

# Физика

## Содержание

<b>1</b>	<b>Обозначения в системе СИ</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Теплопередача</b>	<b>2</b>
2.1	Агрегатное состояние . . . . .	3
2.2	Удельная теплота . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Электричество</b>	<b>4</b>
3.1	Электрическое поле . . . . .	4
3.2	Источник тока . . . . .	4
3.3	Проводники . . . . .	4
3.4	Напряженность электрического поля . . . . .	5
3.5	Конденсаторы . . . . .	6
3.6	Магнитное поле . . . . .	7
3.7	Индукционный ток . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Оптика</b>	<b>10</b>
4.1	Линзы . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Механика</b>	<b>11</b>
5.1	Законы Ньютона . . . . .	11
5.2	Прямолинейное движение . . . . .	12
5.3	Криволинейное движение . . . . .	12
5.4	Импульс и энергия . . . . .	13
5.5	Механические колебания . . . . .	14
5.6	Волны . . . . .	15
<b>6</b>	<b>Статика</b>	<b>15</b>
<b>7</b>	<b>Термодинамика</b>	<b>16</b>
7.1	Молекулярная кинетическая теория . . . . .	16
7.2	Строение атома . . . . .	16
7.3	Идеальный газ . . . . .	17
7.3	Изопроцессы . . . . .	19
7.4	Внутренняя энергия идеального газа . . . . .	19
7.5	Циклы. Тепловые машины . . . . .	20
7.6	Влажный воздух . . . . .	21

# 1 Обозначения в системе СИ

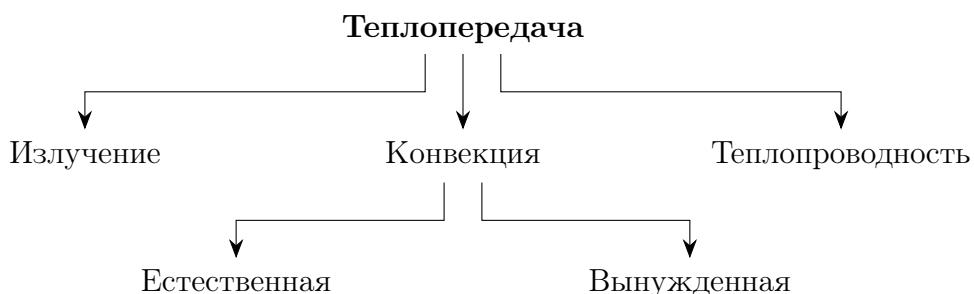
- Длина: [м] – метр.
- Масса: [кг] – килограмм.
- Время: [с] – секунда.
- Сила электрического тока: [А] – ампер.
- Температура: [°C] – градус Цельсия.
- Термодинамическая температура: [К] – кельвин.
- Частота: [Гц] – герц.
- Сила: [Н] – ньютон.
- Энергия, механическая работа, количество теплоты: [Дж] – джоуль.
- Мощность: [Вт] – ватт.
- Давление: [Па] – паскаль.
- Электрический заряд: [Кл] – кулон.
- Разность потенциалов: [В] – вольт.
- Сопротивление: [Ом] – ом.
- Электроёмкость: [Ф] – фарад.
- Магнитный поток: [Вб] – вебер.
- Магнитная индукция: [Тл] – тесла.
- Индуктивность: [Гн] – генри.

## 2 Теплопередача

**Определение 1.** Теплота – кинетическая часть внутренней энергии вещества, определяемая интенсивным хаотическим движением молекул и атомов, из которых это вещество состоит.

**Определение 2.** Количество теплоты – часть внутренней энергии, которую тело получает или теряет при теплопередаче.

**Определение 3.** Теплопередача – физический процесс передачи тепловой энергии от более горячего тела к более холодному.



**Определение 4.** Излучение – вид теплопередачи, при котором происходит передача внутренней энергии с помощью энергии электромагнитных волн.

**Определение 5.** Конвекция – вид теплопередачи, обусловленный потоками жидкости или газа.

**Определение 6.** Теплопроводность – передача внутренней энергии от одной части тела к другой или от одного тела к другому при контакте.

