньше) магнитной индукции поля в вакууме:

$$\mu = \frac{B}{B_0} \quad (10.3)$$

$\mu$  – безразмерная величина.

**Магнитное поле кругового тока.**

В центре витка магнитная индукция:

$$B = \mu \mu_0 \frac{I}{2r} \quad (10.4)$$

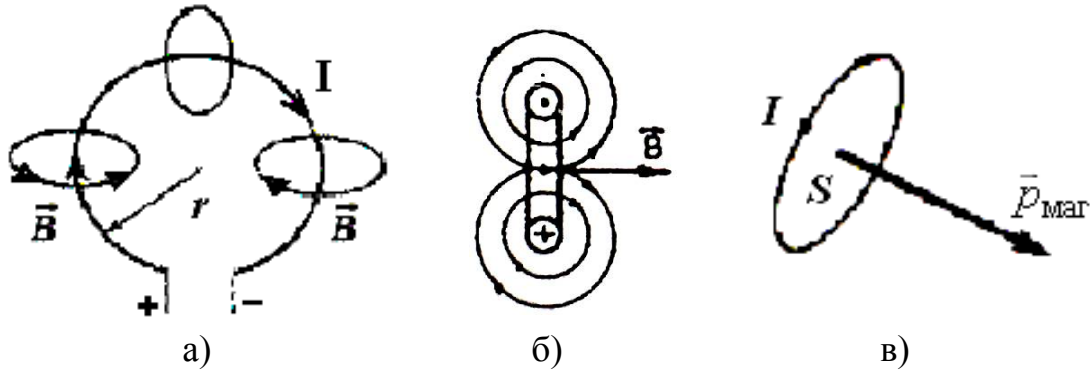


Рис. 10.3

Линии магнитной индукции замкнуты в плоскости, перпендикулярной к току (рис. 10.3, а-б).

Направление линий магнитной индукции определяется **правилом буравчика (правой руки)**: если отогнутый большой палец правой руки направлен по току, то изогнутые четыре пальца указывают направление линий магнитной индукции.

**Магнитный момент** ( $\vec{p}_{\text{маг}}$ ) *кругового тока* – это вектор, модуль которого, направлен перпендикулярно плоскости кругового тока по правилу буравчика (рис. 10.3, в):

$$p_{\text{маг}} = I \cdot S \quad (10.5)$$

**Магнитное поле соленоида** (катушки проводника с постоянным током) (рис. 10.4).

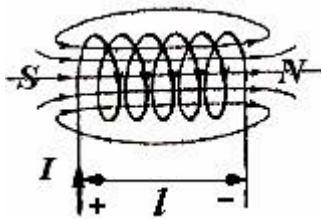


Рис. 10.4

Если длина ( $l$ ) соленоида значительно превышает его диаметр, магнитное поле в его средней части практически однородно и его модуль равен

$$B = \mu \mu_0 \frac{IN}{l}, \quad (10.6)$$

где  $N$  – число витков.

### 10.1.2 Действие магнитного поля на проводник с током

#### Закон Ампера:

Сила, с которой магнитное поле действует на помещенный в него отрезок проводника с током, равна произведению силы тока, модуля вектора магнитной индукции, длины отрезка проводника и синуса угла между направлениями тока и магнитной индукции (рис. 10.5):

$$F_A = IB\Delta l \sin \alpha, \quad (10.7)$$

где  $\alpha = \left( \vec{I}, \vec{B} \right)$ .

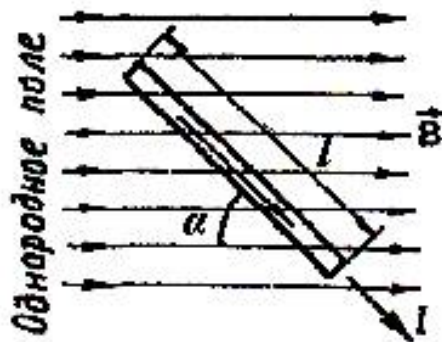


Рис. 10.5

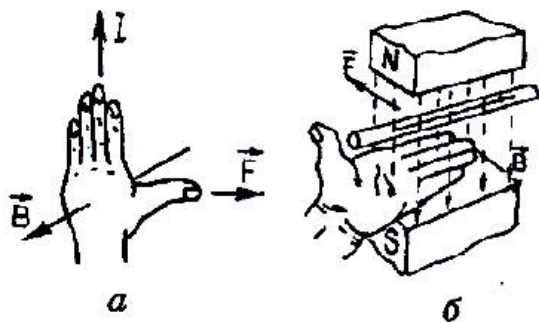


Рис. 10.6

Сила  $\vec{F}$  направлена перпендикулярно индукции магнитного поля и отрезку проводника с током. **Направление этой силы по закону Ампера определяют по правилу левой руки:** если кисть левой руки расположить так, что четыре вытянутых пальца указывают направление тока в проводнике, а вектор магнитной индукции входит в ладонь, то отогнутый (в плоскости ладони) на  $90^\circ$  большой палец покажет направление силы, действующей на отрезок проводника (рис. 10.6,а).

**Модуль вектора магнитной индукции.** Максимальная сила  $F_{A\max}$  действует на отрезок проводника, расположенный перпендикулярно вектору магнитной индукции, так как  $\sin \alpha = 1$  при  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 10.6, б):

$$F_{A\max} = IB\Delta l \quad (10.8)$$

Из этой формулы можно найти модуль вектора магнитной индукции.

**Модуль вектора магнитной индукции** – физическая величина, равная отношению модуля максимальной силы, действующей со стороны магнитного поля на отрезок проводника с током, к произведению силы тока на длину отрезка проводника:

$$B = \frac{F_{A\max}}{I\Delta l} \quad (10.9)$$

Единица магнитной индукции численно равна максимальной силе, действующей на отрезок проводника длиной 1 м при силе тока в нем 1 А.

$$[B] = 1 \text{ Н} / (\text{А} \cdot \text{м}) = 1 \text{ Тл (тесла)}. \quad (10.10)$$

### 10.1.3 Закон взаимодействия параллельных токов

**Принцип суперпозиции магнитных полей:** магнитные поля не взаимодействуют, а только накладываются:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n \quad (10.11)$$

Токи взаимодействуют, так как магнитное поле одного тока действует на другой ток, и наоборот.

### Взаимодействие параллельных токов бесконечной длины:

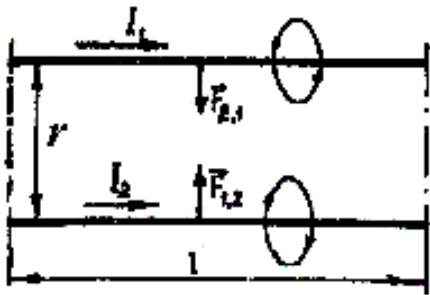


Рис. 10.7

Модуль силы, действующей на проводник длиной  $l$  на расстоянии  $r$  (рис. 10.7)

$$F_{12} = F_{21} = \mu \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi r} l \quad (10.12)$$

Сила ампера на единицу длины проводника:

$$\frac{F}{l} = \mu \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi r} \quad (10.13)$$

При взаимодействии в вакууме  $\mu = 1$ :

$$\frac{F}{l} = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi r} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{I_1 I_2}{2\pi r} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I_1 I_2}{r}$$

**Единица силы тока.** Формула (10.13) позволяет определить единицу силы тока – **ампер** (1 А). Наряду с килограммом, метром, секундой ампер относится к основным величинам СИ, через которые выражаются другие физические величины.

**1 А** – сила постоянного тока, который, протекая по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенных в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывает на каждом отрезке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.

Магнитное поле второго тока

$$B_2 = \mu \mu_0 \frac{I_2}{2\pi r} \quad (10.14)$$

действует на первый ток с силой Ампера:

$$F_{21} = B_2 I_1 l \quad (10.15)$$

Магнитное поле первого тока

$$B_1 = \mu \mu_0 \frac{I_1}{2\pi r} \quad (10.16)$$

действует на второй ток с силой Ампера

$$F_{12} = B_1 I_2 I_1 l \quad (10.17)$$



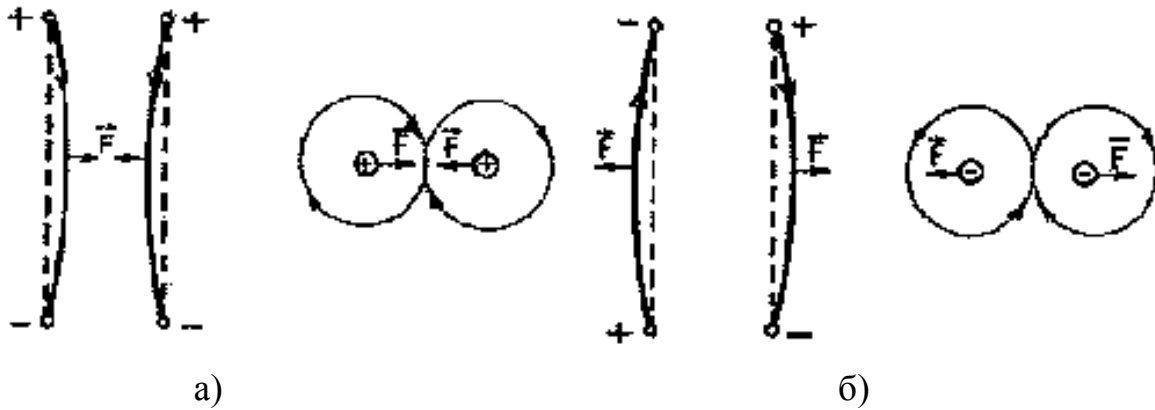


Рис. 10.8

Проводники по которым параллельные токи идут в одном направлении – притягиваются (рис. 10.8, а), а если в противоположном – отталкиваются (рис. 10.8, б).

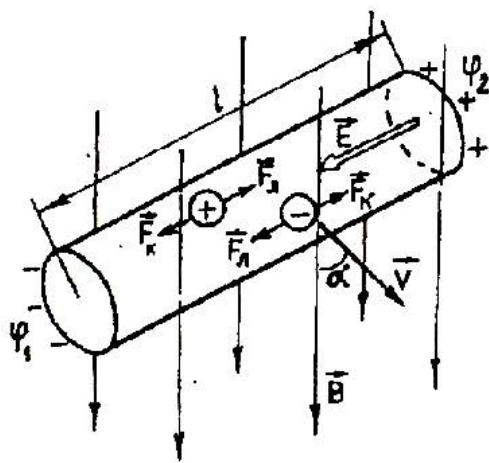


Рис. 10.9

#### 10.1.4 Действие магнитного поля на движущийся заряд (сила Лоренца)

Электрический заряд может двигаться в пространстве со скоростью  $\vec{v}$  либо под действием кулоновской силы электрического поля, либо вместе с проводником.

Если движущийся заряд  $q$  поместить в магнитное поле с индукцией  $B$ , то на него будет действовать ещё сила, которая называется силой Лоренца (рис. 10.9).

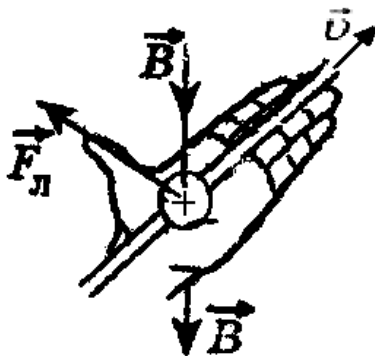


Рис. 10.10

**Направление силы Лоренца определяется мнемоническим правилом левой руки:** если левую руку расположить так, чтобы линии  $\vec{B}$  были направлены в ладонь, четыре пальца указывали направление движения положительного заряда, то отогнутый большой палец указывает направление силы Лоренца (рис. 10.10). Если движется отрицательный заряд, то четыре пальца направлены навстречу их движению.

Модуль силы Лоренца равен:

$$F_{\text{л}} = Bq v \sin \alpha, \quad (10.18)$$

где  $\alpha$  – угол между  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$ .

$$F_{\text{л.макс}} = Bq v. \quad (10.19)$$

$\vec{F}_L$  направлена перпендикулярно скорости движения заряда  $\vec{v}$ , поэтому:

- сообщает заряженной частице центростремительное ускорение;
- работа  $\vec{F}_L$  равна нулю.

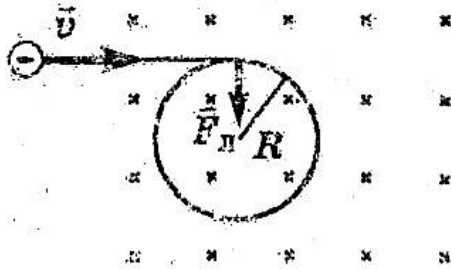


Рис. 10.11

Если  $\vec{v} \perp \vec{B}$ ,  $\alpha = 90^\circ$  заряженная частица движется по окружности определенного радиуса (рис. 10.11):

$$R = \frac{m v}{q B} \begin{pmatrix} F_L = m \frac{v^2}{R} \\ F_L = B q v \end{pmatrix}. \quad (10.20)$$

Если  $\vec{v}$  направлена под углом  $\alpha$  к  $\vec{B}$ , ( $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ) то соответственно перпендикулярной составляющей  $v_\perp$ , частица описывает окружность радиусом  $R$ , а соответственно параллельной составляющей  $v_\parallel$  – движется вперед ( $v_\parallel \cdot T = h$ ), т.е. в результате движется по спирали с шагом  $h$  (рис. 10.12).

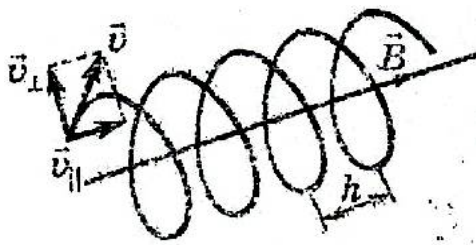


Рис. 10.12

Если заряженная частица влетает в магнитное поле параллельно линиям магнитной индукции:  $\vec{v}_\parallel \uparrow \uparrow \vec{B}$ ,  $\alpha = 0$ ,

$\sin \alpha = 0$ ,  $F_L = 0$ . В отсутствие силы Лоренца частица (согласно принципу инерции) будет продолжать двигаться равномерно и прямолинейно с начальной скоростью вдоль линий магнитной индукцией.

*Заряженная частица, влетающая в однородное магнитное поле параллельно линиям магнитной индукции, движется равномерно вдоль этих линий.*

### 10.1.5 Магнитный поток

Энергетической характеристикой магнитного поля служит магнитный поток (или поток магнитной индукции).

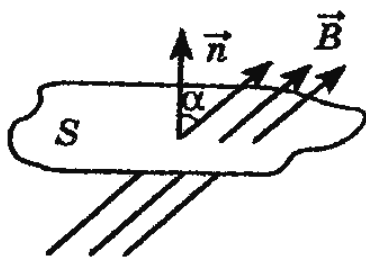


Рис. 10.13

**Магнитным потоком  $\Phi$**  сквозь поверхность с площадью  $S$  называется скалярная величина, равная произведению модуля вектора магнитной индукции  $B$  на площадь  $S$  и косинус угла  $\alpha$  между направлением вектора  $\vec{B}$  и нормалью  $\vec{n}$  к поверхности (рис. 10.13).

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha = B \cdot S_{\perp} \quad (10.21)$$

За единицу магнитного потока принят **вебер** (Вб):

$$[\Phi] = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2 = 1 \text{ Вб (вебер)}. \quad (10.22)$$

Если вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  определяет силу на элемент тока в каждой точке пространства, то магнитный поток  $\Phi$  характеризует работу, которая совершается при движении проводника с током (рис. 10.14, а) или контура с током (рис. 10.14, б) в магнитном поле:

$$A = F \cdot \Delta r = I \cdot B \cdot l \cdot \Delta r = I \cdot B \cdot \Delta S = I \cdot \Delta \Phi, \quad (10.23)$$

где  $\Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1$  – изменение магнитного потока (или разность потоков сквозь контур от начала до конца движения соответственно).

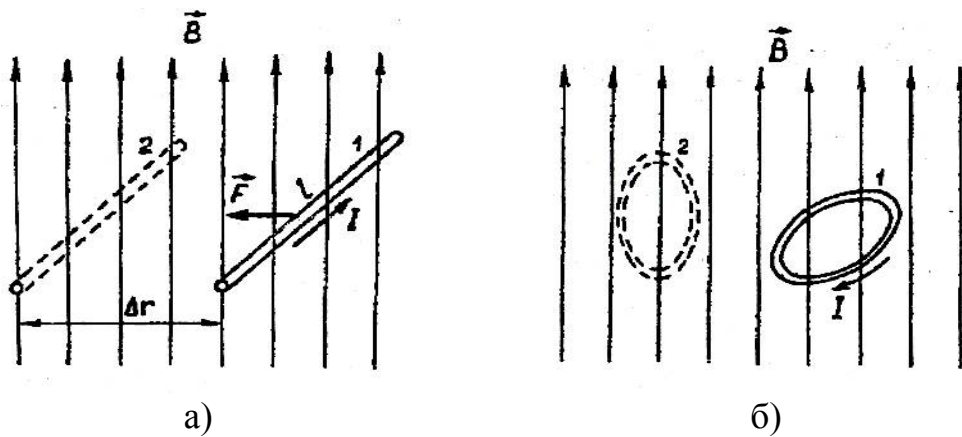


Рис. 10.14

### 10.1.6 Магнитное поле в веществе

**Магнетики** – все вещества, способные намагничиваться во внешнем магнитном поле ( $\vec{B}_0$ ), т.е. создавать собственные (внутренние) магнитные поля  $\vec{B}_c$  самого вещества:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_c. \quad (10.24)$$

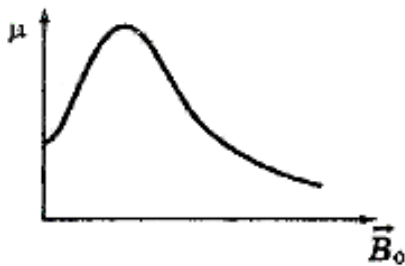


Рис. 10.15

**Диамагнетик** – вещество, у которого вектор индукции собственного магнитного поля, направленный противоположно вектору магнитной индукции внешнего (намагничивающего) поля, значительно меньше его по модулю:

$$\vec{B}_c \uparrow \downarrow \vec{B}_0, \quad B_c \ll B_0. \quad (10.25)$$

Диамагнетиками являются многие газы (водород, гелий, азот, двуокись углерода), плазма, металлы (золото, серебро, медь, висмут), стекло, вода, соль, резина, алмаз, дерево, пластики и т.д.

**Парамагнетик** – вещество, у которого вектор индукции собственного магнитного поля, сонаправленный с вектором магнитной индукции внешнего (намагничивающего) поля, меньше его по модулю:

$$\vec{B}_c \uparrow\uparrow \vec{B}_0, \quad B_c < B_0. \quad (10.26)$$

Парамагнетиками являются кислород, алюминий, платина, уран, щелочные и щелочноземельные металлы.

**Ферромагнетик** – вещество, у которого вектор индукции собственного магнитного поля, сонаправленный с вектором магнитной индукции внешнего (намагничивающего) поля, значительно превышает его по модулю:

$$\vec{B}_c \uparrow\uparrow \vec{B}_0, \quad B_c \gg B_0. \quad (10.27)$$

Ферромагнетиками являются железо, кобальт, никель, их сплавы, редкоземельные элементы.

**Магнитная проницаемость среды** (рис. 10.15) – физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в однородной среде отличается от магнитной индукции внешнего (намагничивающего) поля в вакууме:

$$\mu = \frac{B}{B_0}. \quad (10.28)$$

В диамагнетике внешнее магнитное поле незначительно ослабляется, так что  $\mu \leq 1$  (например, для золота  $\mu = 0,999961$ ).

В парамагнетике внешнее магнитное поле незначительно усиливается, так что  $\mu \geq 1$  (например, для платины  $\mu = 1,00025$ ).

В ферромагнетике внешнее магнитное поле значительно усиливается, (например, для чистого железа  $\mu \approx 10^4$ ).

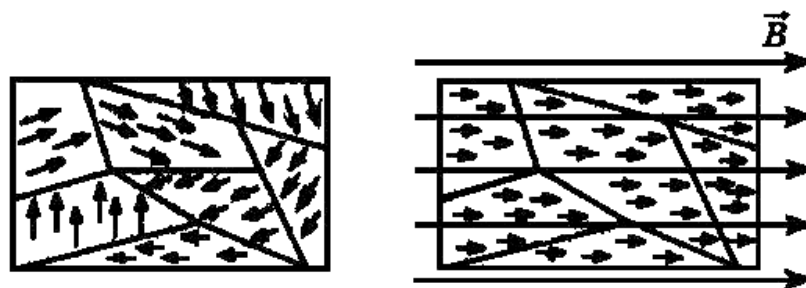


Рис. 10.16

**Гипотеза Ампера:** магнитные свойства тела определяются микроскопическими электрическими токами внутри вещества. Если токи разнонаправлены, то создаваемые этими токами магнитные поля компенсируют друг друга. Во внешнем магнитном поле устанавливается порядок этих токов – вещество намагничивается (рис. 10.16).

## 10.2 Электромагнитная индукция

Электромагнитная индукция открыта М. Фарадеем, объяснена Д. Максвеллом.

### 10.2.1 Явление электромагнитной индукции

Если, например, проводник движется со скоростью  $\vec{v}$  в однородном магнитном поле (рис. 10.17), то свободные заряды под действием силы Лоренца перемещаются к концам проводника и образуют разность потенциалов  $\varphi_2 - \varphi_1$ . Это явление называется **электромагнитной индукцией**.