**Формула 2.1.**

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t$$

$Q$  [Дж] – количество теплоты,  $c$  [ $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{°C}}$ ] – удельная теплоемкость,  $m$  [кг] – масса вещества,  $\Delta t$  [°C] – разность температур.

## 2.1 Агрегатное состояние

**Определение 7.** Агрегатное состояние вещества — физическое состояние вещества, зависящее от соответствующего сочетания температуры и давления.

**Определение 8.** Переход вещества из жидкого состояния в твердое называется кристаллизацией.

**Определение 9.** Переход вещества из жидкого состояния в газообразное называется парообразованием.

**Определение 10.** Переход вещества из твердого состояния в жидкое называется плавлением.

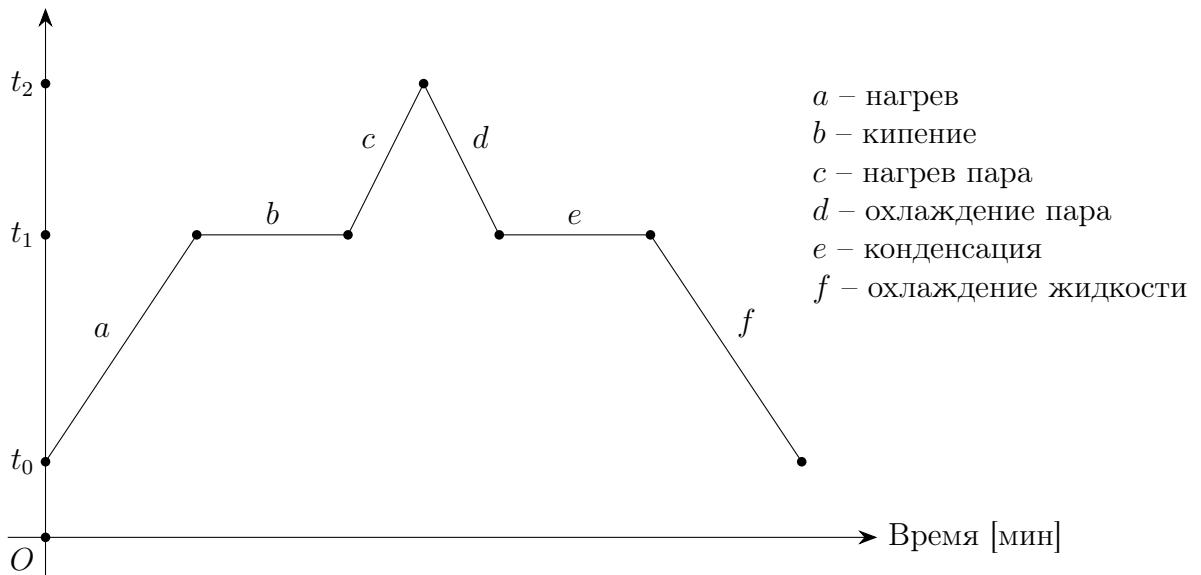
**Определение 11.** Переход вещества из твердого состояния в газообразное называется сублимацией.

**Определение 12.** Переход вещества из газообразного состояния в жидкое называется конденсацией.

**Определение 13.** Переход вещества из газообразного состояния в твердое называется десублимацией.

**Определение 14.** Насыщенный пар — пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью.

Температура [°C]



## 2.2 Удельная теплота

**Определение 15.** Удельная теплота — скалярная физическая величина, обозначающая количество теплоты, требуемое для смены агрегатного состояния единицы массы.

**Формула 2.2.**

$$Q = q \cdot m$$

$Q$  [Дж] — количество теплоты,  $q$  [Дж/кг] — удельная теплота сгорания,  $m$  [кг] — масса вещества.

**Формула 2.3.**

$$Q = L \cdot m$$

$Q$  [Дж] – количество теплоты,  $L$  [Дж/кг] – удельная теплота парообразования,  $m$  [кг] – масса вещества.

**Формула 2.4.**

$$Q = \lambda \cdot m$$

$Q$  [Дж] – количество теплоты,  $\lambda$  [Дж/кг] – удельная теплота плавления,  $m$  [кг] – масса вещества.

## 3 Электричество

**Определение 16.** Электрический ток – упорядоченное движение заряженных частиц. Направление электрического тока определяется движением положительных зарядов.