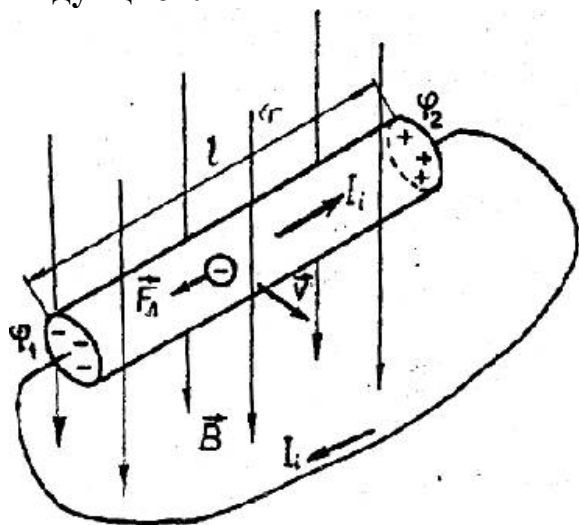


Рис. 10.17

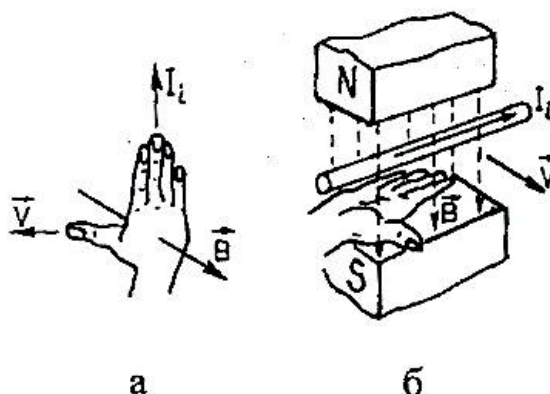


Рис. 10.18

Таким образом, движущийся в магнитном поле проводник становится источником ЭДС. Модуль ЭДС электромагнитной индукции при неизменных  $B$  и  $l$  зависит от скорости движения проводника и синуса угла  $\alpha$  между направлениями векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$ :

$$\boxed{\varepsilon_{\text{и}} = B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha} \quad (10.29)$$

**Электромагнитная индукция** – это явление возникновения электродвижущей силы индукции в проводнике, контур которого пересекается изменяющимся магнитным потоком:

$$\varepsilon_{\text{и}} = \frac{A_{\text{стоп}}}{q} \quad (10.30)$$

Если проводник замкнут, то соответственно ЭДС индукции возникает индукционный ток:

$$I_{\text{и}} = \frac{\varepsilon_{\text{и}}}{R} \quad (10.31)$$

Направление индукционного тока (и ЭДС тоже) определяют по правилу правой руки (рис. 10.18, а-б).

**Правило правой руки:** если правую руку расположить так, чтобы линии магнитной индукции были направлены в ладонь, отогнутый большой палец указывал направление скорости движения проводника, то четыре вытянутых пальца укажут направление индукционного тока.

**Основной закон электромагнитной индукции (закон Фарадея).**

**Правило Ленца**

Явление электромагнитной индукции описывает **закон Фарадея:**

ЭДС электромагнитной индукции в контуре прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока через площадь контура (**основной закон электромагнитной индукции**).

$$\varepsilon_{\text{и}} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (10.32)$$

Знак минус в формуле объясняется **правилом Ленца:**

ЭДС  $\varepsilon_{\text{и}}$  создаёт в замкнутом контуре индукционный ток  $I_{\text{и}}$  такого направления, что его собственное магнитное поле  $\vec{B}_{\text{и}}$  противодействует изменению внешнего магнитного потока, вызывающему этот индукционный ток (рис. 10.19).

Если число проводников будет  $N$ , то ЭДС индукции будет в  $N$  раз больше

$$\varepsilon_{\text{и}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (10.33)$$

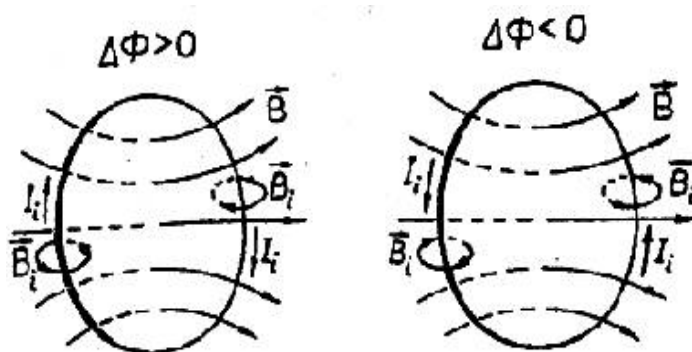


Рис. 10.19

### 10.2.2 Самоиндукция. Индуктивность. Взаимная индукция. Энергия магнитного поля

**Самоиндукция** – это явление возникновения электродвижущей силы индукции в проводнике при изменении силы тока в нем самом.

Если в проводнике сила тока увеличивается, то магнитный поток вокруг проводника возрастает. Поэтому возникает вихревое электрическое поле, которое противодействует росту тока, совершая при

этом работу. Это означает возникновение ЭДС индукции, противоположный по знаку ЭДС источника.

Если в проводнике сила тока уменьшается, возникает ЭДС индукции, совпадающая по знаку с ЭДС источника.

**Закон самоиндукции:**

$$\boxed{\varepsilon_{\text{с.и.}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}}, \quad (10.34)$$

$$\Delta I > 0 \Rightarrow \varepsilon < 0, \quad \Delta I < 0 \Rightarrow \varepsilon > 0.$$

$L$  – **индуктивность** проводника, его собственная характеристика, численно равная отношению магнитного потока, возникающего вокруг проводника, к силе тока в нем:

$$\boxed{L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta I}}. \quad (10.35)$$

Индуктивность проводника численно равна ЭДС самоиндукции в проводнике при изменении силы тока в нем на единицу за единицу времени:

$$\boxed{L = \varepsilon_{\text{с.и.}} \cdot \frac{\Delta t}{|\Delta I|}}. \quad (10.36)$$

Единица измерения индуктивности в СИ – 1 Гн (1 генри).

**Генри** – это индуктивность проводника, вокруг которого магнитный поток изменяется на 1 Вб при изменении в нем силы тока на 1 А:

$$[L] = 1 \frac{\text{Вб}}{\text{А}} = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}} = 1 \text{ Гн (генри)}.$$

Или:

**Генри** – это индуктивность проводника, в котором возникает ЭДС самоиндукции 1 В при изменении силы тока в нем на 1 А за 1 с.

Индуктивность проводника зависит от его размеров и формы, наличия ферромагнитного сердечника. Индуктивность тока (замкнутого в виде кольца соленоида) максимально зависит от числа витков ( $N$ ) и магнитных свойств сердечника ( $\mu$ ):

$$\boxed{L = \mu \mu_0 \cdot \frac{N^2 S}{l}}. \quad (10.37)$$

Генри – это огромная индуктивность. Индуктивность обычных обмоток с сердечниками составляет несколько мГн.

Индуктивность контура является мерой его «инертности» по отношению к изменению тока в контуре. В этом смысле индуктивность  $L$  контура в электродинамике играет такую же роль, как масса  $m$  тела в механике.

### Взаимная индукция.

Явление взаимной индукции состоит в возникновении индукционного поля в проводниках, находящихся поблизости от других проводников с токами, изменяющимися с течением времени. Так, если сила тока  $I_1$  в контуре 1 изменяется, то в контуре 2, не содержащем источника тока, возникает индуцированное поле, характеризуемое ЭДС взаимной индукции  $\mathcal{E}_{в.и.21}$ . Создается индукционный ток, который обнаруживается гальванометром (рис. 10.20).

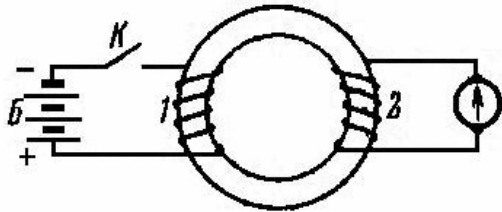


Рис. 10.20

По закону электромагнитной индукции Фарадея

$$\mathcal{E}_{в.и.21} = - \frac{\Delta \Phi_{21}}{\Delta t}, \quad (10.38)$$

где  $\Phi_{21}$  – поток магнитной индукции, который создается магнитным полем тока  $I_1$  и пронизывает площадь поверхности, охватываемой контуром 2. Магнитный

поток  $\Phi_{21}$  пропорционален силе тока  $I_1$  в контуре 1:

$$\Phi_{21} = M_{21} I_1. \quad (10.39)$$

где  $M_{21}$  – коэффициент, который называется взаимной индуктивностью второго и первого контуров.  $M_{21}$  зависит от размеров, геометрической формы и взаимного расположения контуров 1 и 2 и, кроме того, от относительной магнитной проницаемости среды, в которой находятся контуры.

**Энергия магнитного поля контура.** Энергетической характеристикой магнитного поля служит поток магнитной индукции (магнитный поток)  $\Phi$ . Энергию магнитного поля контура (или катушки) индуктивностью  $L$  при протекании по нему тока силой от 0 до  $I$  определяют уравнением:

$$W = I\Phi, \quad (10.40)$$

где  $\Phi = LI/2$ .

Следовательно, энергия магнитного поля катушки с током

$$W = \frac{LI^2}{2}. \quad (10.41)$$

Эту энергию катушка получает от внешнего источника, так как в катушке не происходит изменений который могли бы служить источником энергии.

Плотность энергии магнитного поля:

$$\omega_{\text{магн}} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}, \quad [\omega] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \quad (10.42)$$



## *Новые слова, словосочетания, языковые конструкции*

бесконечный	магнитный поток
буравчик (винт)	ладонь
вихревое	намагничивающий
график	ослабляться
графически	отогнутый
диамагнетик	отрезок
индуктивность	палец
касательный	парамагнетик
кисть руки	плотность энергии
круговой ток	сердечник
магнетики	соленоид
магнит	суперпозиция
магнитная индукция	тор
магнитная проницаемость	ферромагнетик
магнитное взаимодействие	электромагнетизм
магнитное поле	

### **1. Что замкнуто как.**

**Линии магнитной индукции замкнуты в плоскости, перпендикулярной к току.**

### **2. Что определяется как.**

**Направление магнитной индукции определяется правилом буравчика.**

### **3. Что направлено как.**

**Сила  $\vec{F}$  направлена перпендикулярно индукции магнитного поля и отрезку проводника с током.**

## ***Контрольные вопросы:***

1. Что называется магнитным полем? Как можно его выявить?
2. Какое поле существует в пространстве, которое окружает проводники с током и постоянные магниты?
3. Как называется основная характеристика магнитного поля?  
В каких единицах она выражается?
4. Как определяется направление вектора магнитной индукции?
5. Как графически изображается магнитное поле?
6. Как определяется направление линии магнитной индукции?
7. Нарисуйте картину магнитного поля прямолинейного проводника с током.
8. Нарисуйте картину однородного магнитного поля.
9. Нарисуйте картину магнитного поля соленоида.
10. Нарисуйте два проводника с одинаковыми параллельными токами.

- Где индукция магнитного поля будет равна нулю?
11. Какое магнитное поле однородное, а какое – неоднородное?
  12. Какое действие на проводник с током оказывает магнитное поле?
  13. Сформулируйте закон Ампера.
  14. Как определить направление силы по закону Ампера?
  15. Запишите формулу для модуля вектора индукции магнитного поля прямолинейного тока.
  16. В чем проявляется принцип суперпозиции при наложении магнитных полей?
  17. Антипараллельные токи отталкиваются.  
Как взаимодействуют параллельные токи?
  18. Дайте определение единицы силы тока в системе СИ.
  19. Какая сила действует на движущийся электрический заряд в магнитном поле? Как она направлена?
  20. Напишите формулу для силы Лоренца.
  21. Что называется магнитным потоком? (Напишите формулу и дайте определение).
  22. Что является единицей измерения магнитного потока в системе СИ?
  23. Как можно изменить магнитный поток через контур?
  24. Как нужно расположить контур в однородном магнитном поле, чтобы магнитный поток через него был равен нулю?
  25. Что такое: магнетики, диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики?
  26. Что такое магнитная проницаемость среды?
  27. Какое явление называется электромагнитной индукцией?
  28. При каких условиях возникает индукционный электрический ток?
  29. Сформулируйте закон Ленца?
  30. Как направление индукционного тока определить по правилу правой руки?
  31. Сформулируйте основной закон электромагнитной индукции (закон Фарадея).
  32. Запишите формулу закона Фарадея с учетом закона Ленца.
  33. Какое явление называется самоиндукцией?
  34. Запишите формулу ЭДС самоиндукции.
  35. Какой единицей выражают индуктивность?
  36. Дайте определение единицы индуктивности.
  37. Напишите формулу для энергии магнитного поля катушки с током.
  38. Чему равна плотность энергии магнитного потока?  
В каких единицах она измеряется?

## 11 ФИЗИКА КОЛЕБАНИЙ

Этот раздел физики рассматривает механические и электромагнитные процессы, общностью которых является многократная повторяемость.

### 11.1 Колебательное движение

#### 11.1.1 Основные понятия

**Колебание** – это движение, или изменение состояния, обладающее той или иной степенью повторяемости во времени.

Колебательные движения совершают маятники часов, мембраны телефонов, поршни двигателей внутреннего сгорания и т.п.

**Периодические колебания** – это колебания, при которых значения физической величины повторяются через равные промежутки времени.

**Период колебания** ( $T$ ) – это промежуток времени, по истечении которого повторяются значения всех величин, характеризующих колебательное движение:

$$[T] = 1 \text{ с}. \quad (11.1)$$

**Частота колебания** ( $\nu$ ) – это число полных колебаний за единицу времени:

$$\nu = \frac{1}{T}, \quad [\nu] = \frac{1}{\text{с}} = 1 \text{ Гц (герц)} \quad (11.2)$$

**Циклическая (круговая) частота** ( $\omega$ ) – это число полных колебаний за  $2\pi$  единиц времени:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}, \quad [\omega] = \frac{1}{\text{с}}. \quad (11.3)$$

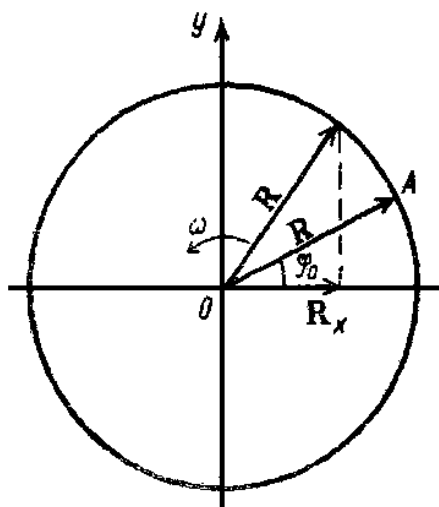


Рис. 11.1

#### 11.1.2 Гармонические колебания. Уравнения гармонических колебаний

Важными и распространенными являются **гармонические колебания**, во время которых некоторые их характеристики (например, смещение тела из положения равновесия) изменяются во времени по закону синуса или косинуса.

Колебание материальной точки имеет много общего с движением по окружности. При этом значения проекций ( $x$ ,  $y$ ) радиус-вектора материальной точки колеблются в диапазоне значений от 0 до  $\pm R_1$  (рис. 11.1).

Обозначим  $x_{\text{макс}} = y_{\text{макс}} = A$  (амплитуда).

Так как  $\varphi = \omega t$ , то

$$x = A \cos \omega t, \text{ или } y = A \sin \omega t. \quad (11.4)$$

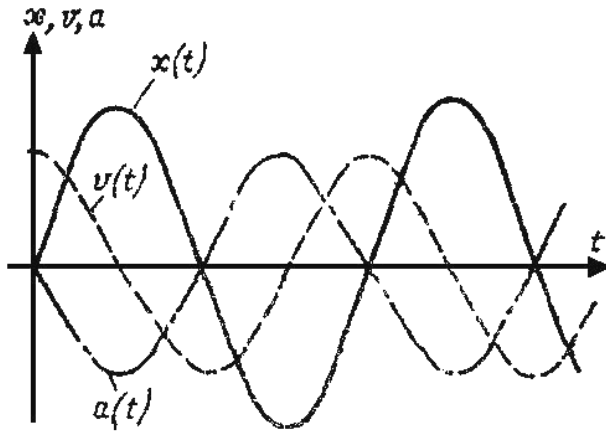


Рис. 11.2

При гармонических колебаниях изменение колеблющейся величины со временем происходит по закону синуса или косинуса (рис. 11.2):

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (11.5)$$

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (11.6)$$

где  $x$  – **мгновенное** значение колеблющейся величины (смещение от положения равновесия);

$A$  – **максимальное значение** колеблющейся величины, или **амплитуда колебания**;  $\omega t$  – **фаза**

**колебания**. Это угловая величина, определяющая долю периода (в градусах или радианах), прошедшую от начала колебания:

$$\omega t = 2\pi vt = \frac{2\pi}{T}t, \quad \omega t = \frac{t}{T}2\pi \quad (11.7)$$

$\varphi_0$  – **начальная фаза**, т.е. значение фазы колебания в момент начала отсчета времени ( $t_0$ ).

Пусть смещение точки меняется по закону синуса

$$x(t) = A \sin \omega t$$

**Скорость гармонических колебаний** – первая производная координаты по времени. Мгновенное значение скорости определяется как

$$v(t) = A\omega \cos \omega t = A\omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = v_{\text{макс}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (11.8)$$

где  $v_{\text{макс}} = A\omega$ .

**Ускорение гармонических колебаний** – первая производная скорости по времени, вторая производная координаты по времени:

$$a(t) = -\omega_0^2 A \sin \omega t = \omega^2 A \sin(\omega t - \pi). \quad (11.9)$$

$$a = -\omega^2 x(t). \quad (11.10)$$

**Гармоническое колебание** – это движение, при котором ускорение движения прямо пропорционально отклонению колеблющейся величины от положения равновесия и противоположно ему направлено:

**Общая закономерность:** если какая-либо величина изменяется по закону синуса или косинуса, то скорость ее изменения изменяется по

тому же закону, но с амплитудой (максимальным значением) в  $\omega$  раз больше и с фазой на  $\pi/2$  больше.

**Сила, обуславливающая гармонические колебания, прямо пропорциональна абсолютному смещению от положения равновесия и направлена противоположно ему:**

$$\vec{F} = m\vec{a},$$

$$F_x = -m\omega^2 x. \quad (11.11)$$

## 11.2 Механические колебания и волны

**Механическое колебание** – такой вид движения тела (материальной точки), во время которого оно многократно проходит одни и те же положения. При этом многократно изменяется направление скорости тела.

### 11.2.1 Свободные колебания

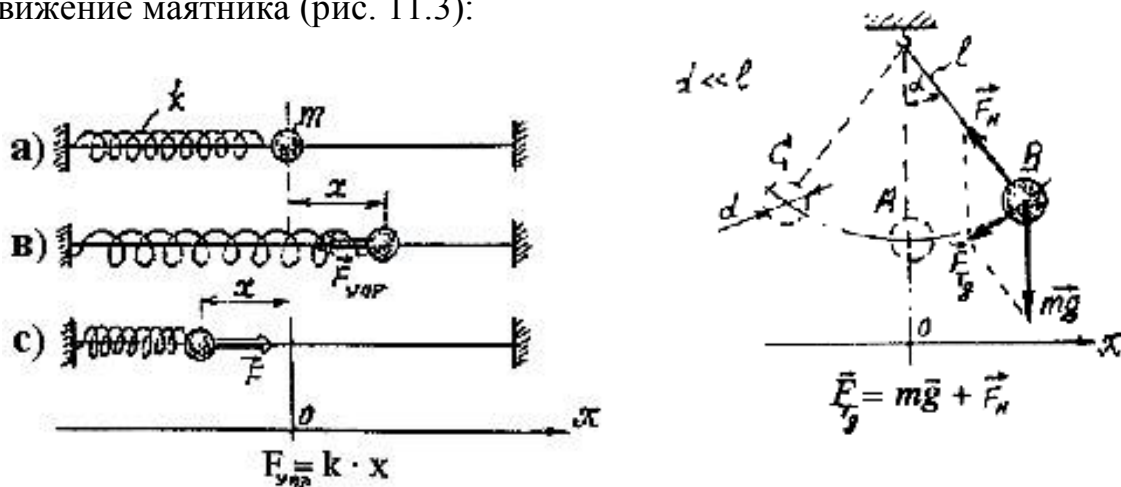
При отклонении тела от положения равновесия в системе возникает сила, направленная к положению равновесия (**возвращающая сила**). Поэтому в таких системах при отклонении от положения равновесия возникают колебания, которые называются **свободными** (или собственными) **колебаниями** с частотой собственных колебаний:

$$\omega_0 = 2\pi/T. \quad (11.12)$$

**Свободные колебания** удобнее описывать функцией косинуса, так как:

$$\cos 0^\circ = 1, \quad x = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0). \quad (11.13)$$

Примером механического колебательного движения является движение маятника (рис. 11.3):



а) Пружинный маятник

б) Математический маятник

Рис. 11.3

$x = 0$  – равновесие;

$x$  – смещение соотношения маятника;

$x_{\text{макс}} = A$  – максимальное смещение амплитуды.

**Пружинный маятник** – колеблющаяся система, в которой колебания происходят под действием сил упругости в пределах упругости тела (пружины) (рис. 11.3, а):

$$F_{\text{упр.}x} = -kx = ma_x = -m\omega^2 x ; \quad (11.14)$$

$$a_x = -\frac{k}{m}x = -\omega^2 x = -\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 x , \quad (11.15)$$

где  $m = \text{const}$  – масса тела;  $k = \text{const}$  – жесткость пружины.

Период **свободных** колебаний пружинного маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} , \quad (11.16)$$

$$\omega^2 = \frac{k}{m} . \quad (11.17)$$

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

Колебание математического маятника происходит под действием тангенциальной составляющей силы тяжести (рис. 11.13, б):

$$F_{Tx} = -\frac{mg}{l}x = ma_x \quad (11.18)$$

$$a_x = -\frac{g}{l}x = -\omega^2 x = -\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 x . \quad (11.19)$$

При  $\alpha \rightarrow 0$  колебание гармоническое.

Период свободных колебаний математического маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (11.20)$$

где  $l = \text{const}$  – длина невесомой нити;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2 = \text{const}$ .

Период колебаний математического маятника не зависит от массы тела.

**Превращения энергии при гармонических колебаниях:**

а) если маятник удерживать в точке  $B$ , то  $E_{\text{Пмакс}}, E_K = 0$ ;

б) при движении от  $B$  к  $A$ :  $E_{\text{П}}$  уменьшается,  $E_K$  растет;

в) в точке  $A$ :  $E_{K\text{макс}}, E_{\text{П}} = 0$ ;

г) при движении от  $A$  к  $C$  (вследствие инерции)  $E_K$  уменьшается,  $E_{\text{П}}$  растет;

д) после достижения точки  $C$  ( $E_{Пmax}, E_K = 0$ ) начинается движение в обратную сторону.

**Превращение энергии при колебаниях пружинного маятника:** энергия упругой деформации превращается в кинетическую энергию:

$$\frac{kx_{max}^2}{2} = \frac{mv_{max}^2}{2} = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2}. \quad (11.21)$$

**Превращение энергии при колебаниях математического маятника:** потенциальная энергия тела превращается в кинетическую (рис. 311, а):

$$mgH = \frac{mv_{max}^2}{2} = mgh + \frac{mv^2}{2}. \quad (11.22)$$

## 11.2.2 Затухающие колебания. Вынужденные колебания. Резонанс

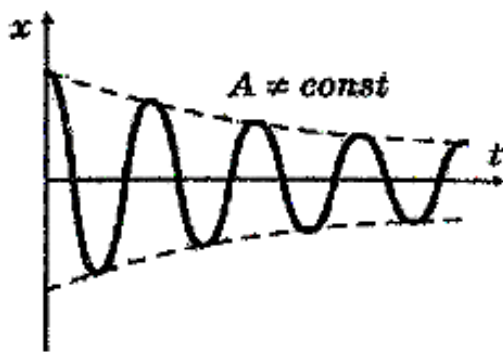


Рис. 11.4

График гармонического колебания представляет собой синусоиду или косинусоиду. Однако в любой колебательной системе, вследствие неизбежности сил трения и сопротивления, собственные колебания со временем «затухают».

$\Rightarrow E$  — уменьшается  $\Rightarrow A$  — уменьшается (рис. 11.4).

*В природе и технике распространены колебания систем в условиях воздействия на них изменяющихся во времени внешних сил. Такие колебания – вынужденные.*

*Такие колебания – вынужденные.*

(Вынужденные колебания совершают деревья и фрагменты строений под напором ветра; пол машинного зала на заводе; мост под ногами людей; мембрана микрофона.)

Вынужденные колебания могут стать незатухающими, если убыль энергии в системе в результате действия сил трения и сопротивления восполнить внешним воздействием.

Вынужденные колебания удобнее описывать функцией синуса, так как  $\sin 0^\circ = 0$ :

$$x = x_{max} \sin \omega t. \quad (11.23)$$

Опыты показывают, что:

- 1) **период** (частота) вынужденных колебаний **равен** периоду (частоте) действующей внешней силы;
- 2) **амплитуда** вынужденных колебаний **зависит** от частоты внешней силы  $A = f(\omega)$ .

$\omega$  – частота внешней силы  $\Rightarrow$  частота вынужденных колебаний;

$\omega_0$  – собственная частота  $\Rightarrow$  частота свободных колебаний;

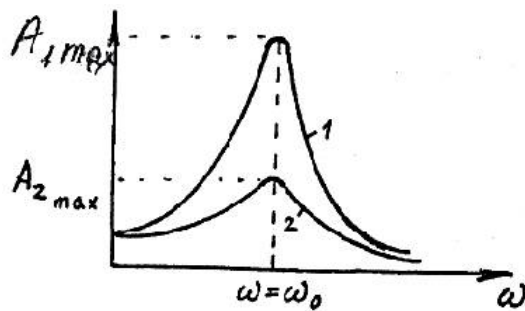


Рис. 11.5

$A$  – амплитуда вынужденных незатухающих колебаний.

**Резонанс** – явление резкого (быстрого) увеличения амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты внешней силы с собственной частотой системы (рис. 11.5).

Сила трения ослабляет резонанс:

$$F_{\text{тр}1} < F_{\text{тр}2} \Rightarrow A_{1\text{max}} > A_{2\text{max}} \quad (11.24)$$

### 11.3 Механические волны

#### 11.3.1 Продольные и поперечные волны. Луч. Длина волны. Фронт волны

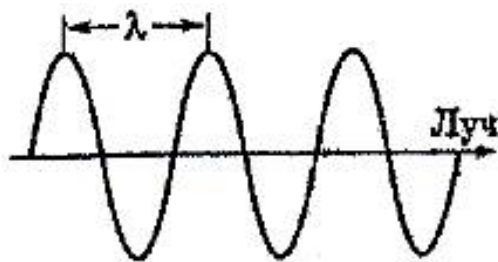


Рис. 11.6

**Механические волны** – это процесс распространения колебаний в упругих средах.

**Луч** – направление распространения колебаний.

При распространении упругих волн частицы среды не перемещаются вместе с волной, а только совершают колебания около своих положений равновесия.

Если колебание частиц происходит перпендикулярно лучу, волна называется **поперечной** (рис. 11.6). Поперечные волны возникают в средах, проявляющих упругость при изменении формы – в твердых телах и на поверхности жидкостей.

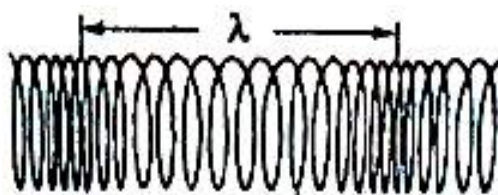


Рис. 11.7

Если частицы колеблются вдоль луча, волна называется **продольной** (рис. 11.7). Продольные волны возникают в средах, проявляющих упругость при изменении объема, т.е. во всех средах.

**Продольные волны состоят из ряда сгущений и разрежений.**

**Длина волны** ( $\lambda$ ) – расстояние, на которое распространяется волна в течение одного периода колебаний:

$$\lambda = \nu T \quad (11.25)$$

Точки среды, отстоящие друг от друга на расстояние, равное длине волны  $\lambda$ , колеблются в одинаковых фазах.



Скорость волны:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu . \quad (11.26)$$

### 11.3.2 Звук. Звуковые волны. Скорость звука. Интенсивность, высота и тембр звука

**Звуковая волна (звук)** – продольная волна, которая распространяется в твердых телах, в жидкостях и в газах, это – распространение в пространстве периодических изменений плотности (давления) вещества.

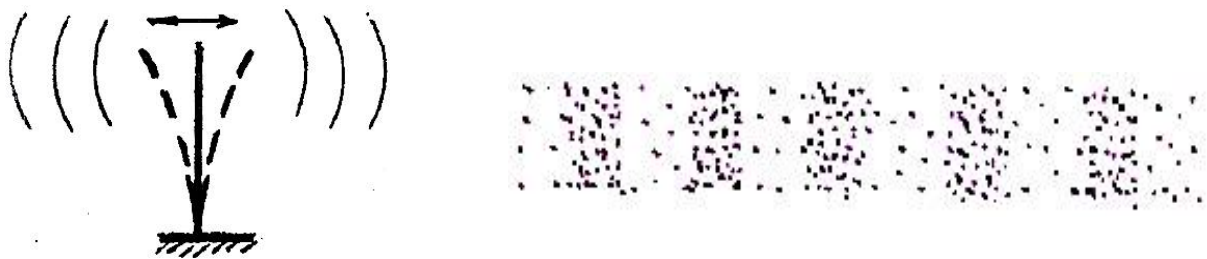


Рис. 11.8 Источники звуковых волн – колеблющиеся тела

**Акустика** – наука, изучающая звук и связанные с ним явления.

#### *Характеристики звуковой волны.*

- 1) **скорость звука** – скорость распространения звуковой волны. Звук распространяется в каждом веществе с определенной скоростью.  $v$  звука в твердых телах  $>$   $v$  звука в жидкостях  $>$   $v$  звука в газах.

Например:

- в стали  $v = 4980$  м/с ( $t^{\circ} = 15^{\circ}\text{C}$ );
- в воде  $v = 1435$  м/с ( $t^{\circ} = 8^{\circ}\text{C}$ );
- в воздухе  $v = 332$  м/с ( $t^{\circ} = 0^{\circ}\text{C}$ );  
 $v = 342$  м/с ( $t^{\circ} = 15^{\circ}\text{C}$ );  
 $v = 349$  м/с ( $t^{\circ} = 30^{\circ}\text{C}$ );  
 $v = 386$  м/с ( $t^{\circ} = 100^{\circ}\text{C}$ ).

- 2) **громкость звука** (или сила звука) определяется количеством энергии и пропорциональна квадрату амплитуды звуковой волны.

Единица громкости – децибел (1 дБ).

- 3) **высота звука** определяется его частотой:

высокий звук  $\Rightarrow$  волна большой частоты

низкий звук  $\Rightarrow$  волна малой частоты.

- 4) **тембр звука** определяется составом сложного колебания и характеризует качество звука.



Рис. 11.9 Диапазон частот звуковых волн

1. **Акустические волны** ( $20 \leq \nu \leq 2 \cdot 10^4 \text{ Гц}$ ) – звуковые волны, которые воспринимаются ухом человека (человек слышит);
2. **Инфразвук** ( $\nu > 20 \text{ Гц}$ ) – звуковые волны низкой частоты;  
(Часто вреден для здоровья)
3. **Ультразвук** ( $\nu > 20000 \text{ Гц}$ ).

Ультразвук имеет большую энергию и хорошую проникаемость (распространяется в веществе, мало затухая).

**Использование:**

1) в технике:

- а) дробящее действие ультразвуков;
- б) ультразвуки ускоряют процессы диффузии, растворения и химических реакций;
- в) дефектоскопия;
- г) гидролокация (измерение расстояния до тел, определение положения тел в воде).

Эхолот – прибор для определения глубины моря.

В природе ультразвуковой локатор имеют дельфины, летучие мыши.

2) в медицине:

- а) эхоскопия (диагностика болезней)  $\Rightarrow$  ультразвук по-разному отражается от разных тканей организма  $\Rightarrow$  видны различия тканей, изменения в тканях, в органах;
  - б) ультразвук убивает микробы (стерилизация);
  - в) для лечения некоторых болезней и т. д.
- Речь человека  $\Rightarrow$  Источник звука – колеблющиеся голосовые связки (в горле).
  - Слух человека  $\Rightarrow$  Звуковая волна попадая в ухо приводит в колебание барабанные перепонки  $\Rightarrow$  сигнал об этом идет в мозг  $\Rightarrow$  человек слышит.

***Новые слова, словосочетания, языковые конструкции***

акустика	колебания затухающие
амплитуда колебаний	колебания механические
волна	колебания свободные
волны акустические	колебания собственные
волны звуковые	локатор
волны механические	луч

волны поперечные  
волны продольные  
возвращающая сила  
высота звука  
голосовые связки  
громкость звука  
дефектоскопия  
инфразвук  
качество звука  
колебание  
колебания вынужденные  
колебания гармонические

маятник математический  
маятник пружинный  
мгновенное значение  
период колебаний  
резонанс  
смещение  
тембр звука  
ультразвук  
фаза колебаний  
фаза начальная  
частота колебаний  
частота циклическая

**Что имеет что.**

**1. Колебание материальной точки имеет много общего с движением по окружности.**

**2. Что происходит под действием чего.**

**Колебание математического маятника происходит под действием тангенциальной составляющей силы тяжести.**

**3. Что не зависит от чего.**

**Период колебаний математического маятника не зависит от массы тела.**

**4. Что превращается во что.**

**Энергия упругой деформации превращается в кинетическую энергию.**

### ***Контрольные вопросы:***

1. Что называют колебаниями?
2. Что такое маятник?
3. Какие колебания называют свободными (или собственными)?
4. Какую систему называют математическим маятником?
6. Что такое смещение?
7. Что называют амплитудой?
8. Докажите, что ускорение свободных колебаний математического маятника пропорционально смещению.
9. Найдите формулу ускорения колебаний груза на пружине.
10. Как зависит ускорение свободных колебаний от смещения?
11. Под действием каких сил происходят свободные колебания любой системы?
12. Что называют круговой частотой?
13. Напишите и прочтите уравнение смещения колебаний.
14. Чему равен период колебаний?
15. Что называют частотой колебаний?
16. Что такое фаза?

17. Какие колебания называются гармоническими колебаниями?
18. Какие колебания являются гармоническими колебаниями?
19. Найдите ускорение гармонических колебаний.
20. Как зависит ускорение гармонических колебаний от смещения?
21. Почему мы говорим, что собственные колебания являются гармоническими колебаниями?
22. Найдите круговую частоту и период собственных колебаний любой системы и математического маятника.
23. Как зависит энергия колебаний от амплитуды?
24. Почему амплитуда собственных колебаний уменьшается?
25. Что такое затухающие колебания?
26. Какие колебания называют вынужденными колебаниями?
27. Что такое вынуждающая сила?
28. Чему равна частота вынужденных колебаний системы?
29. Расскажите, как изменяется амплитуда вынужденных колебаний при изменении частоты вынуждающей силы?
30. При какой частоте вынуждающей силы амплитуда вынужденных колебаний наибольшая?
31. Что такое резонанс?
32. Что называется волновым движением или волной?
33. Какие виды механических волн вы знаете?
34. Какая волна называется поперечной волной?
35. Какая волна называется продольной волной?
36. В каких средах распространяются поперечные и продольные волны?
37. Что называется длиной волны?
38. Какие колебания называются звуковыми колебаниями?
39. От чего зависит скорость распространения звука?

## 11.4 Электромагнитные колебания и волны

### 11.4.1 Колебательный контур. Свободные электромагнитные колебания

**Электромагнитные колебания** – это колебания электрического заряда ( $q$ ), сила тока ( $I$ ), напряжения ( $U$ ), связанные с ними колебания напряженности электрического поля ( $\vec{E}$ ) и индукции магнитного поля ( $\vec{B}$ ), а также самостоятельные колебания  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  в электромагнитной волне.

Возбудителями электромагнитных колебаний являются электрические заряды, движущиеся с ускорением.

**Электрические колебания** – это колебания  $q$ ,  $I$  и  $U$ .

Гармонические электромагнитные колебания возникают в колебательном контуре. **Колебательный контур** – это электрическая

цепь, состоящая из конденсатора, замкнутого на катушку индуктивности (рис. 11.10, а). Такой контур называется **закрытым**, так как почти не излучает энергии в пространство. Контур называется идеальным, если его активное сопротивление  $R \rightarrow 0$ .

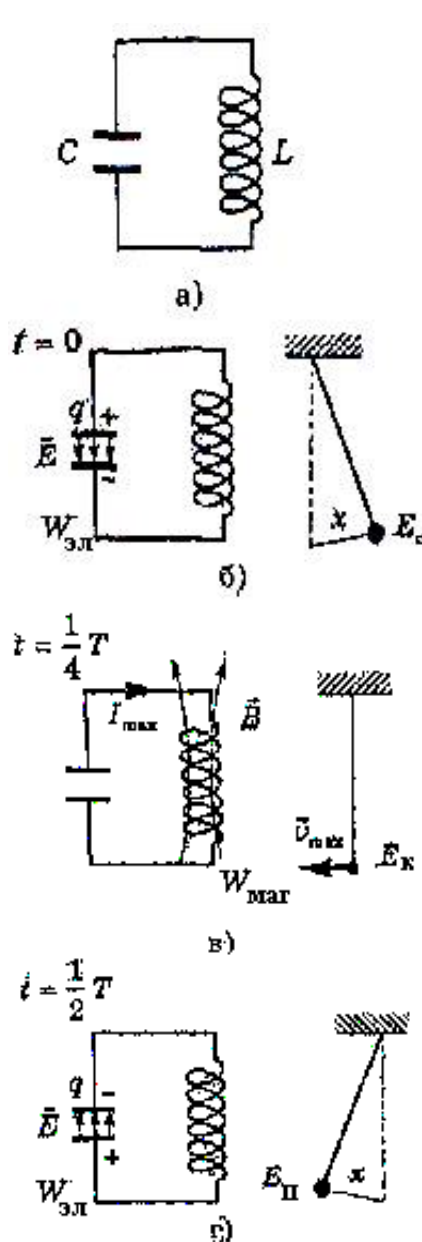


Рис. 11.10

При сообщении конденсатору заряда  $q$  возникает электрическое поле  $\vec{E}$ , а на его пластинах — разность потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ . Возникает ток, который увеличивается постепенно, так как его увеличению противодействует вихревое электрическое поле, возникающее при увеличении магнитного потока катушки. Ток возрастает, пока вся энергия электрического поля конденсатора не перейдет в энергию магнитного поля катушки. С этого момента ток в цепи «по инерции» продолжает протекать, перезаряжая конденсатор и создавая между его пластинами возрастающее электрическое поле, препятствующее его протеканию. Ток уменьшается постепенно, так как его поддерживает вихревое электрическое поле, возникающее вследствие уменьшения магнитного потока катушки. Ток прекращается, когда вся энергия магнитного поля перейдет в энергию электрического поля.

Если проводить аналогию между электромагнитными колебаниями в контуре и механическими колебаниями математического маятника, то  $q$  — аналог  $x$ ,  $W_{эл}$  — аналог  $E_{п}$ ,  $W_{маг}$  — аналог  $E_{к}$  (рис. 11.10, б — г).

**Период свободных незатухающих электромагнитных колебаний в колебательном контуре (установил У. Томсон):**

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad \text{при } R = 0. \quad (11.27)$$

Колебания в идеальном контуре являются гармоническими с циклической частотой:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (11.28)$$

Превращение энергии в идеальном колебательном контуре (закон сохранения энергии):

$$\frac{CU_{\max}^2}{2} = \frac{LI_{\max}^2}{2} = \frac{Cu^2}{2} + \frac{Li^2}{2}. \quad (11.29)$$

### 11.4.2 Вынужденные электрические колебания. Переменный ток

Как и механические, свободные электрические колебания быстро затухают из-за сопротивления в системе. *Практическое использование нашли вынужденные электрические колебания – переменный ток.*

Для получения незатухающих электрических колебаний в неидеальном контуре необходимо в каждый период колебаний передавать контуру порцию энергии.

Так работает **генератор незатухающих электрических колебаний – генератор переменного тока.**

Простейший генератор состоит из проволочной рамки (ротора), приводимой во вращение внешней силой в поле неподвижного магнита (статора).

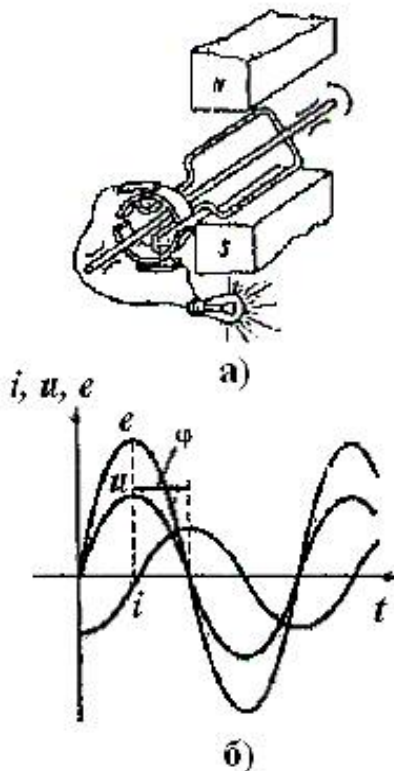


Рис. 11.11

При вращении рамки с постоянной скоростью в постоянном магнитном поле  $\vec{B}$  в рамке возникает синусоидальная ЭДС (рис. 11.11, а):

$$e = BS\omega \sin \omega t, \quad (11.30)$$

$$e = \varepsilon_{\max} \sin \omega t, \quad (11.31)$$

$$\varepsilon_{\max} = BS\omega. \quad (11.32)$$

Если  $N$  витков, то

$$\varepsilon_{\max} = BS\omega N. \quad (11.33)$$

На концах рамки (обмотки генератора) возникает синусоидальное напряжение, совпадающее по фазе с ЭДС (рис. 11.11, б):

$$u = U_{\max} \sin \omega t. \quad (11.34)$$

Во внешней цепи возникают **вынужденные электрические колебания заряда – переменный синусоидальный ток**, который по фазе отличается от ЭДС и напряжения на величину  $\varphi$ , зависящую от свойства цепи:

$$i = I_{\max} \sin(\omega t \pm \varphi), \quad (11.35)$$

$$I_{\max} = \frac{\varepsilon_{\max}}{R}. \quad (11.36)$$

Для такого тока характерно изменение во времени быстроты движения зарядов, и их направления.

$e, u, i$  – **мгновенные значения** (значения соответствующих величин в каждый момент времени).

**Действующее значение силы переменного тока.** При включении в цепь переменного тока амперметра, рассчитанного на измерение постоянного тока, его стрелка будет колебаться с частотой 50 Гц. Поэтому определить значение тока, меняющегося в пределах от  $-I_m$  до  $+I_m$ , будет практически невозможно.

Среди известных действий электрического тока – химического, магнитного и теплового, только тепловое действие не зависит от изменения направления тока. Тепловая мощность, выделяемая в резисторе, прямо пропорциональна квадрату силы тока:  $P = I^2 R$ .

**Сила переменного тока 1 А – сила тока, выделяющего в проводнике такое же количество теплоты, что и постоянный ток 1 А за тот же промежуток времени.**

Амперметр переменного тока измеряет *действующее значение силы тока*.

**Действующее значение силы переменного тока равно силе постоянного тока, при котором в проводнике выделяется такое же количество теплоты, что и при переменном токе за тот же промежуток времени.**

*Действующее (эффективное) значение силы переменного гармонического тока в  $\sqrt{2}$  раз меньше его амплитуды.* Аналогично определяется действующее (эффективное) значение переменного гармонического напряжения:

$$I_{\text{действ.}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}}, \quad U_{\text{действ.}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}. \quad (11.37)$$

В цепях переменного тока резистор часто называют *активным сопротивлением*.

**Активное сопротивление** – *сопротивление элемента электрической цепи, в котором электрическая энергия необратимо преобразуется во внутреннюю.*

Активным сопротивлением обладают электролампы, обмотки электродвигателей, трансформаторов и т.д.

Цепь переменного тока, содержащая катушку индуктивности и конденсатор, имеет полное сопротивление:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (11.38)$$

где  $R$  – активное сопротивление,  $X$  – *реактивное сопротивление*.

$$X = X_L - X_C, \quad (11.39)$$

где – индуктивное сопротивление:

$$\boxed{X_L = \omega L}, \quad (11.40)$$

– емкостное сопротивление:

$$\boxed{X_C = \frac{1}{\omega C}}. \quad (11.41)$$

**Сдвиг фаз в цепях переменного тока.** При наличии в цепи индуктивности (L) сила тока отстает по фазе от напряжения. При наличии в цепи ёмкости (C) сила тока опережает напряжение по фазе.