**Закон 3.1 (Ома).**

$$I = \frac{U}{R}$$

$I$  [А] – сила тока,  $U$  [В] – напряжение,  $R$  [Ом] – сопротивление.

### 3.1 Электрическое поле

**Определение 17.** Поле – материальная среда, передающая действие тел друг на друга.

**Определение 18.** Электростатическое поле – поле, передающее взаимодействие одного неподвижного электрического заряда на другой.

**Определение 19.** Электрическая сила – сила, с которой электрическое поле одного заряда действует на внесенный в него другой электрический заряд. Сила воздействия электрического поля на заряд уменьшается по мере удаления.

### 3.2 Источник тока

**Определение 20.** Источник тока – устройство, в котором происходит преобразование какого-либо вида энергии в электрическую энергию.



### 3.3 Проводники

**Определение 21.** Проводники – вещества, обладающие свободными носителями заряда. При помещении проводящего тела в электрическое поле, свободные носители заряда приходят в движение, возникает электрический ток, который существует до тех пор, пока поле внутри проводника отлично от нуля.

*В изолированном теле носители заряда с течением времени распределяются таким образом, что создаваемое ими электрическое поле полностью компенсирует внешнее поле внутри проводника, а полное поле становится равным нулю.*

**Определение 22.** Диэлектрики – вещества, в которых все носители заряда связаны в нейтральных молекулах. При помещении во внешнее электрическое поле диэлектрики поляризуются, что приводит к ослаблению поля внутри них.

**Формула 3.2.**

$$A = U \cdot I \cdot t$$

$A$  [Дж] – работа тока,  $U$  [В] – напряжение,  $I$  [А] – сила тока,  $t$  [с] – время.

**Формула 3.3.**

$$P = U \cdot I$$

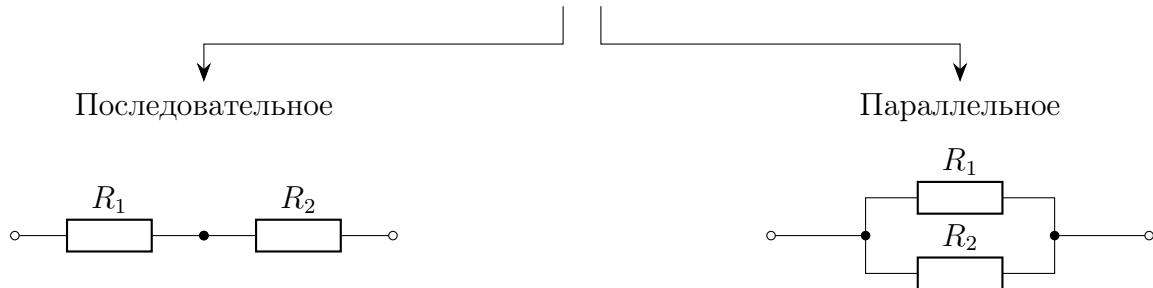
$P$  [Вт] – мощность тока,  $U$  [В] – напряжение,  $I$  [А] – сила тока.

**Закон 3.4 (Джоуля-Ленца).**

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

$Q$  [Дж] – количество теплоты,  $I$  [А] – сила тока,  $R$  [Ом] – сопротивление,  $t$  [с] – время.

### Соединение проводников



$$I = I_1 = I_2$$

$$I = I_1 + I_2$$

$$U = U_1 + U_2$$

$$U = U_1 = U_2$$

$$R = R_1 + R_2$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

**Формула 3.5.**

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

$R$  [Ом] – сопротивление,  $\rho$  [Ом · м] – удельное сопротивление,  $l$  [м] – длина проводника,  $S$  [м<sup>2</sup>] – площадь поперечного сечения проводника.

## 3.4 Напряженность электрического поля

**Закон 3.6** (Закон сохранения заряда). В замкнутой системе алгебраическая сумма зарядов остается постоянной:

$$\sum_{i=1}^n q_i = \text{const}$$

**Закон 3.7** (Закон Кулона).

$$\vec{F} = k \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\varepsilon \cdot r^2}$$

$\vec{F}$  [Н] – сила взаимодействия зарядов,  $k$  – постоянная Кулона ( $\approx 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ ),  $q_1$  и  $q_2$  [Кл] – точечные заряды тел,  $r$  [м] – расстояние между зарядами,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды (равна 1 для воздуха).