**Сдвиг фаз** определяется как отношение активного и полного сопротивления цепи:

$$\boxed{\cos\varphi = \frac{R}{Z}}. \quad (11.42)$$

**Закон Ома для переменного тока:**

$$\boxed{I = \frac{U}{Z}, I_{max} = \frac{U_{max}}{Z}}. \quad (11.43)$$

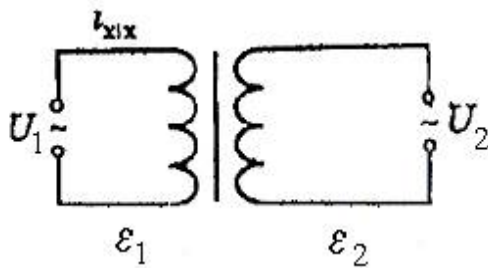


Рис. 11.12

### Трансформаторы.

**Трансформаторы напряжения** – это устройства для изменения напряжения:

- уменьшения (понижающие трансформаторы);
- увеличения (повышающие трансформаторы).

**Трансформатор напряжения** основан на явлении взаимной индукции двух

обмоток на одном замкнутом сердечнике. Преобразует напряжение, увеличивая или уменьшая его до необходимых значений (рис. 11.12).

ЭДС индукции наводится в каждом витке, поэтому чем больше витков во вторичной катушке, тем большее напряжение наводится в ней. Если число витков в первичной катушке ( $N_1$ ) больше, чем во вторичной ( $N_2$ ), то трансформатор понижает напряжение, и наоборот.

**Коэффициент трансформации на холостом ходу** – это отношение:

$$\boxed{\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = K} \quad (11.44)$$

При  $K > 1$  трансформатор понижающий, а при  $K < 1$  – повышающий.

**КПД трансформатора:**

$$\boxed{\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu} + P_{стали}}}. \quad (11.45)$$

Здесь  $P_{Cu}$  – потери в меди. Это потери на нагревание обмоток, они очень малы, так как медный провод имеет достаточно большее сечение и низкое значение  $\rho_{Cu}$ ;



$P_{\text{стали В}}$  – потери в стали на перемагничивание сердечника и токи Фуко, тоже очень малы, так как сердечник состоит из отдельных изолированных пластин магнитомягкого ферромагнитного материала;

$P_2$  – мощность потребителя.

КПД трансформатора очень высок:  $\approx 98\%$ .

В линиях передачи электрической энергии на большие расстояния мощные трансформаторы повышают напряжение до миллионов вольт (В), а у потребителя понижают его до необходимых значений (в бытовых линиях 380/220 В).

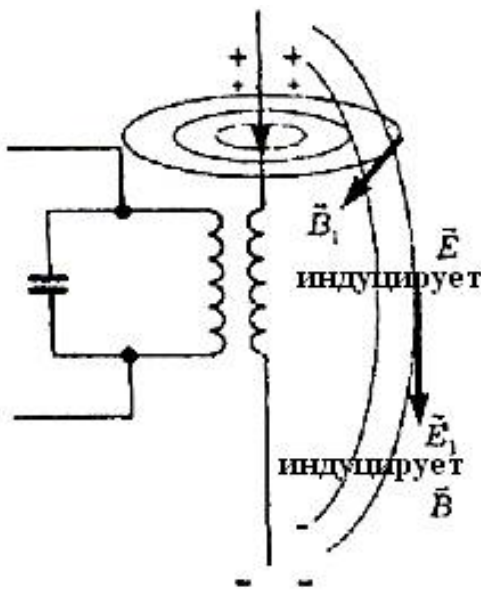


Рис. 11.13

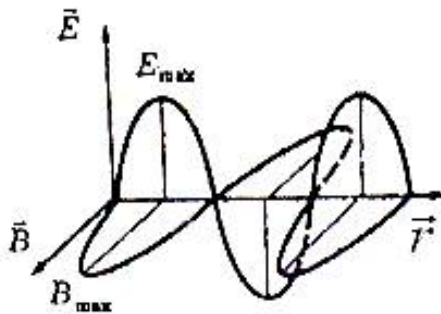


Рис. 11.14

В электромагнитной волне  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  изменяются во взаимно перпендикулярных плоскостях, перпендикулярных к направлению распространения и совпадают по фазе (рис.11.14):

$$\boxed{\varepsilon_0 \varepsilon E^2 = \frac{B^2}{\mu_0 \mu}} \quad (11.46)$$

**Электромагнитные волны – это поперечные волны.**

### 11.4.3 Электромагнитные волны

**Излучение электромагнитных волн открытым колебательным контуром.**

Электромагнитные волны – это распространение в пространстве с течением времени свободного электромагнитного поля.

Электромагнитные волны излучаются электрическими зарядами, движущимися с ускорением.

Открытый колебательный контур излучает электромагнитные волны, так как в процессе колебаний в контуре электроны движутся с ускорением.

При возбуждении в открытом колебательном контуре колебаний с большой амплитудой вокруг контура возникают поля  $\vec{E}_1$  и  $\vec{B}_1$ , связанные с зарядами и током в контуре. Переменные поля  $\vec{E}_1$  и  $\vec{B}_1$  индуцируют соответственно поля  $\vec{B}$  и  $\vec{E}$ . Вдали от контура поля  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$ , взаимно индуцируя друг друга, образуют **свободное электромагнитное поле** (рис. 11.13).

**Скорость распространения электромагнитных волн.** Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}, \quad (11.47)$$

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

В диэлектрике скорость электромагнитной волны уменьшается (волна тормозится):

$$v_{cp} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}. \quad (11.48)$$

На границе среды с вакуумом волна преломляется; **абсолютный показатель преломления**  $n_{cp}$  – число, определяющее, во сколько раз скорость волны в среде  $v_{cp}$  меньше  $c$ :

$$n_{cp} = \frac{c}{v_{cp}} = \sqrt{\varepsilon \mu}. \quad (11.49)$$

**Длина электромагнитной волны** ( $\lambda$ ) – это расстояние, на которое волна распространяется за один период колебаний  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$ .

В воздухе  $c = \lambda v$ , в диэлектрике  $v_{cp} = \lambda_{cp} v$ .

**Объемная плотность энергии** электромагнитной волны ( $\omega$ ):

$$\omega = \frac{W}{V} = \frac{EB}{v \mu_0 \mu}, \quad [\omega] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}. \quad (11.50)$$

**Интенсивность** электромагнитной волны ( $I$ ):

$$I = \vec{\omega} v = \frac{EB}{\mu_0 \mu}. \quad (11.51)$$

Таблица 11.1 – Шкала электромагнитных волн

Вид волн	Длина волн, м	Частота волн, Гц	Источник излучения
Низкочастотные волны	$>10^4$	$<3 \cdot 10^4$	Механический генератор переменного тока
Радиоволны	$10^4 \dots 10^{-1}$	$3 \cdot 10^4 \dots 3 \cdot 10^{10}$	Колебательный контур и вибратор Герца
Ультрарадиоволны	$10^{-1} \dots 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{10} \dots 3 \cdot 10^{12}$	Массовый излучатель
Инфракрасное излучение	$10^{-4} \dots 7,7 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{12} \dots 4 \cdot 10^{14}$	Лампы
Световое излучение	$7,7 \cdot 10^{-7} \dots 4 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{14} \dots 7,5 \cdot 10^{14}$	Лампы
Ультрафиолетовое излучение	$4 \cdot 10^{-7} \dots 10^{-8}$	$7,5 \cdot 10^{14} \dots 3 \cdot 10^{16}$	Лампы
Рентгеновское излучение	$10^{-8} \dots 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{16} \dots 3 \cdot 10^{19}$	Рентгеновская трубка
Гамма излучение	$<10^{-11}$	$>3 \cdot 10^{19}$	Радиоактивный распад

Таблица 11.2 – Множители, префиксы и их обозначения для кратных и частичных единиц СИ

Множитель	Префикс	Обозначение		Множитель	Префикс	Обозначение	
		рус.	межд.			рус.	межд.
$10^{24}$	йота	Й	Y	$10^{-1}$	деци	д	d
$10^{21}$	зета	ЗТ	Z	$10^{-2}$	санتي	с	c
$10^{18}$	экса	Э	E	$10^{-3}$	милли	м	m

Различные электромагнитные волны характеризуются огромным диапазоном длин волн, от значений в десятки километров до  $10^{-12}$  м и меньше.

В зависимости от свойств электромагнитных волн и способов их возникновения весь этот диапазон разделен, как шкала, на отдельные участки: радиоволны; микроволны (или ультракороткие волны); инфракрасные лучи; видимый свет; ультрафиолетовые лучи; рентгеновские лучи; гамма-лучи. Все эти участки не имеют четких разграничений, т.е. волны одинаковых длин могут получаться различными способами.

## *Новые слова, словосочетания, языковые конструкции*

абсолютный	показатель
виток	потери в меди
генератор	потери в стали
действующее значение	проволочная рамка
индуктивность	ротор
интенсивность	сердечник
катушка	сопротивление активное
колебательный контур	сопротивление емкостное
линии передачи	сопротивление индуктивное
магнитомягкие	сопротивление реактивное
перемагничивание	статор
переменный ток	трансформатор
пластины	электромагнитные колебания

### **1. Что характеризуется чем.**

**Электромагнитные волны характеризуются *огромным* диапазоном длин волн.**

### **2. Что состоит из чего.**

**Генератор состоит из *проволочной* рамки (ротор), *приводимый* во вращение *внешней силой* в поле **неподвижного магнита (статор)**.**

### ***Контрольные вопросы:***

1. Что мы называем колебательным контуром?
2. Опишите электромагнитные колебания в контуре и сравните их с колебаниями маятника.
3. Напишите формулу Томпсона: для периода собственных колебаний; для частоты собственных колебаний; для круговой частоты собственных колебаний.
4. Что мы называем резонансом в колебательном контуре?
5. Укажите причины, по которым собственные колебания контура затухают.
6. Какой ток называется переменным?
7. На каком явлении основан генератор переменного тока?
8. Как изменяется э.д.с. индукции при увеличении витков катушки?
9. Напишите выражение для э.д.с. индукции рамки из  $N$  витков, которая вращается в магнитном поле.
10. Напишите и назовите величины, которые входят в написанную формулу.
11. Напишите формулу закона Ома для переменного тока, который идет по сопротивлению  $R$ .
12. Как зависит эффективное значение тока от амплитуды тока?

13. Напишите формулы индуктивного сопротивления катушки и емкостного сопротивления конденсатора.
14. Объясните действие индуктивности и емкости в цепи переменного тока.
15. Что мы наблюдаем после включения конденсатора в цепь постоянного тока?
16. Расскажите об устройстве и принципе действия трансформатора.
17. Что такое коэффициент трансформации?
18. Чему равен коэффициент полезного действия трансформатора?
19. Что представляет собой электромагнитное поле?
20. Дайте определение электромагнитных волн.
21. Чему равна длина электромагнитной волны? (Напишите формулу связи длины волны, скорости и периода и покажите длину волны на рисунке).
22. Где больше затухание электромагнитных колебаний: в открытом или закрытом колебательном контуре? (активное сопротивление контуров одинаково).
23. В каком диапазоне частот (или длин волн) лежат радиоволны?

## 12 ОПТИКА

### 12.1 Геометрическая оптика

**Геометрическая оптика** рассматривает законы распространения света прозрачных средах только на основе представлений о свете как о совокупности световых лучей.

#### 12.1.1 Прямолинейное распространение света в однородной среде

**Световой луч** – линия, вдоль которой распространяется энергия световых электромагнитных волн.

**Световой пучок** – это пучок световых лучей (рис. 12.1).

В оптически однородной среде свет распространяется **прямолинейно**. Одно из доказательств этого – образование тени и полутени за препятствием (рис. 12.2).



Рис. 12.1

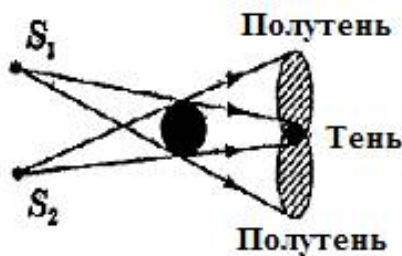


Рис. 12.2

### 12.1.2 Законы отражения света

1. Падающий и отраженный лучи и перпендикуляр, опущенный в точку падения, лежат в одной плоскости.

2. Угол отражения равен углу падения:  $\angle \alpha = \angle \beta$  (рис. 12.3).

**Следствие:** лучи отраженный и падающий взаимно обратимы.

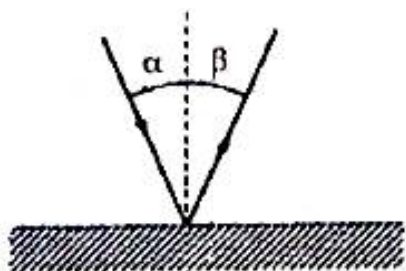


Рис. 12.3

**Зеркальное отражение** – отражение от оптически гладкой плоской поверхности (рис. 12.4).

**Действительное изображение** точечного источника света – это точка пересечения отраженных (или преломленных) лучей.

**Мнимое изображение** точечного источника света – это точка пересечения продолжения отраженных (или преломленных) лучей света.

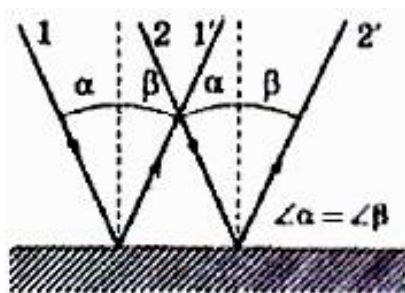


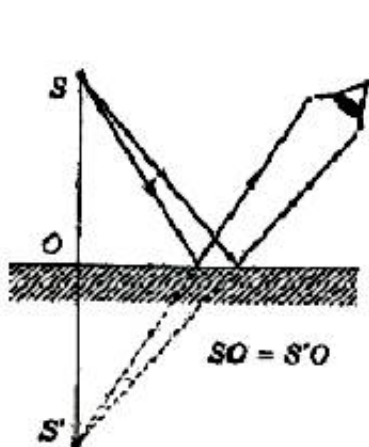
Рис. 12.4

Мнимое изображение точечного источника света воспринимается глазами человека, но в действительности не существует (рис. 12.5, а).

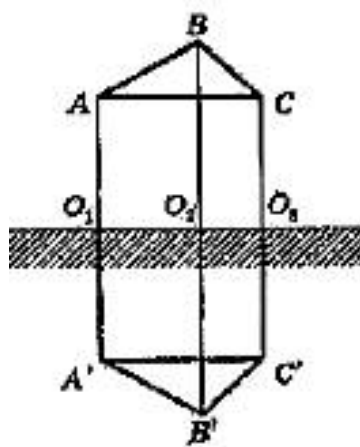
**Изображение в плоском зеркале:**

– Изображение точки мнимое и симметричное.

– Изображение тела мнимое и симметричное (изображение суммы точек) (рис. 12.5 б).



а)



б)

$$\begin{aligned} A'O_1 &= AO_1 \\ B'O_2 &= BO_2 \\ C'O_3 &= CO_3 \end{aligned}$$

Рис. 12.5

### 12.1.3 Законы преломления света. Полное отражение света

**Законы преломления света:**

1. Лучи падающий, преломленный и перпендикуляр, опущенный в точку падения луча, лежат в одной плоскости (рис. 12.6).

2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления света есть величина постоянная, равная **относительному показателю преломления** двух сред (среды, куда свет переходит, к среде, из которой падает):

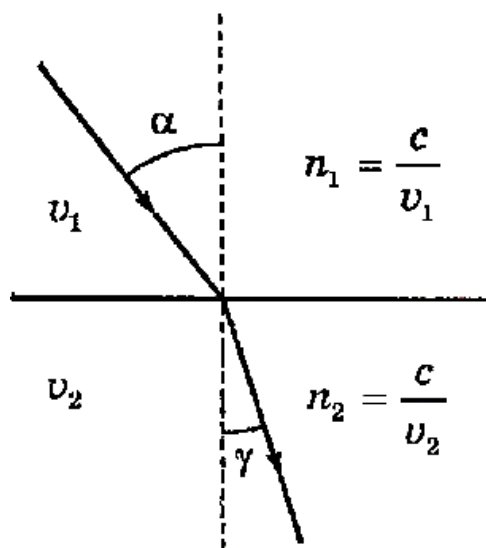


Рис. 12.6

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{2-1} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (12.1)$$

**Следствие:** лучи преломленный и падающий взаимно обратимы.

Показатель преломления среды относительно вакуума называется **абсолютным показателем преломления** среды:

$$n_1 = \frac{c}{v_1}, \quad n_2 = \frac{c}{v_2} \text{ тогда}$$

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c v_1}{v_2 c} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (12.2)$$

Из двух сред оптически более плотной называется та, показатель преломления которой больший.

**Полное отражение света** (рис. 12.7).

Если первая среда оптически плотнее второй, то по мере увеличения  $\alpha$  преломленный луч, «опускаясь», приближается к границе раздела сред.

При некотором значении  $\alpha$  (критический или предельный угол  $\alpha_{кр}$ ) преломления нет, луч скользит вдоль поверхности раздела сред (луч 3). При  $\alpha > \alpha_{кр}$  световой луч возвращается в первую среду, т.е. происходит только отражения света внутри первой среды

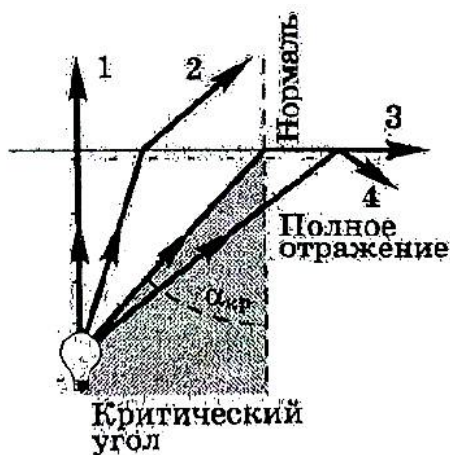


Рис.12.7

(без выхода во вторую), (луч 4).

#### 12.1.4 Сферические линзы. Основные понятия

**Ход лучей в линзах.**

**Линза** – оптически прозрачное тело, ограниченное сферическими поверхностями, одна из которых может быть плоской.

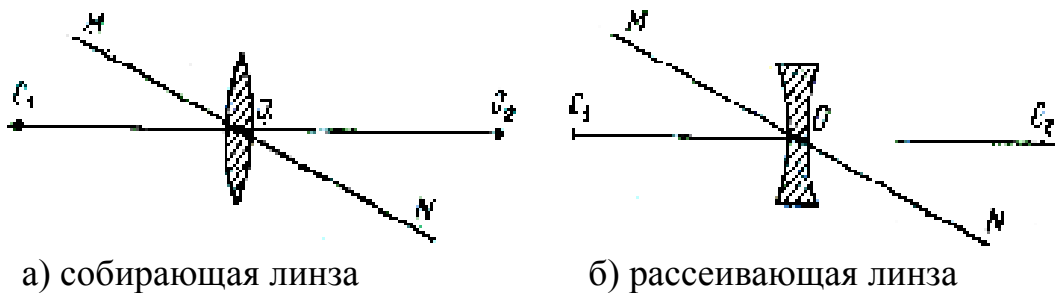


Рис. 12.8

**Главная оптическая ось** линзы ( $C_1C_2$ ) – это прямая линия, проходящая через центры сферических поверхностей (рис. 12.8, а-б). **Оптический центр** линзы ( $O$ ) – это точка линзы, через которую лучи проходят, не преломляясь. **Побочная оптическая ось** линзы ( $MOH$ ) – это любая прямая линия, проходящая через оптический центр линзы.

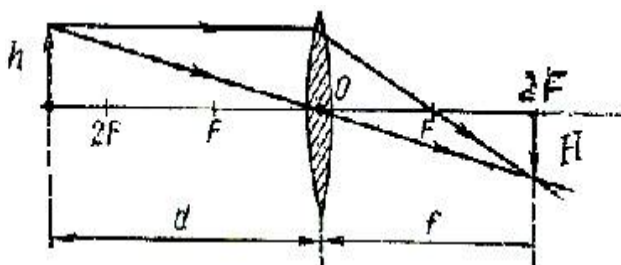


Рис. 12.9

Лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси (рис. 12.9), собираются (действительно или мнимо) в одной точке, которая называется **главным фокусом**. Главный фокус лежит на главной оптической оси. **Плоскость, проходящая через главный фокус перпендикулярно главной**

**оптической оси, называется фокальной плоскостью.** Точка пересечения фокальной плоскости с побочной оптической осью, называется **побочным фокусом**. Лучи, падающие на линзу параллельно побочной оси, собираются (действительно или мнимо) в побочном фокусе.

**Фокусное расстояние линзы ( $F$ )** – это расстояние между фокальной плоскостью и центром линзы.

**Оптическая сила линзы ( $D$ )** – это величина, обратная фокусному расстоянию:

$$D = \frac{1}{F}, \quad (12.3)$$

$$[D] = \text{дптр (диоптрия)}, 1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}. \quad (12.4)$$

$$D_{\text{соб}} > 0; \quad D_{\text{рас}} < 0.$$

Формула по которой можно рассчитать оптическую силу линзы:

$$D = (n - 1) \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (12.5)$$

Здесь  $n$  – относительный показатель преломления вещества линзы;  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы сферических поверхностей линзы. Радиусы выпуклых поверхностей считаются положительными, вогнутых – отрицательными.



### Формулы линзы:

$$\pm \frac{1}{F} = \pm \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f}, \quad (12.6)$$

где  $d$  – расстояние от предмета  $h$  до линзы;  $f$  – расстояние от изображения  $H$  до линзы (рис. 206). Правило знаков: если фокус, предмет или изображение действительные, то перед соответствующим членом – знак «+», если мнимые – знак «-».

**Линейное увеличение** линзы ( $\Gamma$ ) – это отношение линейного размера изображения к размеру предмета :

$$\Gamma = \frac{H}{h}; \text{ но } \frac{H}{h} = \frac{f}{d} = \frac{F}{d - F}, \quad (12.7)$$

поэтому

$$\Gamma = \frac{f}{d} = \frac{F}{d - F}. \quad (12.8)$$

Увеличение лупы приблизительно равно  $\Gamma = f_0 / F$ , где  $f_0 = 25$  см – расстояние наилучшего зрения.

Увеличение микроскопа равно  $\Gamma = \sigma \cdot f_0 / (F_1 F_2)$ , где  $\sigma$  – расстояние между фокусами объектива  $F_1$  и окуляра  $F_2$ .

### *Новые слова, словосочетания, языковые конструкции*

геометрическая оптика	показатель
граница раздела сред	преломление
зеркало	распространение света
изображение	свет
изображение действительное	световой луч
изображение мнимое	световой пучок
линза	симметричный
оптическая ось главная	следствие
оптическая ось побочная	среда
оптическая сила	сферические поверхности
отражение	ход лучей
отражение зеркальное	фокальная плоскость
падение	фокус главный
плотный	фокус побочный
плоское зеркало	фокусное расстояние

#### 1. Что лежит где.

*Падающий, отраженные лучи и перпендикуляр, опущенные в точку падения, лежат в одной плоскости.*

#### 2. Что собирается где.

*Лучи, падающие на линзу параллельно побочной оси, собираются в побочном фокусе.*

### Контрольные вопросы:

1. Какие тела называют источниками света? Назовите источники света.
2. Что представляют собой световые лучи и как они распространяются?
3. Что называется световым потоком?
4. Что называется линзой?
5. Что называется оптическим центром, главной оптической осью и главным фокусом линзы?
6. Что называется оптической силой линзы и в каких единицах она выражается?
7. Где и в какое время получится изображение предмета, находящегося за двойным фокусным расстоянием рассеивающей линзы?
8. Где и какое получится изображение предмета, находящегося между фокусом собирающей линзы и точкой двойного фокусного расстояния?
9. Постройте изображение предмета, находящегося между собирающей линзой и ее фокусом.

## 12.2 Волновая оптика

**Свет** – это электромагнитные волны высокой частоты, испускаемые атомами вещества, а также движущимися с огромным ускорением частицами, имеющими электрический заряд.

### 12.2.1 Монохроматический свет. Преломление света

**Световые волны** по их частоте (длине волны в вакууме) и восприятию органами зрения человека разделяются на видимое излучение, инфракрасные лучи, ультрафиолетовые лучи.

$\lambda$  в вакууме:

**видимое излучение:** 0,76 мкм – 0,4 мкм,

**инфракрасные лучи:** 0,76 мкм – 1 мм,

**ультрафиолетовые лучи:** 0,4 мкм – 10 нм.

Свет одной определенной частоты (длины волны) называется **монохроматическим светом**.

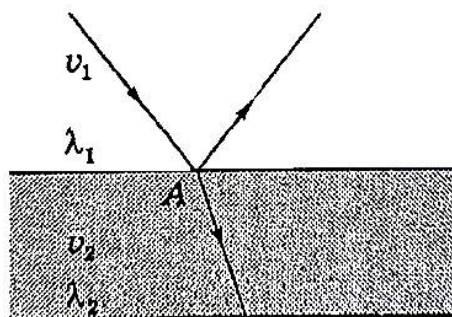


Рис. 12.10

На границе раздела двух прозрачных сред свет частично отражается, частично преломляется, переходя во вторую среду (рис. 12.10).

**Преломление света** – это изменение направления его распространения в соответствии с изменением скорости распространения.

Среда, в большей степени тормозящая распространение света ( $v_{cp} < c$ ), называется

оптически более плотной средой.

Отношение скорости распространения света в вакууме к скорости света в данной среде называется **абсолютным показателем преломления среды**:

$$n_{cp} = \frac{c}{v_{cp}}. \quad (12.9)$$

**Относительный показатель преломления сред:**

$$\frac{v_1}{v_2} = n. \quad (12.10)$$

С увеличением угла отражения света увеличивается процент световой энергии, уносимой отраженным светом, а процент световой энергии, переходящей во вторую среду, уменьшается.

### 12.2.2 Дисперсия света

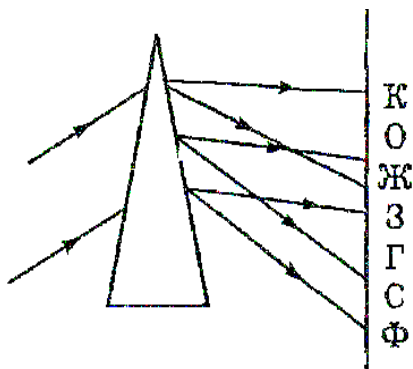


Рис. 12.11

**Дисперсия света** – это зависимость скорости света в веществе от частоты проходящего света (зависимость  $v$  от  $\nu$ ).

При преломлении света в стеклянной призме видимое излучение раскладывается на части, в соответствии с изменением частоты света: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый цвета (рис. 12.11).

Наблюдаемая картина называется **дисперсионным спектром**.

### 12.2.3 Интерференция света

**Когерентные волны** – волны с одинаковой частотой, поляризацией и постоянной разностью фаз.

Две волны **когерентны**, если:

- а)  $\nu_2 = \nu_1$ ;
- б) их фазы или совпадают ( $\varphi_2 = \varphi_1$ ), или не совпадают ( $\varphi_2 \neq \varphi_1$ ), но  $\varphi_1 - \varphi_2 = const$ .

Когерентные волны испускают только лазеры. Когерентные световые волны от других источников можно получить искусственно, разделяя волну (луч) на две части и обеспечивая прохождение ими до точки встречи различных путей. Для этого используют двойные щели, двойные зеркала, двойные линзы, двойные призмы, полупрозрачные зеркала.

**Интерференция волн** – это явление, возникающее в результате

процесса наложения нескольких когерентных волн и заключающееся в усилении колебаний в одних участках пространства и ослаблении в других.

Такое чередование максимумов и минимумов амплитуды колебаний, образующееся путем перераспределения в пространстве энергии накладывающихся волн, для случая световых волн имеет вид световых и темных участков.

**Интерференционные максимумы** получаются на участках, до которых складывающиеся волны пришли с **геометрической разностью хода**  $l_2 - l_1 = \Delta$ , определяемой условием:

$$\Delta = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda, \quad (12.11)$$

где  $k$  – целое число ( $\Delta$  равно четному числу половинок длин волн или целому числу длин волн)  $l_2$  и  $l_1$  – пути волн.

Условие **интерференционного минимума**:

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (12.12)$$

( $\Delta$  равно нечетному числу половинок длин волн).

Если световые лучи проходят не в воздухе, а в другом прозрачном веществе (вода, стекло...), то вместо  $l_2$ ,  $l_1$  и  $\Delta$  рассматривают **оптические пути**  $nl_2$  и  $nl_1$ , а также **оптическую разность хода**  $n\Delta$ , где  $n$  – показатель преломления вещества.

#### 12.2.4 Дифракция света

**Дифракция света** – явление нарушения прямолинейности распространения света в однородной среде при его прохождении мимо препятствий или сквозь отверстия, захождение света в область геометрической тени.

**Дифракционная решетка** – стеклянная тонкая пластина, на которую нанесены параллельные штрихи с промежутками между ними. Ширина щели и штриха обозначается  $d$  и называется **постоянной решетки**, или **периодом решетки**.

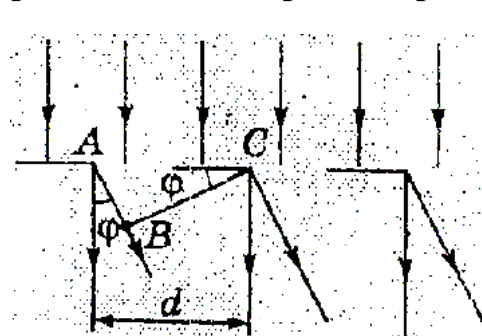


Рис. 12.12

При падении на решетку пучка параллельных лучей, **перпендикулярно** плоскости решетки (плоской волны), благодаря дифракции, свет от каждой щели пойдет пучком, рассеянным во всех направлениях (рис. 12.12):

$$AC = d, \quad (12.13)$$

$AB$  – разность хода,  $AB = d \sin \varphi$ ,  $AB = n\lambda$ ,

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k}. \quad (12.14)$$

**Условия главных максимумов освещенность при дифракции на дифракционной решетке при нормальном падении на неё света:**

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots), \quad (12.15)$$

где  $d$  – постоянная решетки,  $\varphi$  – угол отклонения лучей, соответствующий главному максимуму;  $k$  – порядок главного максимума;  $\lambda$  – длина световой волны.

### 12.2.5 Поляризация света

Электромагнитная световая волна называется естественной (неполяризованной), так как вдоль луча колебания  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  происходят во всех плоскостях, перпендикулярных направлению луча (рис. 12.13, а).

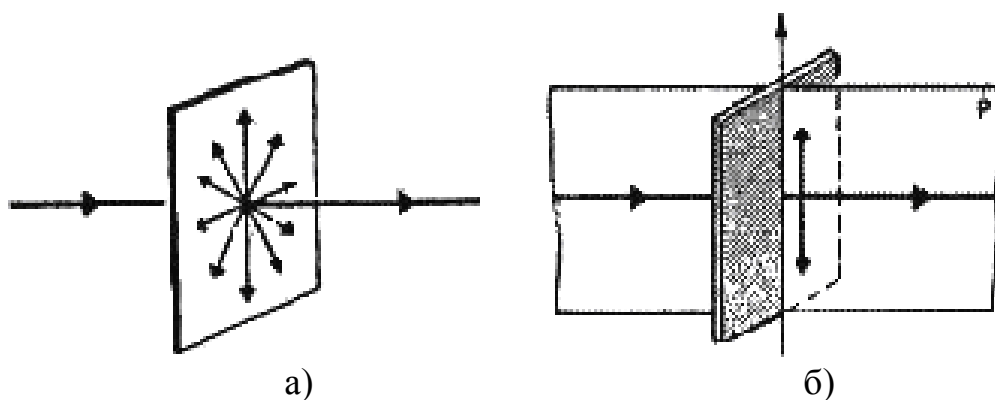


Рис. 12.13

Строгая фиксация колебаний  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  в определенных плоскостях, перпендикулярных лучу, называется **поляризацией света**, а волны называются **плоскополяризованными** или **линейно-поляризованными**. Устройство, преобразующее естественный свет в поляризованный, называется **поляризатором** (рис. 12.13, б). Поляризатором может служить кристалл турмалина, пропускающий свет с колебаниями  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  только в определенных плоскостях, перпендикулярных к оси кристалла.

При отражении и преломлении света происходит его частичная поляризация: колебания  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  в одной плоскости преобладают над колебаниями в других плоскостях.

Тангенс угла падения световой волны, при котором происходит максимальная частичная поляризация преломленного луча, равен абсолютному показателю преломления отражающей среды (**закон Брюстера**):

$$\boxed{\operatorname{tg} i_0 = n} . \quad (12.16)$$

## ***Новые слова, словосочетания, языковые конструкции***

видимое излучение  
волновая оптика  
дисперсия света  
дисперсионный спектр  
дифракция света  
дифракционная решетка  
интерференция света  
инфракрасные лучи  
испускать  
когерентные волны  
максимум  
минимум  
монохроматический свет  
накладываться

оптическая разность  
оптические пути  
перераспределение  
показатель абсолютный  
показатель относительный  
поляризация  
поляризатор  
решетка  
свет  
световые волны  
ультрафиолетовые лучи  
устройство

### **1. Когда увеличивается что.**

**С увеличением угла отражения света увеличивается процент световой энергии, уносимой отраженным светом.**

### **2. Что разделяется как.**

**Световые волны по их частоте, и восприятию органами зрения человека разделяются на видимое излучение, инфракрасные лучи, ультразвуковые лучи.**

## ***Контрольные вопросы:***

1. В чем заключается принцип суперпозиции волновых движений?
2. Что представляет собой интерференция волн?
3. Какие источники колебаний называют когерентными?
4. Назовите условия усиления и ослабления колебаний.
5. Почему не могут интерферировать лучи, идущие от двух некогерентных источников света?
6. Где применяется явление интерференции?
7. Что называется дисперсией света?
8. Укажите характер зависимости показателя преломления света от длины волны для нормальной дисперсии.
9. Как можно объяснить дисперсию света?
10. Какой закон описывает поглощение света?
11. Чем отличается поглощение света в газах, жидкостях и твердых телах?
12. Что называется рассеянием света?
13. Как зависит интенсивность рассеянного света от длины волны?

## 13 СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (ЧАСТНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ)

**Специальная теория относительности (частная теория относительности, СТО)** – современное учение о пространстве и времени.

**Пространство** – форма существования материи, характеризующая взаимоположение материальных объектов; имеет три измерения, однородно (все точки равноправны) и изотропно (все направления равноправны).

**Время** – форма существования материи, характеризующая последовательность хода событий; имеет одно измерение, необратимо, однородно (все мгновения равноправны), изотропно (равноправен отсчет вперед и назад).

### 13.1 Постулаты СТО. Преобразования Лоренца. Выводы СТО

1. Все законы физики во всех инерциальных системах отсчета одинаковы (**принцип относительности Эйнштейна**).
2. Скорость света в вакууме ( $c$ ) не зависит от скорости движения источника, т.е.  $c$  одинакова во всех инерциальных системах отсчета ( $c$  – инвариант).

**Относительность длины (расстояний).** Длина тела в системе отсчета, где оно покоится, называется собственной длиной  $l_0$ .

**Лоренцово сокращение длины** – уменьшение длины в направлении движения:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (13.1)$$

При  $v \ll c$  имеем  $l = l_0$  – классическая механика.

Кинематический эффект:

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (13.2)$$

**Относительность промежутка времени.** Время, измеренное в системе отсчета, где точки системы неподвижны, называется собственным временем ( $t_0$ ). Время в подвижной системе отсчета:

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (13.3)$$

При  $v \ll c$  имеем  $t = t_0$  – классическая механика.

## 13.2 Релятивистский закон сложения скоростей

**Релятивистский закон сложения скоростей:**

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}. \quad (13.4)$$

При  $u' = c$ ,  $v = c$ ,  $u = c$ .

При  $u' \ll c$ ,  $v \ll c$ ,  $u = u' + v$  – классическая механика.

*Скорость света в вакууме ( $c$ ) – предельная скорость в нашей Галактике.*

## 13.3 Импульс тела и масса в СТО

Импульс тела, как и в классической механике, пропорционален скорости ( $\vec{p} = m\vec{v}$ ), где  $m$  – релятивистская масса тела:

$$\vec{p} = m\vec{v} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (13.5)$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (13.6)$$

При  $v \rightarrow c$   $m \rightarrow \infty$ .

Собственная масса –  $m_0$  (масса покоя).

*Ни одна частица (тело) с массой покоя  $m_0$ , отличной от нуля, не может двигаться со скоростью, равной скорости света в вакууме (только меньше  $c$ ).*

Второй закон Ньютона в импульсной форме такой же, как и в классической механике:

$$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p},$$
$$\vec{F}\Delta t = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (13.7)$$



### 13.4 Закон взаимосвязи массы и энергии

**Закон взаимосвязи массы и энергии:**

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (13.8)$$

*Энергия покоя тела (собственная энергия тела) – это его внутренняя энергия:*

$$E_0 = m_0 c^2. \quad (13.9)$$

*Изменению энергии тела соответствует изменение массы тела, и наоборот:*

$$\Delta E = \Delta m c^2, \quad (13.10)$$

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}. \quad (13.11)$$

В релятивистской физике энергия тела складывается из энергии покоя тела и его кинетической энергии:

$$m c^2 = m_0 c^2 + E_k. \quad (13.12)$$

При изменении температуры тела изменяется его внутренняя энергия, соответственно изменяется и его масса.

Массе покоя в 1 а.е.м. соответствует энергия 931 МэВ:

1 а.е.м. – 931 МэВ,

1 а.е.м. =  $1,67 \cdot 10^{-27}$  кг,

1 эВ =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж.

#### ***Новые слова, словосочетания, языковые конструкции***

взаимосвязь, преобразование, выводы, релятивистский закон, наоборот, сокращение, относительность, специальная, постулат, теория, предельная,

#### ***Контрольные вопросы:***

1. Какие принципы лежат в основе теории относительности?
2. Когда появляются релятивистские эффекты?
3. В чем проявляется релятивистский эффект сокращения размеров тел?
4. В чем состоит релятивистский эффект замедления хода времени?
5. Как выражается релятивистский закон сложения скоростей?
6. Как зависит масса тела от его скорости?
7. Что называется релятивистской массой?
8. Что называется релятивистским импульсом?
9. Написать зависимость, связывающую энергию тела с его массой.
10. Основной вывод специальной теории относительности.

## 14 КВАНТОВАЯ ОПТИКА

### 14.1 Теория Планка. Импульс фотона

Свет излучается (теория Планка), распространяется и поглощается отдельными порциями энергии, которые называются квантами.

Энергия кванта прямо пропорциональна частоте света:

$$\boxed{\varepsilon = h\nu}, \quad (14.1)$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

**Квант света** – это частица света, которую называют **фотоном**.

**Фотон** не обладает массой покоя ( $m_0 = 0$ ), а существует, только двигаясь со скоростью света в вакууме.

Фотон обладает определенным импульсом ( $\vec{p}$ ):

$$\boxed{p_\phi = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda_0}}. \quad (14.2)$$

Квантовые свойства света обусловлены тем, что энергия, импульс и масса электромагнитного излучения сосредоточены в частицах света – фотонах.

### 14.2 Фотоэффект и его законы

**Внешний и внутренний фотоэффект.**

**Внешний фотоэффект** – вырывание электронов из твердых тел и жидкостей за их пределы под действием падающего на них потока фотонов.

Тело теряет часть электронов – приобретает положительный заряд.

**Внутренний фотоэффект** – вырывание из атомов, молекул или ионов электронов, остающихся внутри вещества.

**Законы внешнего фотоэффекта. Соотношение Эйнштейна**

**Законы внешнего фотоэффекта:**

1. Максимальная начальная скорость фотоэлектронов зависит только от частоты света и свойств поверхности металла.
2. Число электронов  $n$ , которые вырываются светом за единицу времени, прямо пропорционально освещенности металла ( $n \approx E$ ).
3. Для каждого вещества существует **порог фотоэффекта** (длинноволновая граница фотоэффекта), т.е. длина волны света ( $\lambda_{\max}$ ), больше которой (или частота света ( $\nu_{\min}$ ), меньше которой) фотоэффект не происходит.

Фотоэффект происходит, если тело освещается светом с

$$\nu \geq \nu_{\min} \quad (\lambda \leq \lambda_{\max}).$$

Каждый фотон взаимодействует только с одним электроном.

**Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:** энергия фотона расходуется на совершение работы выхода электрона из металла ( $A_{\text{ВЫХ}}$ ) и на сообщение вылетающему электрону кинетической энергии

$$\left( \frac{m\nu_{\max}^2}{2} \right): \quad \boxed{h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + \frac{m\nu_{\max}^2}{2}}. \quad (14.3)$$

**Порог фотоэффекта:**

$$\boxed{h\nu_{\min} = A_{\text{ВЫХ}}}, \quad (14.4)$$

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{h}, \quad (14.5)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{c}{\nu_{\min}} = \frac{ch}{A_{\text{ВЫХ}}}. \quad (14.6)$$

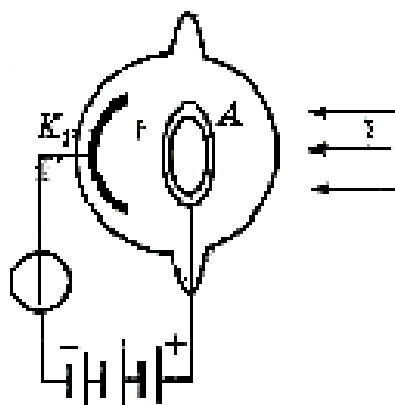


Рис. 14.1

Порог фотоэффекта цезия лежит в области инфракрасных лучей (малая  $A_{\text{ВЫХ}}$ ).

Порог фотоэффекта вольфрама, золота лежит в области ультрафиолетовых лучей (большая  $A_{\text{ВЫХ}}$ ).

### 14.3 Фотоэлементы и их применение

**Фотоэлементы с внешним фотоэффектом** – вакуумные безынерционные приборы для получения фототоков (рис. 14.1).

Поток фотоэлектронов, вырываемых светом из катода, под действием электрического поля образует фототок, замыкающий электрическую цепь:

$$I_{\text{нас}} = k\Phi. \quad (14.7)$$

**Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом** – фотоэлементы с запирающим слоем (см. «Ток в полупроводниках») (рис. 14.2).

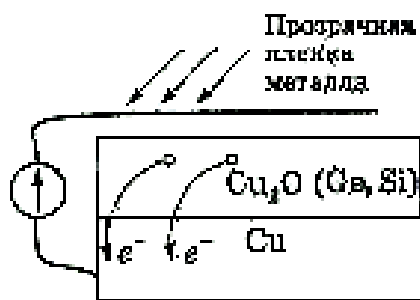


Рис. 14.2

Кремниевые фотоэлементы превращают энергию света в электрическую (батареи калькуляторов, солнечные батареи).

**Фотосопротивление** – полупроводники, в которых под действием света происходит *внутренний фотоэффект* и резко изменяется их сопротивление.

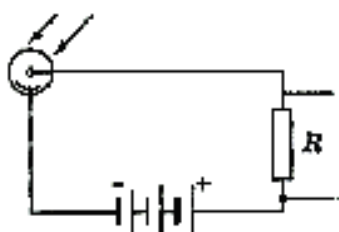


Рис. 14.3

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом

применяются в фотореле, в звукозаписи кино и т.д. (рис. 14.3).

#### 14.4 Световое давление

**Световое давление** – это давление, которое производит электромагнитная волна, падающая на поверхность тела (теоретически обосновал Максвелл, впервые установил и исследовал на опыте П.Н. Лебедев).