**Формула 3.8.**

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

$k \left[ \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2} \right]$  – постоянная Кулона,  $\varepsilon_0$  [ $\Phi/\text{м}$ ] – электрическая постоянная.

**Определение 23.** Потенциалом электрического поля называется его характеристика, которая показывает, какой потенциальной энергией обладает единичный электрический заряд, помещенный в данную точку пространства.

**Формула 3.9.**

$$\varphi = \frac{E}{q}$$

$\varphi$  [Дж/Кл] – потенциал,  $E$  [Дж] – энергия заряда,  $q$  [Кл] – величина заряда.

**Определение 24.** Разность потенциалов электрического поля (между точками 1 и 2) – отношение работы электрического поля по перемещению пробного заряда из точки 1 в точку 2 к величине этого заряда.

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q}$$

**Определение 25.** Напряженность – отношение силы, с которой поле воздействует на точечный заряд к величине этого заряда.

**Формула 3.10.**

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

$\vec{E}$  [Н/Кл] – напряженность поля,  $\vec{F}$  [Н] – сила воздействия поля,  $q$  [Кл] – точечный заряд.

**Закон 3.11** (Принцип суперпозиции). Если в данной точке пространства электрическое поле создано несколькими зарядами и напряженность поля каждого заряда равна  $\vec{E}_1$ ,  $\vec{E}_2$ , ..., то результирующая напряженность этого поля равна векторной сумме напряженностей составляющих его полей.

### 3.5 Конденсаторы

**Определение 26.** Электроемкость – физическая величина, характеризующая способность проводников накапливать заряд.

**Формула 3.12.**

$$C = \frac{q}{U}$$

$C$  [ $\Phi$ ] – электроемкость,  $q$  [Кл] – заряд пластины конденсатора,  $U$  [В] – напряжение.

**Формула 3.13.**

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}$$

$C [\Phi]$  – электроемкость,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $d [м]$  – расстояние между пластины конденсатора.

**Формула 3.14.**

$$W = \frac{q \cdot U}{2} = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

$W [\text{Дж}]$  – энергия заряженного конденсатора,  $q [\text{Кл}]$  – заряд пластины конденсатора,  $U [\text{В}]$  – разность потенциалов,  $C [\Phi]$  – электроемкость.



$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$$C = C_1 + C_2$$

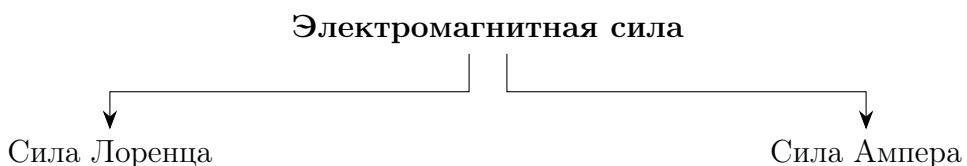
### 3.6 Магнитное поле

**Определение 27.** Магнитное поле – особый вид материи, существующий вокруг любого проводника с током. Неподвижные электрические заряды создают электрическое поле, а подвижные – электрическое и магнитное поля.

**Определение 28.** Вихревое поле – поле, силовые линии которого замкнуты.

**Определение 29.** Магнитные линии – это воображаемые линии, вдоль которых располагаются оси магнитных стрелок, помещённых в магнитное поле. Они показывают направление магнитного поля в каждой точке пространства.

**Определение 30.** Магнитная индукция – векторная физическая величина, которая показывает, с какой силой магнитное поле действует на движущиеся заряженные частицы.



**Определение 31.** Сила Ампера – сила, с которой магнитное поле воздействует на проводник с током.

**Формула 3.15.**

$$F_A = IBl \cdot \sin \alpha$$

$F_A [\text{Н}]$  – сила Ампера,  $I [\text{А}]$  – сила тока,  $B [\text{Тл}]$  – магнитная индукция,  $l [\text{м}]$  – длина проводника,  $\alpha$  – угол между проводником и линиями магнитной индукции.