В явлении светового давления наглядно проявляется **корпускулярно-волновой дуализм** (двойственность) света.

Свет обладает волновыми свойствами (интерференция, дифракция, поляризация света), а с другой стороны – свет представляет собой поток фотонов – квантов, являющихся частицами.

Световое давление качественно и количественно объясняется как квантовыми, так и волновыми свойствами света.

При малых частотах преобладают волновые свойства, при больших частотах квантовые свойства света.

Энергия фотона прямо пропорциональна частоте света.

**Формула Максвелла:**

$$p_{\text{свет}} = (1 + r)\omega = (1 + r)\frac{u}{c}. \quad (14.8)$$

где  $r$  – коэффициент отражения;

$\omega$  – плотность энергии электромагнитной волны;

$u$  – плотность потока световой энергии;

$c$  – скорость света.

Так как скорость распространения света  $c$  весьма велика, то при практически достижимых потоках световой энергии световое давление мало. Так, прямые солнечные лучи в яркий день оказывают при полном поглощении давление в 0,4 мг на квадратный метр.

Благодаря столь ничтожному значению светового давления, заметить его трудно. Впервые экспериментально световое давление обнаружено и измерено профессором Московского университета П. Н. Лебедевым. Основной частью прибора Лебедева являлся очень легкий подвес на тонкой нити, к которому прикреплены легкие крылышки  $a$  и  $b$  для наблюдения светового давления (рис. 14.4), одно из которых (например,  $a$ ) зачернено, а другое оставлено блестящим.

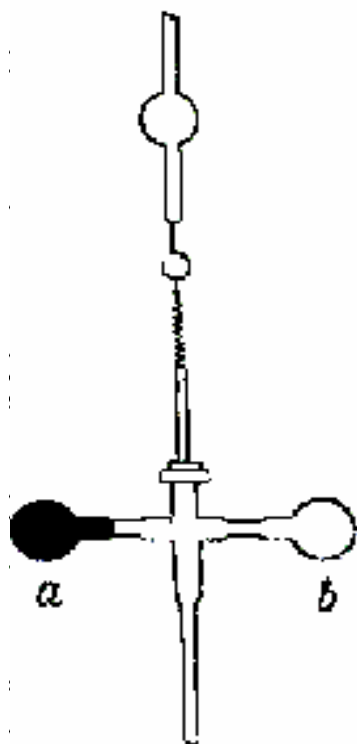


Рис. 14.4

Импульс фотона передается (поглощается) атомам или молекулам тела с черной поверхностью. При отражении от зеркальной поверхности

импульс фотона  $\frac{h\nu}{c}$  изменяется на противоположный, а частицам вещества

передается импульс  $2\frac{h\nu}{c}$ :

а) при поглощении:

$$\Delta p = \frac{h\nu}{c}; \quad (14.9)$$

б) при отражении:

$$\Delta p = -2\frac{h\nu}{c} \quad (14.10).$$

Благодаря световому давлению, оказываемому на крылышко, подвес поворачивался и закручивал нить, на которой он был подвешен.

Сравниваю закручивания, вызванные при освещении зачерненного и блестящего крылышек, П.Н. Лебедев мог установить, что в соответствии с теорией, давление на зачерненную поверхность вдвое меньше давления на отражающую поверхность.

### ***Новые слова, словосочетания, языковые конструкции***

благодаря	подвешен
закручивание	порог
квант	световое давление
двойственный	фотон
дуализм	фотоспротивление
корпускулярно – волновой	фотоэлектрон
крылышки	фотоэлемент
поворачиваться	фотоэффект
подвес	

#### **1. Благодаря чему происходит что.**

**Благодаря световому давлению, оказываемому на крылышко, подвес поворачивался и закручивал нить, на которой он был подвешен.**

#### ***Контрольные вопросы:***

1. Какие факты свидетельствуют о наличии у света корпускулярных свойств?
2. От чего зависит энергия фотона?
3. Как определить массу, импульс фотона?
4. Какова размерность постоянной Планка?
5. Когда было открыто явление внешнего фотоэффекта?
6. Что называется внутренним фотоэффектом?
7. В чем сущность законов внешнего фотоэффекта?

8. Что такое квант света и как связана его энергия с частотой?
9. Что выражает уравнение Эйнштейна для фотоэффекта?
10. Как можно объяснить законы фотоэффекта на основе квантовой теории света?
11. Как можно объяснить красную границу фотоэффекта?
12. Какими свойствами одновременно обладает свет?
13. При каком условии проявляется квантовая природа света?
14. Кем было теоретически обосновано существование светового давления?
15. Кем было экспериментально доказано световое давление?
16. Чему равно световое давление?
17. Чем подтверждается реальность существования фотонов? Какими свойствами обладает свет?
18. В чем заключается двойственная природа света?

## 15 АТОМ И АТОМНОЕ ЯДРО

### 15.1 ФИЗИКА АТОМА

#### 15.1.1 Планетная модель атома Резерфорда

##### Планетарная (ядерная) модель атома Резерфорда.

Резерфорд, наблюдая рассеивание  $\alpha$ -частиц при прохождении их через золотую фольгу, обосновал модель атома.

Атом состоит из положительно заряженного атомного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома. Вокруг него на определенных орбитах движутся электроны.

В целом атом нейтрален. Поэтому *число внутриатомных электронов, как и заряд ядра, равно порядковому номеру элемента в периодической системе.* Ясно, что покоиться электроны внутри атома не могут, так как они упали бы на ядро. Они движутся вокруг ядра, подобно тому как планеты обращаются вокруг Солнца. Такой характер движения электронов определяется действием кулоновских сил со стороны ядра.

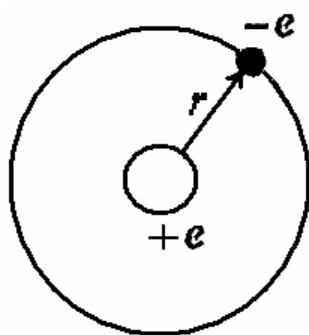


Рис. 15.1

В атоме водорода вокруг ядра обращается всего лишь один электрон. Ядро атома водорода имеет положительный заряд, равный по модулю заряду электрона, и массу, примерно в 1836,1 раза большую массы электрона. Это ядро было названо **протоном** ( $p$ ) и стало рассматриваться как элементарная частица. Размер атома – это радиус орбиты его электрона (рис. 15.1).

Линейные размеры ядра  $10^{-15} - 10^{-14}$  м.

Линейные размеры атома  $\approx 10^{-10}$  м.

Простая и наглядная планетарная модель атома имеет прямое экспериментальное обоснование. Она кажется совершенно необходимой для объяснения опытов по рассеянию  $\alpha$ -частиц. Но на основе этой модели нельзя объяснить факт существования атома, его устойчивость. Ведь движение электронов по орбитам происходит с ускорением, причем весьма немалым. Ускоренно движущийся заряд по законам электродинамики Максвелла должен излучать электромагнитные волны с частотой, равной частоте его обращения. Излучение сопровождается потерей энергии. Теряя энергию, электроны должны приближаться к ядру, подобно тому как спутник приближается к Земле при торможении в верхних слоях атмосферы. Как показывают строгие расчеты, основанные на механике Ньютона и электродинамике Максвелла, электрон за ничтожное время (порядка  $10^{-8}$  с) должен упасть на ядро. Атом должен прекратить свое существование.

В действительности ничего подобного не происходит. Атомы устойчивы и в невозбужденном состоянии могут существовать неограниченно долго, совершенно не излучая электромагнитные волны. Не согласующийся с опытом вывод о неизбежной гибели атома вследствие потери энергии на излучение – это результат применения законов классической физики к явлениям, происходящим внутри атома. Отсюда следует, что к явлениям атомных масштабов законы классической физики неприемлемы.

### 15.1.2 Постулаты Бора. Теория атома водорода

Кризис в теории атома был преодолен в 1913 г. датским физиком **Н. Бором**.

В основе квантовой теории строения атома, развитой Бором (боровская теория строения атома), лежит идея, объединения в единое целое:

- а) закономерностей линейчатого спектра атома водорода, выраженных в формуле Бальмера – Ридберга;
- б) ядерной модели атома Резерфорда, не допускающей классического объяснения;
- в) квантового характера излучения и поглощения света.

Бор, сохраняя классический подход к описанию поведения электрона в атоме, выдвинул **два постулата которые называются постулатами Бора**.

Разрабатывая теорию атома водорода, Бор использовал планетарную модель Резерфорда. Согласно этой модели на электрон, вращающийся вокруг ядра с зарядом  $+e$  по окружности радиуса  $r$  со скоростью  $v$ , действует кулоновская сила  $F_k = ke^2 / r^2$ . Эта сила сообщает электрону

центростремительное ускорение  $a_n = v^2 / r$ . По второму закону Ньютона:

$$\boxed{m_e \frac{v^2}{r} = k \frac{e^2}{r^2}} \quad (15.1)$$

**Первый постулат Бора.**

*В устойчивом атоме электрон может двигаться лишь по особым, стационарным орбитам, не излучая при этом электромагнитной энергии.*

**Гипотеза де Бройля.**

На длине окружности каждой стационарной орбиты укладывается целое число  $n$  длин волн де Бройля  $\lambda_B = \frac{h}{m_e v}$ , соответствующих движению электрона:

$$\boxed{\frac{2\pi r}{\lambda_B} = n}, \quad (15.2)$$

где  $n$  – главное квантовое число;  $n = 1, 2, 3, \dots$ .

Условие (15.2) учитывает волновые свойства электрона, хотя было предложено Бором до появления гипотезы де Бройля в виде правила **квантования орбит.**

*На стационарной орбите момент импульса электрона квантуется (кратен постоянной Планка  $\hbar$ ):*

$$\boxed{m_e v r = n \hbar}, \quad (15.3)$$

где  $\hbar = h / 2\pi = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж · с – постоянная Планка (аш перечеркнутое);  $n = 1, 2, 3, \dots$ .

В классической механике величина  $L = m v r$  называется моментом импульса. Момент импульса – векторная физическая величина.

Равенство (15.2) Бор определял как условие квантования орбитального момента импульса. *Орбитальный момент импульса электрона кратен  $\hbar$ .* Кроме движения вокруг ядра по орбите электрон вращается вокруг собственной оси. При этом его собственный, или спиновой, момент импульса равен  $\hbar / 2$ . Говорят, что электрон обладает *полуцелым спином (в единицах  $\hbar$ )*. Являясь вращающейся вокруг своей оси заряженной частицей, электрон создает собственное магнитное поле (подобно току, протекающему по кольцевому проводнику).

Возможные значения радиусов стационарных орбит определяются выражением:

$$\boxed{r_n = \frac{\hbar^2}{k m_e e^2} n^2}, \quad (15.4)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$ .



Радиусы стационарных орбит квантованы, т.е. имеют дискретные значения, пропорциональные квадрату главного квантового числа.

Атом имеет минимальный размер, когда  $n = 1$ . Радиус первой орбиты электрона, ближайшей к ядру, равен:

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{km_e e^2} = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м.} \quad (15.5)$$

Скорость движения электрона по  $n$ -й орбите можно найти, подставив выражение (15.4) в формулу (15.3):

$$\nu_n = k \frac{e^2}{\hbar} \frac{1}{n}, \text{ где } n = 1, 2, 3, \dots \quad (15.6)$$

Скорость электрона максимальна на первой боровской орбите:

$$\nu_1 = k \frac{e^2}{\hbar} \approx 2,2 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$$

**Энергетический спектр атома водорода.** Энергия электрона в атоме складывается из его кинетической энергии и потенциальной кулоновской энергии взаимодействия с ядром:

$$E = \frac{m_e \nu^2}{2} - \frac{ke^2}{\kappa} \quad (15.7)$$

Нуль потенциальной энергии электрона выбран на бесконечном расстоянии от ядра. Знак минус соответствует энергии притяжения отрицательного и положительного зарядов. Подставляя в последнее выражение значения радиуса стационарных орбит (15.4) и скорости движения по ним электрона (15.6), получаем возможную величину энергии электрона в атоме:

$$E_n = -\frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}, \quad (15.8)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$

Энергия электрона в атоме принимает не любые, а дискретные значения, т.е. квантуется.

**Боровская орбита** – это геометрическое место точек, в которых с наибольшей вероятностью можно обнаружить электрон (где плотность электронного облака наибольшая), поскольку электрон в атоме проявляет как корпускулярные свойства, так и волновые.

**Основное состояние атома** (молекулы) – состояние с минимальной энергией.

Атом водорода имеет определенный спектр энергий. Состояние атома с  $n = 1$  называют **основным состоянием**.

Энергия основного состояния электрона в атоме водорода:

$$E_1 = -\frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2} = -13,6 \text{ эВ.} \quad (15.9)$$

В основном состоянии электрон находится ближе всего к ядру и его энергия связи с ядром максимальна по модулю.

**Возбужденные состояния атома – состояния с  $n > 1$ .** Чем больше главное квантовое число  $n$ , тем дальше от ядра находится электрон, тем выше его энергетический уровень.

При  $n \rightarrow \infty$  электрон удаляется от ядра на бесконечно большое расстояние, а его энергия связи с ядром стремится к нулю. Это означает, что при  $E = 0$  электрон уже не связан с ядром, становясь свободной частицей.

**Свободные состояния электрона – энергетические состояния с положительной энергией электрона.**

В свободном состоянии скорость электрона и его кинетическая энергия может быть любой. *Энергетический спектр свободных состояний непрерывен.*

Двигаясь по орбите вокруг ядра, электрон связан с атомом, или, говорят, находится в связанном состоянии.

**Связанные состояния электрона – энергетические состояния с отрицательной энергией электрона.**

Согласно формуле (15.8), *энергетический спектр связанных состояний дискретен.*

**Второй постулат Бора (правило частот).**

*При переходе атома из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается один фотон. Атом излучает (поглощает) один квант электромагнитной энергии, когда электрон переходит орбиты с большим (меньшим) на орбиту с меньшим (большим) главным квантовым числом. Энергия фотона равна разности энергий атома в двух его стационарных состояниях:*

$$\boxed{h\nu_{kn} = E_k - E_n}. \quad (15.10)$$

Если  $E_k > E_n$ , то происходит излучение фотона; если  $E_k < E_n$  – поглощение фотона.

Подставляя значения энергии атома в начальном и конечном состояниях, получаем:

$$\nu_{kn} = \frac{k^2 m_e e^4}{4\pi\hbar^3} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (15.11)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;  $k > n$ .

Все возможные частоты, определяемые этим выражением, дают спектр излучения атома водорода, хорошо согласующийся с экспериментальными данными.

Спектр составляют ряд серий излучения, каждая из которых образуется при переходах атома в одно из фиксированных нижних

энергетических состояний  $n$  из всех возможных верхних энергетических состояний  $k$  ( $k > n$ ).

**Основные излучательные процессы атомов:** поглощение света, спонтанное и вынужденное излучения.

### 15.1.3 Поглощение и излучение света атомом

Рассмотрим теперь возможные процессы взаимодействия атома с фотоном. Пусть энергия фотона

$$h\nu = E_2 - E_1, \quad (15.12)$$

где  $E_2$ ,  $E_1$  – энергии основного и возбужденного состояний атома.

1. **Поглощение света.** Электрон атома, находящийся в основном состоянии с энергией  $E_1$ , может поглотить фотон, перейдя в возбужденное состояние с энергией  $E_2 > E_1$ . Интенсивность поглощенного излучения пропорциональна концентрации  $n_1$  атомов, находящихся в основном состоянии.

Для вырывания электрона из атома требуется дополнительная энергия, чтобы преодолеть кулоновское притяжение электрона к ядру.

**Энергия ионизации** – минимальная энергия, которую нужно затратить для перевода электрона из основного состояния атома в свободное состояние:

$$I_1 = |E_1|. \quad (15.13)$$

Ионизация атома может происходить, например, под действием падающего на него фотона с энергией  $h\nu_1 \geq I_1$ . При этом электрон поглощает фотон, покидая атом. Если энергия фотона недостаточна для ионизации атома ( $h\nu < I_1$ ), электрон, находящийся на первой боровской орбите (в основном состоянии с энергией  $E_1$ ), под действием фотона может перескочить на другую орбиту (соответствующую возбужденному состоянию с энергией  $E_k$ ). Согласно закону сохранения энергии, этот переход электрона из основного состояния в возбужденное возможен, если частота  $\nu_m$  поглощаемого фотона удовлетворяет соотношению:

$$\boxed{h\nu_{k1} = E_k - E_1}. \quad (15.14)$$

При наличии фотонов соответствующих частот возможно поглощение света, приводящее к переходам между возбужденными состояниями, а также ионизации атома, находящегося в возбужденном состоянии.

2. **Спонтанное излучение** – излучение испускаемое при самопроизвольном переходе атома из одного состояния в другое. В отсутствие внешних полей или столкновений с другими частицами электрон, находящийся в возбужденном состоянии, через время

порядка  $10^{-8} - 10^{-7}$  с самопроизвольно (спонтанно) возвращается в основное состояние.

3. **Индucedированное (вынужденное) излучение** – *излучение атома, возникающее при его переходе на более низкий энергетический уровень под действием внешнего электромагнитного излучения.*

В 1917 г. Эйнштейн предсказал, что возбужденный атом может излучать под действием падающего на него света.

Интенсивность индуцированного излучения пропорциональна концентрации  $n_2$  атомов, находящихся в возбужденном состоянии. При этом у световой волны, возникшей при индуцированном излучении, **частота, фаза, поляризация и направление распространения оказываются такими же, как и у волны, падающей на атом.** Тем самым увеличивается интенсивность внешнего излучения – возникает оптическое усиление.

**Виды излучений.**

Для того чтобы излучить фотон, атом должен обладать избыточной энергией по сравнению с энергией основного состояния, т.е. атомный электрон должен находиться в возбужденном состоянии. Так как любая система стремится занять состояние с минимальной энергией, то в термодинамическом равновесии большинство атомов находится в основном состоянии. Переход атома в возбужденное состояние возможен при сообщении ему энергии извне.

*Тепловое излучение* возникает при тепловых столкновениях атомов.

Кроме теплового излучения возможен еще один вид излучения – *люминесцентное* (от лат. *luminis* – свет).

Люминесцентные явления различаются механизмом возбуждения атомов. *Катодолюминесценция* возникает при бомбардировке атомов электронами, *фотолюминесценция* – при облучении вещества видимым светом, рентгеновским или гамма-излучением, *хемилюминесценция* – при химических реакциях. *Флуоресценция* – кратковременная люминесценция (заканчивающаяся через  $10^{-8}$  с после возбуждения атомов). *Фосфоресценция* – длительная люминесценция.

На явлении люминесценции основана работа люминесцентных ламп, в несколько раз более экономичных, чем лампы накаливания. Внутренняя поверхность люминесцентных ламп покрыта люминофором – веществом, в котором происходит люминесценция (в лампах – фотолюминесценция, в электронных трубках – катодолюминесценция). Опыты по исследованию фотолюминесценции впервые в России были проведены в 50-х г.г. XX в. С.И. Вавиловым.

**Спектральный анализ.** Атомы каждого химического элемента излучают определенные длины волн и имеют *линейчатый спектр*, характерный именно для этого элемента.

**Линейчатый спектр** – *спектр излучения, состоящий из отдельных узких спектральных линий различной интенсивности.*

Исследование линейчатого спектра позволяет определить, из каких именно химических элементов состоит излучающее вещество и в каком количестве в нем содержится каждый элемент. **Спектральный анализ** – *метод определения химического состава и других характеристик вещества по его спектру.*

Высокая чувствительность этого метода позволяет обнаруживать в веществе примеси массой до  $10^{-10}$  г, а также состав небесных тел, удаленных от Земли на миллиарды световых лет. Подобно дактилоскопическим отпечаткам, линейчатые спектры неповторимо индивидуальны.

#### 15.1.4 Лазер

**Принцип действия лазера.** В 1939 г. российский физик В.А. Фабрикант наблюдал экспериментально усиление электромагнитных волн (оптическое усиление) в результате процесса индуцированного излучения.

Российские ученые Н.Г. Басов и А.М. Прохоров и американский физик Ч. Таунс, создавшие в 1954 г. квантовый генератор излучения, работающий в сантиметровом диапазоне, были удостоены в 1964г. Нобелевской премии по физике. Первый лазер, работающий на кристалле рубина в видимом диапазоне, был создан в 1960 г. американским физиком Т. Мейманом. Слово «лазер» образовано начальными буквами английской слов *light amplification by stimulated emission of radiation* («усиление света с помощью вынужденного излучения»).

**Лазер** – *источник излучения, усиливаемого в результате индуцированного излучения.*

Усиление излучения, падающего на среду, возникает тогда, когда интенсивность индуцированного излучения превысит интенсивность поглощенного излучения. Это произойдет в случае инверсной населенности, если в возбужденном состоянии находится больше частиц, чем в основном:

$$n_2 > n_1.$$

В состоянии термодинамического равновесия, электрон с большей вероятностью будет находиться в состоянии с меньшей энергией  $E_1$ , т.е.  $n_1 > n_2$ , усиления не происходит.

**Инверсная населенность энергетических уровней** – *неравновесное состояние среды, при котором концентрация атомов в возбужденном состоянии, больше чем концентрация атомов в основном состоянии.*

Спонтанные переходы являются фактором, препятствующим накоплению атомов в возбужденном состоянии. Этим можно пренебречь, если возбужденное состояние метастабильно.

**Метастабильное состояние** – *возбужденное состояние электрона в атоме, в котором он может находиться достаточно долго (например,  $10^{-3}$  с) по сравнению с обычным возбужденным состоянием ( $10^{-8}$  с).*

В настоящее время существует много различных типов и конструкций лазеров. **Основные особенности лазерного излучения следующие:**

- лазерное излучение обладает исключительной монохроматичностью и когерентностью;
- пучок света лазера имеет очень малый угол расхождения (около  $10^{-5}$  рад);
- лазер – наиболее мощный искусственный источник света. Напряженность электрического поля в электромагнитной волне, излучаемой лазером, превышает напряженность поля внутри атома.

**Применение лазеров.** Лазеры нашли применение в различных областях науки, техники и медицины. Очень перспективно применение лазерного излучения для космической связи, в светолокаторах, измеряющих большие расстояния с точностью до миллиметров, для передачи телевизионных и компьютерных сигналов по оптическому волокну. Лазеры используются при считывании информации с компакт-дисков, со штрих-кодов товаров. С помощью луча лазеров малой интенсивности можно проводить хирургические операции, например «приваривать» отслоившуюся от глазного дна сетчатку, делать сосудистые операции. Излучение мощных лазеров сваривает и разрезает металлические листы. Перспективно использование мощного лазерного излучения для осуществления управляемой термоядерной реакции.

Лазеры применяются также для топографической съемки, потому что луч лазера задает идеальную прямую линию. Направление тоннеля под проливом Ла-Манш задавалось лазерным лучом. С помощью лазерного излучения получают голографические трехмерные объемные изображения.

Создание лазеров – результат использования фундаментальных физических законов в прикладных исследованиях. Оно привело к гигантскому прогрессу в различных областях техники и технологии.

## Новые слова, словосочетания и языковые конструкции

анализ	поглощает
дискретные значения	планетарная модель
излучает	порядковый номер
излучение индуцированное	постулаты
излучение люминесцентное	рассеивание
излучение спонтанное	состояние атома возбужденное
излучение тепловое	состояние атома основное
инверсная населенность	состояние атома метостабильное
ионизация	спектр
катодолюминесценция	спектральный
квант	стационарное состояние
лазер	топографическая съемка
линейчатый спектр	укладывается
модель	уровень
орбита	фольга
орбита боровская	фотон
орбита стационарная	энергия ионизация
объемное изображение	энергетический уровень

### 1. Что сосредоточено где.

*Вся масса атома практически сосредоточена в его ядре.*

### 2. Что описывает что.

*Теория Бора описывает атомы с одним вращающимся вокруг ядра электроном.*

### 3. Что имеет что.

*Атом водорода имеет определенный спектр энергии.*

### 4. Что сопровождается чем.

*Поглощение света сопровождается переходом атома из основного состояния в возбужденное.*

### 5. Когда возможно что.

*При наличии фотонов соответствующих частот возможно поглощение света.*

### 6. Что возникает когда.

*Тепловое излучение возникает при тепловых столкновениях атомов.*

### Контрольные вопросы

1. В чем состоит планетарная модель атома?
2. В чем логическая непоследовательность планетарной модели атомов?
3. Сформулируйте первый постулат Бора.
4. Сформулируйте правило квантования.
5. Как квантуются ресурсы стационарных орбит в атоме водорода?

6. Как квантуется энергия электрона в атоме водорода? Чему равна энергия электрона в основном состоянии атома?
7. Какие энергетические состояния электрона в атоме называют связанными; свободными? Кратко охарактеризуйте их.
8. Какие переходы электрона в атоме возможны при поглощении света? Какую энергию называют энергией ионизации?
9. Сформулируйте второй постулат Бора.
10. Запишите выражения для спектра электромагнитных волн, излучаемых и поглощаемых атомом водорода.
11. Перечислите и кратко охарактеризуйте основные виды излучений.
12. На каких физических принципах основан спектральный анализ? Приведите примеры избирательного поглощения электромагнитного излучения атмосферой Земли.
13. Какие возможны процессы взаимодействия атома с фотоном?
14. Какой источник излучения называют лазером?
15. Какую населенность энергетических уровней атома (молекулы) называют инверсной? Какое состояние электрона в атоме называют метастабильным?
16. Опишите принцип действия рубинового лазера. Охарактеризуйте основные особенности лазерного излучения.
17. Как используются лазеры в различных областях науки, техники и медицины?

## 15.2 Физика атомного ядра

### 15.2.1 Открытие протона и нейтрона

1919 г. **Э. Резерфорд** осуществляет 1-ю ядерную реакцию и открывает протон ( $p$ ):



**Протон** – элементарная частица с массой покоя чуть больше 1 а.е.м. ( $1,67 \cdot 10^{-27}$  кг) и электрическим зарядом  $+e$  ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл).

1932 г. **Д. Чедвик** открывает нейтрон ( $n$ ):



**Нейтрон** – элементарная частица с массой покоя чуть больше массы покоя протона, не имеющая электрического заряда.

По современным представлениям протон и нейтрон являются двумя разными состояниями одной и той же частицы – **нуклона** (от лат. nucleus – ядро).

*Протон* – нуклон в заряженном состоянии, *нейтрон* – в нейтральном. Для обозначения протона в ядерных реакциях используют символ  ${}^1_1p$ , а нейтрона  ${}^1_0n$ . Нижний индекс характеризует электрический



заряд частицы, кратный заряду ( $+e$ ) протона (или зарядовое число  $Z$ ), верхний – число нуклонов, которое содержит частица (или массовое число  $A$ ).

Подобно электрону, протон и нейтрон имеют спиновой момент импульса, равный  $\hbar/2$ , т.е. *протон и нейтрон обладают полуцелым спином (в единицах  $\hbar$ )*.

### 15.2.2 Теория строения ядра

#### Протонно-нейтронная модель ядра.

Согласно протонно-нейтронной модели ядра, предложенной в 1932 г. российским физиком **Д.Д. Иваненко** и **В. Гейзенбергом**, **ядра состоят из элементарных частиц двух сортов: протонов и нейтронов.**

Число протонов в ядре равняется числу электронов в атомной оболочке, так как в целом атом нейтрален. Следовательно, число протонов в ядре равно атомному номеру элемента  $Z$  в таблице Менделеева.

Сумму числа протонов  $A = Z + N$ . (15.17)

Так как массы протона и нейтрона близки друг к другу, то массовое число равно округленной до целого числа относительной атомной массе элемента. Массовые числа могут быть определены путем грубого изменения масс ядер приборами, не обладающими особо большой точностью.

Для протонов и нейтронов ввели новое название – **нуклоны**, т.е. ядерные частицы.

$A$  – **массовое число атома** (округленная до целого относительная атомная масса) равно числу нуклонов в ядре.

$Z$  – **число протонов в ядре** (порядковый номер элемента в таблице Менделеева).

$N = A - Z$  – **число нейтронов** в ядре.

**Изотопы** – *атомы одного и того же химического элемента, имеющие одинаковое число протонов в ядре (зарядовое число  $Z$ ) и разное число  $N$  нейтронов.*

Ядра изотопов имеют одно и то же значение  $Z$ , но различные массовые числа  $A$ , т.е. различное число нейтронов  $N$ .

Вследствие электронейтральности атома число  $Z$  протонов в ядре (*зарядовое число*), имеющих заряд  $(+Ze)$ , равно числу  $Z$  электронов с полным зарядом  $(-Ze)$ , движущихся вокруг ядра. Например, один электрон атома водорода удерживается вблизи ядра одним протоном. При этом в ядре различных изотопов (от греч. *isos* – одинаковый, *topos* – место) атома водорода может находиться не только протон, но и разное число  $N$  нейтронов.

Водород имеет три изотопа:  ${}^1_1\text{H}$  – протий (в ядре только один протон),  ${}^2_1\text{H}$  – дейтерий (в ядре – протон и нейтрон),  ${}^3_1\text{H}$  – тритий (в ядре – протон и два нейтрона).

*Ядро любого атома состоит только из протонов и нейтронов (нуклонов), которые в ядрах некоторых атомов могут превращаться друг в друга:*

- *если протон превращается в нейтрон, то образуется позитрон и сопровождающее его нейтрино:*



- *если нейтрон превращается в протон, то образуется электрон и сопровождающее его антинейтрино (**антинейтрино** – нейтральная частица с ничтожно малой массой покоя):*



В ядре протоны и нейтроны прочно связаны внутриядерными силами. В основе внутриядерных сил лежат обменные силы (**сильное взаимодействие**). Протоны и нейтроны непрерывно обмениваются частицами  $\pi$ -мезонами ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ ). Обменные силы на много порядков (в 100 раз) превышают кулоновские силы отталкивания одноименно заряженных протонов.

### 15.2.3 Энергия связи ядра. Дефект массы

По соотношению Эйнштейна между массой и энергией **энергия ядра**:

$$E = m_{\text{я}} c^2. \quad (15.20)$$

Точнейшие измерения масс ядер показывают, что масса покоя ядра  $m_{\text{я}}$  всегда меньше суммы масс покоя слагающих его протонов и нейтронов:

$$m_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n .$$

**Дефект массы ядра равен разности между суммами масс покоя нуклонов в свободном состоянии и массой покоя ядра:**

$$\boxed{\Delta m_{\text{я}} = Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}}}. \quad (15.21)$$

Разность масс положительна. В частности, для гелия масса ядра на один процент меньше суммы масс двух протонов и двух нейтронов. Соответственно для одного моля гелия  $\Delta m = 0,286$  г.

Уменьшение массы при образовании ядра из частиц означает, что при этом уменьшается энергия этой системы частиц на значение энергии связи  $\Delta E_{\text{св}}$ .

**Энергия связи ядра** – это энергия, необходимая для расщепления ядра на отдельные нуклоны; соответственно, это энергия, которая

выделяется при образовании ядра из отдельных свободных нуклонов.

Энергия связи ядра определяется по дефекту массы ядра:

$$E_{\text{св я}} = \Delta m_{\text{я}} c^2 . \quad (15.22)$$

$$\Delta E_{\text{св}} = \Delta m_{\text{я}} c^2 = (Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}}) c^2 . \quad (15.23)$$

Но куда при этом деваются энергия  $\Delta E_{\text{св}}$  и масса  $\Delta m$  ?

При образовании ядра из частиц последние за счет действия ядерных сил на малых расстояниях устремляются с огромным ускорением друг к другу. Излучаемые при этом  $\gamma$ -кванты обладают энергией  $\Delta E_{\text{св}}$  и массой

$$\Delta m = \frac{\Delta E_{\text{св}}}{c^2} .$$

Энергия связи ядра обычно измеряется в МэВ:

$$1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ} = 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} . \quad (15.24)$$

Энергия связи ядра  ${}^4_2\text{He}$  равна 28 МэВ.

О том, как велика энергия связи, можно судить по такому примеру: образование 4 г гелия сопровождается выделением такой же энергии, что и сгорание 1,5 – 2 вагонов каменного угля.

**Удельная энергия связи** – энергия связи, приходящаяся на один нуклон.

**Пример.** Рассчитаем среднюю (удельную) энергию связи нуклона в атоме углерода  ${}^{12}_6\text{C}$ . Для этого найдем сначала полную энергию связи  $E_{\text{св}}$  всех нуклонов в ядре, определяемую через дефект массы:

$$E_{\text{св}} = \Delta m c^2 . \quad (15.25)$$

Известно, что  $m_a = 12 \text{ а.е.м.}$ ,  $m_p = 1,007276 \text{ а.е.м.}$ ,  $m_n = 1,008665 \text{ а.е.м.}$ ,  $m_e = 0,000549 \text{ а.е.м.}$  Масса ядра:

$$m_{\text{я}} = (m_a - 6m_e) = 11,99706 \text{ а.е.м.} \quad (15.26)$$

Масса нуклонов:

$$6m_p + 6m_n = 12,095646 \text{ а.е.м.} \quad (15.27)$$

Дефект массы:

$$\Delta m = 6(m_p + m_n) - m_{\text{я}} = 0,09894 \text{ а.е.м.} \quad (15.28)$$

Энергия связи всех нуклонов в ядре:

$$E_{\text{св}} = 0,09894 \text{ а.е.м.} \cdot 931,5 \text{ МэВ/а.е.м.} = 92,16 \text{ МэВ.} \quad (15.29)$$

Удельная энергия связи нуклона:

$$(E_{\text{св}})_1 = \frac{E_{\text{св}}}{A} = \frac{92,16}{12} = 7,68 \text{ МэВ/нуклон} . \quad (15.30)$$

**Задача.** Вчислить дефект массы и энергию связи ядра кислорода  $^{17}_8\text{O}$ . Известно, что  $m_p = 1,007276 \text{ а.е.м.}$ ,  $m_n = 1,008665 \text{ а.е.м.}$ ,  $m_{\text{я}} = 16,99913 \text{ а.е.м.}$

**Решение:**

Дефект массы равен:

$$\Delta m_{\text{я}} = Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}}. \quad (15.31)$$

Так как  $Z = 8$ , а  $N = A - Z = 17 - 8 = 9$ , то

$$\Delta m_{\text{я}} = (8 \cdot 1,00728 + 9 \cdot 1,00866 - 16,99913) \text{ а.е.м.} = 0,13705 \text{ а.е.м.}$$

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,6605655(86) \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Следовательно,

$$\Delta m_{\text{я}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot 0,13705 \text{ кг} = 2,28 \cdot 10^{-28} \text{ кг.}$$

Энергию связи ядра найдем по формуле (15.23):

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{св}} = \Delta m_{\text{я}} c^2 &= 2,28 \cdot 10^{-28} \text{ кг} \cdot \left( 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)^2 = 2,05 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} = \\ &= 1,28 \cdot 10^2 \text{ МэВ} = 128 \text{ МэВ} \end{aligned}$$

**Ответ:** 128 МэВ можно получить короче, если воспользоваться тем, что энергетический эквивалент 1 а.е.м. равен 931,5 МэВ:

$$\Delta E_{\text{св}} = 0,13705 \text{ а.е.м.} \cdot 931,5 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}} \approx 128 \text{ МэВ.}$$

**Примечание.** В этой задаче мы пользовались числовыми значениями некоторых постоянных, которые можно использовать при решении других задач:

- 1)  $1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ ; (а.е.м. = 1/12 изотопа  $^{12}_6\text{C}$ );
- 2) энергетический эквивалент 1 а.е.м. равен  $(1 \text{ а.е.м.}) c^2 = 931,5 \text{ МэВ}$ .

#### 15.2.4 Ядерные реакции

Два способа высвобождения внутриядерной энергии:

- а) деление тяжелых ядер (например  $^{235}_{92}\text{U}$ ) на более легкие;
- б) слияние легких ядер, например изотопов водорода, в более тяжелые (синтез более тяжелых, например гелия).

**Ядерными реакциями** называются превращения ядер при взаимодействии с элементарными частицами или друг с другом.

Ядерная реакция протекает так: ядро захватывает бомбардирующую частицу, поглощает ее энергию, переходит в неустойчивое состояние и распадается. Реакция, протекающая с поглощением энергии, - эндотермическая, с выделением энергии - экзотермическая.

## 15.2.5 Естественная радиоактивность

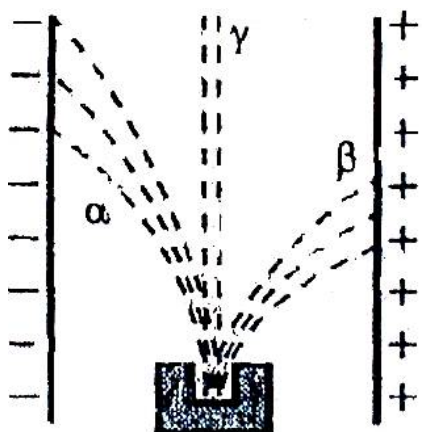


Рис. 15.2

Это самопроизвольные превращения ядер одних атомов в ядра других с испусканием трехкомпонентного излучения: ядер гелия ( $\alpha$ -частицы), быстрых электронов ( $\beta$  частицы) и электромагнитных волн типа рентгеновских ( $\gamma$ -лучи) (рис. 15.2).

1.  **$\alpha$ -распад.** В некоторых тяжелых ядрах  $2p$  и  $2n$  вступают в замкнутое взаимодействие и выталкиваются из ядра. В результате тяжелое ядро испускает  $\alpha$ -частицу (ядро  ${}^4_2\text{He}$ ) и превращается в новое ядро, смещаясь на две клетки к началу таблицы Менделеева:



2.  **$\beta$ -распад.** В некоторых ядрах нейтрон преобразуется в протон с образованием электрона и антинейтрино, которые излучаются ядром, а ядро превращается в новое, смещенное к концу таблицы Менделеева на одну клетку. Возникающий поток электронов называют  $\beta$ -излучением:



3.  **$\gamma$ -излучение.** Ядра, оказавшиеся в возбужденном состоянии, излучают квант электромагнитного излучения высокой частоты ( $\gamma$ -квант), переходя в стационарное состояние:



### Интересные факты.

Расстояние, которое проходят до остановки различные излучения:

- а) в воздухе:  $\alpha$  – от 3 до 9 см;  $\beta$  – до 40 м;  $\gamma$  – несколько сотен метров;  
 б) в биологической ткани:  $\alpha$  – до 0,1 мм;  $\beta$  – до 6 см;  $\gamma$  – пересекает всего человека.

## 15.2.6 Закон радиоактивного распада

**Закон радиоактивного распада** (рис. 15.3):

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}, \quad (15.35)$$

где  $N$  – число радиоактивных атомов в данный момент времени;  
 $N_0$  – число радиоактивных атомов в начальный момент времени;  
 $T$  – **период полураспада** – время, за которое распадается половина радиоактивных атомов.

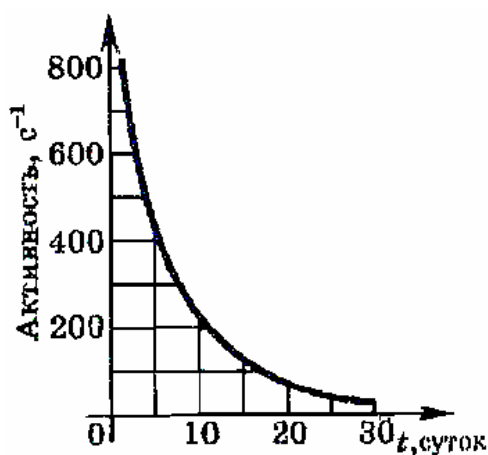


Рис. 15.3

### Интересные факты.

*Период полураспада:*

углерод  $^{11}_6\text{C}$  – 20 минут;

углерод  $^{14}_6\text{C}$  – 5600 лет;

йод  $^{131}_{53}\text{I}$  – 8 суток;

кальций  $^{45}_{20}\text{Ca}$  – 165 суток;

стронций  $^{89}_{38}\text{Sr}$  – 50,5 суток;

кобальт  $^{60}_{27}\text{Co}$  – 5,3 года;

уран  $^{235}_{92}\text{U}$  –  $7,1 \cdot 10^8$  лет.

Удельная энергия связи ядер возрастает к середине системы Менделеева. Энергия выделяется при

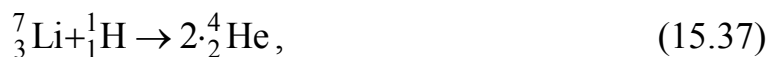
соединении легких ядер или при делении тяжелых.

**Термоядерные реакции** – так называют реакции синтеза ядер из более легких, поскольку для слияния ядер исходные вещества нужно нагреть настолько, чтобы кинетическая энергия ядер превышала энергию отталкивания их протонов.

**Термоядерный синтез** легких ядер (происходит при температурах в десятки миллионов градусов). Энергия выделяется в виде кинетической энергии образующихся ядер и частиц и сопровождается  $\gamma$  – излучением:



выделяется 17,6 МэВ;



выделяется 14,6 МэВ.

Выделяемая энергия равна произведению величины дефекта массы ядерной реакции на квадрат скорости света:

$$\Delta E = \Delta m_{\text{я.р.}} \cdot c^2. \quad (15.38)$$

**Дефект массы ядерной реакции** – это разность между суммой масс покоя ядер и частиц до и после ядерной реакции. При эндотермической ядерной реакции дефект массы отрицательный –  $\Delta m < 0$  (поглощение энергии), при экзотермической –  $\Delta m > 0$ .

### 15.2.7 Правило смещения

*Лишь после того как были открыты изотопы, удалось разобраться в последовательной цепи радиоактивных превращений элементов.*

Эти превращения подчиняются так называемому правилу смещения, сформулированному впервые Содди: *при  $\alpha$ -распаде ядро теряет положительный заряд  $2e$ , и масса его убывает приблизительно на четыре единицы относительной атомной массы. В результате*

**элемент смещается на две клетки к началу периодической системы.**

Символически это можно записать так:



Здесь элемент обозначается, как и в химии, общепринятыми символами; заряд ядра записывается в виде индекса слева внизу символа, а атомная масса – в виде индекса слева вверху символа. Например, обычный изотоп водорода обозначается символом  ${}^1_1\text{H}$ , дейтерий – символом  ${}^2_1\text{H}$ . Для  $\alpha$ -частицы, являющейся ядром атома гелия, применяется обозначение  ${}^4_2\text{He}$  и т.д.

При  $\beta$ -распаде из ядра вылетает электрон. В результате заряд ядра увеличивается на единицу, а масса остается почти неизменной:



Здесь  ${}^0_{-1}e$  обозначает электрон: индекс «0» вверху означает, что масса его очень мала по сравнению с единицей относительной атомной массы. **После  $\beta$ -распада элемент смещается на одну клетку ближе к концу периодической системы.**

**Гамма-излучение** не сопровождается изменением заряда; масса же ядра меняется ничтожно мало.

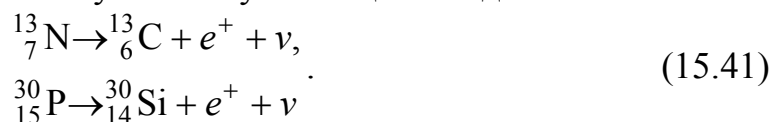
Правила смещения показывают, что при радиоактивном распаде сохраняется электрический заряд и приблизительно сохраняется относительная атомная масса ядер.

Возникшие при радиоактивном распаде новые ядра в свою очередь обычно также радиоактивны.

### 15.2.8 Искусственная радиоактивность. Ядерный реактор

Некоторые искусственно полученные радиоактивные вещества претерпевают  $\beta^+$  – распад.