**Определение 32.** Сила Лоренца – сила, с которой магнитное поле действует на движущуюся заряженную частицу.

### Формула 3.16.

$$F_{\text{Л}} = qvB \cdot \sin \alpha$$

$F_{\text{Л}}$  [Н] – сила Лоренца,  $q$  [Кл] – заряд частицы,  $v$  [м/с] – скорость частицы,  $B$  [Тл] – магнитная индукция,  $\alpha$  – угол между  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

**Закон 3.17** (Правило правой руки). Если обхватить проводник правой рукой так, чтобы оттопыренный большой палец указывал направление тока, то остальные пальцы покажут направление огибающих проводник линий магнитной индукции поля, создаваемого этим током, а значит и направление вектора магнитной индукции, направленного везде по касательной к этим линиям.

*Иными словами, если ток направлен от наблюдателя, линии магнитной индукции направлены по часовой стрелке.*

**Закон 3.18** (Правило левой руки). Если расположить ладонь левой руки так, чтобы линии индукции магнитного поля входили во внутреннюю сторону ладони, перпендикулярно к ней, а четыре пальца направлены по току, то отставленный на  $90^\circ$  большой палец укажет направление силы, действующей со стороны магнитного поля на проводник с током.

**Определение 33.** Поверхностная плотность заряда – скалярная физическая величина, которая характеризует количество заряда на единицу площади поверхности.

$$\sigma = \frac{q}{S}$$

$\sigma$  [Кл/м<sup>2</sup>] – поверхностная плотность заряда,  $q$  [Кл] – заряд,  $S$  [м<sup>2</sup>] – площадь поверхности.

**Определение 34.** Циклотронный (Лармировский) радиус – радиус кругового движения заряженной частицы в однородном магнитном поле.

$$R = \frac{mv}{qB}$$

$R$  [м] – циклотронный радиус,  $m$  [кг] – масса заряженной частицы,  $v$  [м/с] – скорость частицы,  $q$  [Кл] – заряд частицы,  $B$  [Тл] – магнитная индукция.

*Доказательство.* Из второго закона Ньютона:

$$m \cdot \frac{v^2}{R} = qvB \implies R = \frac{mv}{qB}$$

■

**Определение 35.** Циклотронная (Лармировская) частота – частота обращения заряженной частицы в однородном магнитном поле.

$$\nu = \frac{qB}{2\pi m}$$

$\nu$  [Гц] – циклотронная частота,  $q$  [Кл] – заряд частицы,  $B$  [Тл] – магнитная индукция,  $m$  [кг] – масса заряженной частицы.

*Доказательство.* По определению периода вращения:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi mv}{qBv} = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{1}{\nu} \implies \nu = \frac{qB}{2\pi m}$$

■

### 3.7 Индукционный ток

**Определение 36.** Магнитный поток – мера общего магнитного поля, проходящего сквозь заданную площадь.

$$\Phi = |\vec{B} \cdot \vec{S}| = B \cdot S \cdot |\cos \alpha|$$

$\Phi$  [Вб] – магнитный поток,  $B$  [Тл] – магнитная индукция,  $S$  [ $\text{м}^2$ ] – площадь,  $\alpha$  – угол между  $\vec{B}$  и  $\vec{S}$  (вектор площади).

**Формула 3.19.**

$$\Phi = N \cdot B \cdot S \cdot |\cos \alpha|$$

$\Phi$  [Вб] – магнитный поток катушки,  $N$  – количество ветвей катушки,  $B$  [Тл] – магнитная индукция,  $S$  [ $\text{м}^2$ ] – площадь,  $\alpha$  – угол между  $\vec{B}$  и  $\vec{S}$ .

**Закон 3.20** (Электромагнитной индукции). При всяком изменении магнитного потока через замкнутый контур в контуре возникает индукционный ток.

**Закон 3.21** (Правило Ленца). Индукционный ток, возникающий в замкнутом контуре, всегда такого направления, что собственное магнитное поле этого тока препятствует изменению внешнего магнитного потока.

**Определение 37.** ЭДС (электродвижущая сила) индукции – это величина, которая возникает в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока через этот контур и вызывает протекание индукционного тока.

$$E_{\text{инд.}} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|$$

$E_{\text{инд.}}$  [В] – ЭДС индукции,  $\Phi$  [Вб] – магнитный поток,  $t$  [с] – время.