В ядрах этих атомов один из протонов превращается в нейтрон. При этом образуется позитрон (положительный электрон) и сопровождающее его нейтрино, которые выталкиваются из ядра. Получается ядро нового атома, смещенного на одну клетку к началу таблицы Менделеева:



Изотоп  ${}^{30}_{15}\text{P}$  получается при бомбардировке Al  $\alpha$ -частицами:



#### Деление тяжелых ядер.

Ядерные реакции особенно легко вызываются медленными нейтронами, которые из-за отсутствия заряда легко проникают в ядра

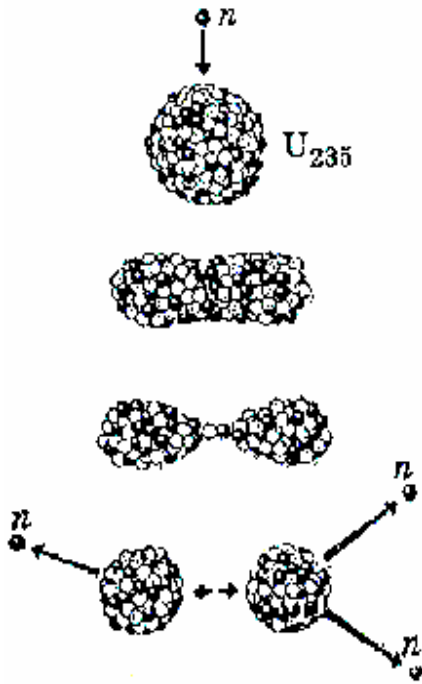
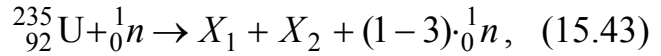


Рис. 15.4

атомов и обуславливают их превращение.

Например, ядро урана-235 при захвате нейтрона делится на два осколка:  $X_1$  и  $X_2$ ; образуются 1 – 3 нейтрона (рис. 15.4):



выделяется около 200 МэВ энергии.

Здесь  $X_1$  и  $X_2$  – радиоактивные изотопы.

**Осколки** – это различные ядра радиоактивных изотопов. Почти равновероятно образование любой пары различных осколков с различным числом нейтронов:

Zr и Te, Xe и Sr, Sb и Nb и другие.

${}_{92}^{235}\text{U}$  захватывает только медленные (тепловые) нейтроны.

### Цепные ядерные реакции.

При определенных условиях каждый из освобождаемых в результате деления

тяжелого ядра нейтронов может быть захвачен ядром  ${}_{92}^{235}\text{U}$  и освободить еще 2 – 3 нейтрона и т.д. Возникает самоподдерживающаяся ядерная реакция.

**Коэффициент размножения нейтронов** – это отношение числа нейтронов, освобождающихся при делении, к числу нейтронов, вызывающих деление в данной массе ядерного горючего.

Для протекания цепной реакции необходимо, чтобы коэффициент размножения нейтронов в данной массе урана был  $k \geq 1$ .

Цепная реакция в  ${}_{92}^{235}\text{U}$  и  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  осуществляется в атомных бомбах, где критическая масса обуславливает  $k \geq 1,01$  – **ядерный взрыв**.

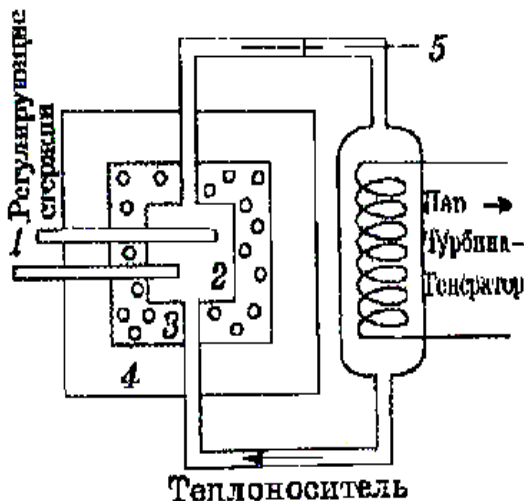


Рис. 15.5 Устройство ядерного реактора:

1. – регулирующие стержни – стержни кадмия и бора (веществ, которые являются хорошими поглотителями нейтронов);

2. – ядерное топливо ( ${}_{92}^{235}\text{U}$  и  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ ) и замедлитель нейтронов (тяжелая или обычная вода, графит);

3. – отражатель нейтронов (бериллий);

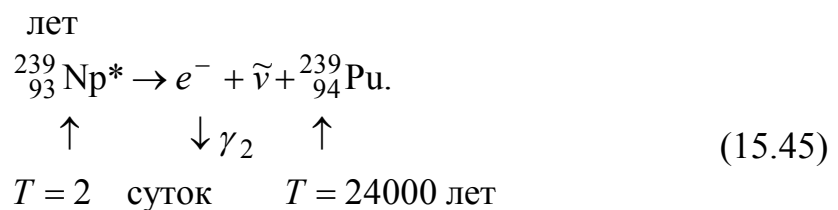
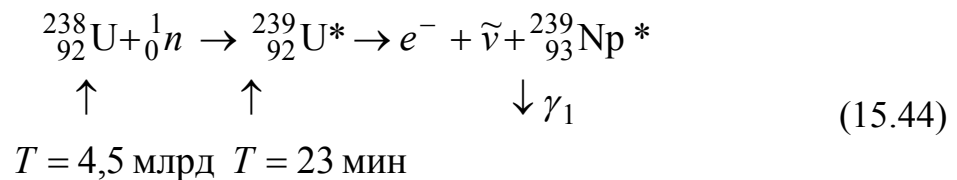
4. – защита от радиации;

5. – теплоноситель – вода или жидкий натрий.



В реакторах на атомных электростанциях осуществляется **управляемая ядерная реакция** ( $k=1$ ). Замедлителем нейтронов в ураново-графитном реакторе является графит (или тяжелая вода). Энергия выделяется при расщеплении  $^{235}_{92}\text{U}$  (рис. 15.5).

В топливе ядерных реакторов  $^{235}_{92}\text{U}$  в 20 раз меньше, чем  $^{238}_{92}\text{U}$ , который, захватывая нейтрон, превращается в плутоний  $^{239}_{94}\text{Pu}$ :



Управляют реакцией вводимые в реактор стержни из бора или кадмия, поглощающие тепловые нейтроны.

В реакторе-размножителе на быстрых нейтронах из 1 кг  $^{235}_{92}\text{U}$  получают 1,5 кг плутония.

### 15.2.9 Методы регистрации ионизирующих излучений

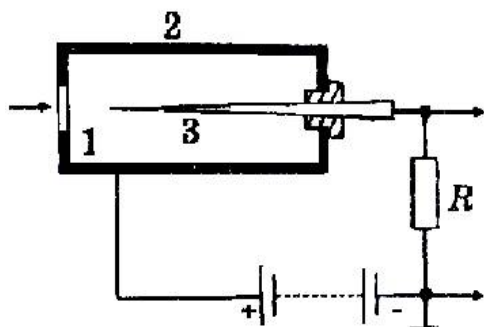


Рис. 15.6

#### Счетчик Гейгера (рис. 15.6)

В наполненной газом (аргон) трубке 2 пролетающая через газ частица ионизирует атомы газа. Они замыкают цепь между катодом (3) и анодом (1), создавая импульс напряжения на нагрузочном резисторе  $R$ .

(В счетчике Гейгера-Мюллера электрод с острием 3 заменен тонкой проволокой и изменена полярность электродов).

#### Камера Вильсона (рис.15.7)

Камера заполнена смесью газа (аргон или азот) с насыщенным паром воды или спирта. Быстро расширяя газ поршнем, переохлаждают пар. Пролетающая исследуемая частица ионизирует атомы газа, на которых конденсируется пар, создавая капельный трек (след).



Рис. 15.7

### Пузырьковая камера

Глейзер сконструировал камеру, в которой можно исследовать частицы значительно большей энергии, чем в камере Вильсона, так как плотность рабочего вещества камеры Глейзера значительно превосходит плотность рабочего вещества камеры Вильсона. Пузырьковая камера содержит легкокипящую жидкость (например, сжиженный пропан или водород).

В перегретой перед испытанием жидкости (путем сброса давления)

исследуемая частица создает **пузырьковый трек**.

### *Новые слова, словосочетания, языковые конструкции*

анод  
 антинейтрино  
 бомбардировать  
 взрыв  
 внутриядерные силы  
 деление ядер  
 дефект массы  
 естественный  
 зарядовое число  
 излучение  
 изотопы  
 камера  
 катод  
 легкокипящая  
 массовое число атома  
 модель  
 нейтральный  
 нейтрино  
 нейтрон  
 неустойчивое  
 нуклон  
 обменные силы

осколки  
 поглощать  
 позитрон  
 полураспад  
 протон  
 пузырьковый  
 радиоактивный  
 распад  
 размножение  
 реактор  
 реакция  
 регистрация  
 синтез  
 слияние  
 стержень  
 счетчик  
 теплоноситель  
 термоядерный  
 трек  
 тяжелый  
 ураново – графитный  
 цепные реакции  
 энергия связи  
 экзотермическая  
 эндотермическая

### 1. Что связано с чем.

В ядре протоны и нейтроны прочно связаны внутриядерными силами.

### 2. В основе чего лежит что.

В основе внутриядерных сил лежат обменные силы (сильное взаимодействие).

#### *Контрольные вопросы:*

1. Приведите основные характеристики протона и нейтрона. Охарактеризуйте протонно-нейтронную модель ядра.
2. Что такое изотопы?
3. Когда образуются нейтрино, антинейтрино?
4. Чему равно массовое число атома?
5. Какую энергию называют энергией связи ядра?
6. Какой процесс называют ядерными реакциями? Как протекает ядерная реакция?
7. Какое физическое явление называют радиоактивностью? Какие различают виды радиоактивности?
8. Что является причиной радиоактивного распада?
9. Дайте определение периода полураспада. Почему период полураспада не зависит от начального числа частиц?
10. Запишите закон радиоактивного распада.
11. Какие реакции называют термоядерными?
12. Что такое дефект массы ядерной реакции?
13. Какой процесс называют естественной радиоактивностью?
14. Какой радиоактивный распад называют альфа-распадом? Относительная доля каких нуклонов в ядре уменьшается в результате альфа-распада?
15. Какой радиоактивный распад называют бета-распадом? Относительная доля каких нуклонов в ядре уменьшается в результате бета-распада?
16. Как объясняется возникновение электронного антинейтрино при бета-распаде?
17. Что такое  $\gamma$ -излучение?
18. Какие методы регистрации ионизирующих излучений вы знаете?

## Литература

1. Физика: Учебное пособие для студентов – иностранцев подгот. фак. вузов. Корочкина Л.Н.; Каурова А. С., Шутенко Л.Д., Стасюк Б.П. – М.: Высш. шк., 1983. – 392 с.
2. Соколович Ю. А. Справочник по курсу физики средней школы с примерами решения задач. Ю.А. Соколович, А.С. Богданова. – Х.: Веста: Изд-во Ранок, 2005. – 480 с.
3. Поляков В.М. Физика. Молекулярная физика и теплота. Электричество и магнетизм. Учебник для иностранных студентов подгот. фак. вузов Украины. – Одесса: ОНПУ, 2006. – 208с.
4. Расторгуева Т.Е., Галич Е.А., Хохлова О.П. Робочий зошит з дисципліни “Фізика” для слухачів факультету довузівської підготовки. Частина 1. – Одеса: “Екологія”, 2008 – 130с.
5. Расторгуева Т.Е., Галич Е.А., Хохлова О.П. Робочий зошит з дисципліни “Фізика” для слухачів факультету довузівської підготовки. Частина 2. – Одеса: “ТЕС”, 2008 - 113с
6. Расторгуева Т.Е., Галич Е.А., Шостак Н.А. Робочий зошит з дисципліни “Фізика” для слухачів факультету довузівської підготовки. Частина 3 – Одеса: “Екологія”, 2009 – 92с.
7. Расторгуева Т.Е., Галич Е.А., Ткаченко Н.А. Методические указания для выполнения самостоятельной работы по дисциплине “Физика” раздел “Кинематика” для слушателей иностранцев подготовительного отделения – Одеса: “Екологія”, 2011 – 66с.
8. Гончаренко С.У., Фізика: Підручник для 9 кл. серед. загальноосвітньої школи. Київ: Освіта, 2005. – 320с.
9. Коршак Є.В., Фізика 9 кл.: Підручник для загальноосвіт. навч. закл. Коршак Є.В., Ляшенко О.І., Савченко О.І., Савченко В.Ф., - 2-ге вид., перероб. та доп. – К.: Ірпень: ВТФ “Перун”, 2005. – 200с.
10. Гончаренко С.У., Фізика: Підручник для 10 кл. серед. загальноосвіт. шк. – К.: Освіта, 2002. – 319с.
11. Коршак Є.В., Фізика 10 кл.: Підручник для загальноосвіт. навч. закл. Коршак Є.В., Ляшенко О.І., Савченко В.Ф. – К.: Ірпень: ВТФ “Перун”, 2004. – 296с.
12. Гончаренко С.У. Фізика: Підручник для 11 кл. серед. загальноосвіт. шк. – К.: Освіта, 2005. – 319с.
13. Коршак Є.В., Ляшенко О.І., Савченко В.Ф. Фізика, 11 кл.: Підручник. – К.: Ірпень: ВТФ “Перун”, 2005. – 288с.
14. Навчальні програми (довузівська підготовка іноземних громадян) / Уклад.: Андрющенко Б.М., Іващенко Ю.М., Колтаков Ю.О. та ін. – К.: „Видавництво «Політехніка»”, 2005. – Ч. 2: Фізика. Хімія. Математика.

- Основи інф-ки та обчисл. техніки. Креслення. Історія України. Рос. мова. Укр. і зарубіж. л-ра. Основи психології. Образотв. мистецт.–168 с.
15. Навчальні програми для загальноосвітніх навчальних закладів з фізики для 7-9 класів (К.; Ірпінь: Перун, 2005, затвердженої МОН: лист від 23.12.2004 №1/11-6611) та для 10-12 класів (К., 2010, затвердженої МОН: наказ від 28.10.2010 № 1021).
  16. Програма зовнішнього незалежного оцінювання з фізики / Додаток № 08 до наказу міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

1. Некоторые физические постоянные.
2. Данные о Солнце, Земле и Луне.
3. Латинский алфавит.
4. Греческий алфавит.
5. Обозначение физических величин.
6. Приставки и множители для образования десятичных и дольных единиц.

## 1 Некоторые физические постоянные.

Физическая величина	Обозначение	Численное значение
Гравитационная постоянная	$G$	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$
Ускорение свободного падения	$g$	$9,8 \text{ м/с}^2$
Скорость света в вакууме	$c$	$2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Скорость звука в воздухе при $0^\circ\text{C}$		$332 \text{ м/с}$
Атомная единица массы (а.е.м.)		$1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя электрона	$m_e$	$9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p$	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Нормальное атмосферное давление	$p_0$	$101325 \text{ Па}$
Абсолютный нуль температуры		$-273,16^\circ\text{C}$
Универсальная (молярная) газовая постоянная	$R$	$8,31 \text{ Дж/ (моль} \cdot \text{К)}$
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Лошмидта	$N_L (n_0)$	$2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$
Постоянная Больцмана	$k$	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Нормальный (молярный) объем идеального газа при нормальных условиях ( $0^\circ\text{C}$ и $101325 \text{ Па}$ )	$V_{0m}$	$22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$
Постоянная Фарадея	$F$	$9,65 \cdot 10^4$
Заряд электрона (абс. значение)	$e$	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Электрическая постоянная	$\varepsilon_0$	$8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} =$ $= 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$
Постоянная Планка	$h$	$6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$

## 2 Данные о Солнце, Земле и Луне

Физическая величина	Солнце	Земля	Луна
Средний радиус, км	$696 \cdot 10^3$	$6,4 \cdot 10^3$	$1,74 \cdot 10^3$
Масса, кг	$1,98 \cdot 10^{30}$	$5,88 \cdot 10^{24}$	$7,36 \cdot 10^{22}$
Ускорение свободного падения на поверхности, $\text{м/с}^2$	274	9,8	1,62
Скорость поступательного движения, км/с	20	29,8	1,02
Среднее расстояние до Земли, км	$1,5 \cdot 10^8$	-	$3,84 \cdot 10^5$
Период обращения вокруг Солнца, с	-	$3,55 \cdot 10^7$	$2,36 \cdot 10^6$

## 3 Латинский алфавит.

<i>Aa</i> – а	<i>Hh</i> – аш	<i>Oo</i> – о	<i>Uu</i> – у
<i>Bb</i> – бэ	<i>Ii</i> – и	<i>Pp</i> – пэ	<i>Vv</i> – вэ
<i>Cc</i> – цэ	<i>Jj</i> – жи	<i>Qq</i> – ку	<i>Ww</i> – дубль-вэ
<i>Dd</i> – дэ	<i>Kk</i> – ка	<i>Rr</i> – эр	<i>Xx</i> – икс
<i>Ee</i> – э	<i>Ll</i> – эль	<i>Ss</i> – эс	<i>Yy</i> – игрек
<i>Ff</i> – эф	<i>Mm</i> – эм	<i>Tt</i> – тэ	<i>Zz</i> – зэд
<i>Gg</i> – же	<i>Nn</i> – эн		

## 4 Греческий алфавит.

$\text{A}\alpha$ – альфа	$\text{I}\iota$ – йота	$\text{P}\rho$ – ро
$\text{B}\beta$ – бета	$\text{K}\kappa$ – каппа	$\text{C}\sigma$ – сигма
$\text{G}\gamma$ – гамма	$\text{L}\lambda$ – лямбда	$\text{T}\tau$ – тау
$\text{D}\delta$ – дельта	$\text{M}\mu$ – ми (мю)	$\text{Y}\upsilon$ – ипсилон
$\text{E}\epsilon$ – эпсилон	$\text{N}\nu$ – ни (ню)	$\text{F}\phi$ – фи
$\text{Z}\zeta$ – дзета	$\text{X}\xi$ – кси	$\text{H}\chi$ – хи
$\text{H}\eta$ – эта	$\text{O}\omicron$ – омикрон	$\text{P}\psi$ – пси
$\text{O}\theta$ – тэта	$\text{P}\pi$ – пи	$\text{O}\omega$ – омега



## 5 Обозначение физических величин

Путь (длина) .....	$l$
Высота .....	$h$
Перемещение .....	$S$
Координата .....	$x, y, z$
Площадь .....	$S$
Объем .....	$V$
Время .....	$t, \tau$
Масса .....	$m, M$
Вес .....	$P$
Давление .....	$p$
Импульс .....	$p$
Сила .....	$F, N, T$
Момент силы .....	$M$
Момент импульса .....	$L$
Момент инерции .....	$J$
Скорость .....	$v, u$
Скорость угловая .....	$\omega$
Ускорение .....	$a$
Ускорение свободного падения .....	$g$
Ускорение угловое .....	$\varepsilon$
Период колебаний .....	$T$
Частота колебаний .....	$\nu, f$
Частота вращения .....	$n$
Частота угловая .....	$\omega$
Фаза колебаний (сдвиг фаз) .....	$\varphi$
Количество вещества .....	$\nu$
Количество частиц .....	$N$
Концентрация частиц .....	$n$
Молярная масса .....	$M$
Термодинамическая температура .....	$T$
Температура по международной шкале температур .....	$t, \Theta$
Работа .....	$A$
Мощность .....	$N, P$
Энергия .....	$E, W$
Внутренняя энергия .....	$U$
Плотность энергии .....	$W$

Количество теплоты .....	$Q$
Удельная теплоемкость .....	$c$
Теплоемкость тела .....	$C$
Удельная теплота плавления .....	$\lambda$
Удельная теплота парообразования.....	$L$
Удельная теплота сгорания .....	$q$
Температурный коэффициент .....	$\alpha$
Поверхностное натяжение .....	$\sigma$
Механическое напряжение .....	$\sigma$
Жесткость .....	$k$
Модуль упругости .....	$E$
Коэффициент трения .....	$\mu$
Вязкость .....	$\eta$
Абсолютная влажность .....	$\rho, p$
Относительная влажность .....	$\varphi$
Валентность .....	$n$
Коэффициент полезного действия .....	$KПД, \eta$
Плоский угол .....	$\alpha, \varphi$
Телесный угол .....	$\Omega$
Электрический заряд .....	$q, Q$
Плотность электрического заряда поверхностная .....	$\sigma$
Напряженность электрического поля .....	$E$
Потенциал электрического поля .....	$\varphi$
Разность потенциалов .....	$\varphi_1 - \varphi_2$
Сила тока .....	$I$
Плотность тока .....	$j$
Электрическое сопротивление .....	$r, R$
Напряжение .....	$U$
Удельное сопротивление .....	$\rho$
Удельная электропроводность .....	$\gamma$
Емкостное сопротивление .....	$X_c$
Индуктивное сопротивление .....	$X_L$
Полное сопротивление переменному току.....	$Z$
Электродвижущая сила .....	$\varepsilon$
Электрическая емкость .....	$C$
Индуктивность .....	$L$
Магнитная индукция .....	$B$
Магнитный поток .....	$\Phi$

Магнитная проницаемость .....	$\mu$
Диэлектрическая проницаемость .....	$\varepsilon$
Интенсивность .....	$I$
Яркость .....	$B$
Световой поток .....	$\Phi$
Освещенность .....	$E$
Сила света .....	$I$
Линейное увеличение .....	$\Gamma$
Угловое увеличение .....	$\beta$

### 6 Приставки и множители для образования десятичных и дольных единиц

Наименование	Обозначение приставки		Множитель
	русское	международное	
тера	Т	T	$10^{12}$
гига	Г	G	$10^9$
мега	М	M	$10^6$
кило	к	k	$10^3$
гекто	г	h	$10^2$
дека	да	da	10
деци	д	d	$10^{-1}$
санти	с	c	$10^{-2}$
милли	м	m	$10^{-3}$
микро	мк	$\mu$	$10^{-6}$
нано	н	n	$10^{-9}$
пико	п	p	$10^{-12}$

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

**ФИЗИКА**

Конспект лекций

(для иностранных слушателей подготовительного отделения)

Составители:

к.т.н., доц. кафедры довузовской подготовки Расторгуева Т.Е.,  
к.г.н., доц. кафедры физики атмосферы Галич Е.А.,  
методист подготовительного отделения Ткаченко Н.А.

Подп. к печати

Условн. печат. лист.

Формат 60 x 84 / 16

Тираж

Бумага офсетная

Зам. №

Напечатано с готового оригинал-макета

---

Одесский государственный экологический университет,  
65016, м. Одесса, ул. Львовская, 15