**Определение 38.** Эффект Холла – это возникновение в электрическом проводнике разности потенциалов (напряжения Холла) на краях образца, помещённого в поперечное магнитное поле, при протекании тока, перпендикулярного полю.

**Определение 39.** ЭДС самоиндукции – ЭДС, возникающая в катушке при изменении силы тока через неё.

**Определение 40.** Индуктивность катушки – физическая величина, характеризующая способность катушки накапливать энергию в магнитном поле и сопротивляться изменению протекающего через неё тока.

$$L = \frac{\Phi}{I}$$

$L$  [Гн] – индуктивность катушки,  $\Phi$  [Вб] – магнитный поток,  $I$  [А] – сила тока.

**Формула 3.22.**

$$U_L = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$U_L$  [В] – напряжение катушки,  $L$  [Гн] – индуктивность катушки,  $I$  [А] – сила тока,  $t$  [с] – время.

**Утверждение 3.23** (Свойства катушки).

- В установившемся режиме ( $I = \text{const}$ )  $U_L = 0$ .
- Сила тока через катушку скачком не меняется ( $I(t)$  – непрерывная функция).

- При протекании тока в катушке запасается энергия магнитного поля.

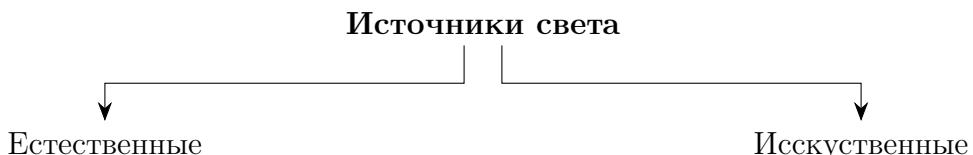
**Формула 3.24.**

$$W_L = \frac{LI^2}{2}$$

$W_L$  [Дж] – энергия катушки,  $L$  [Гн] – индуктивность катушки,  $I$  [А] – сила тока.

## 4 Оптика

**Определение 41.** Свет — электромагнитное излучение, воспринимаемое человеческим глазом.



**Определение 42.** Точечный источник света — источник света, размерами которого можно пренебречь.

**Определение 43.** Световой луч — линия, вдоль которой рассматривается свет.

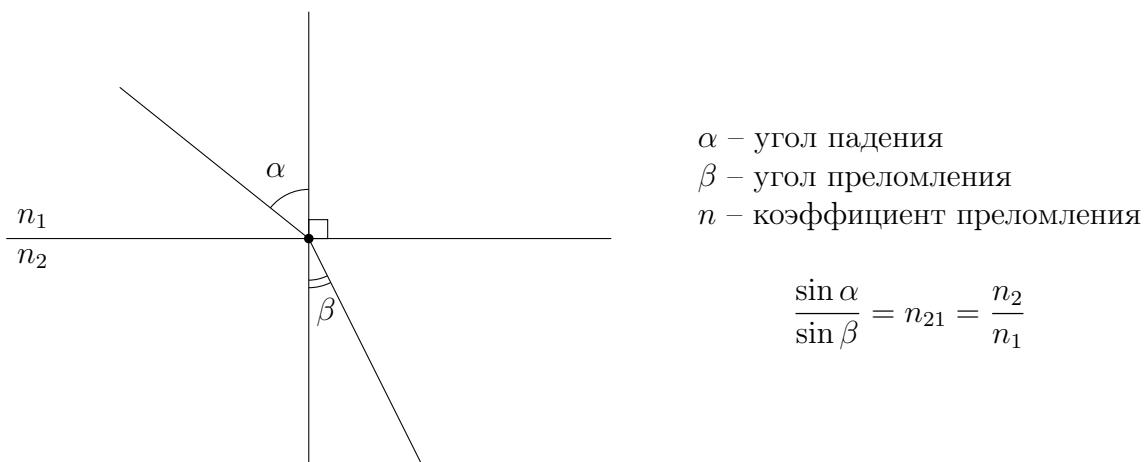
**Определение 44.** Тень — область пространства, куда не попадает свет.

**Определение 45.** Полутень — слабоосвещенное пространство.

**Определение 46.** Плоское зеркало — плоская поверхность, отражающая свет.

**Определение 47.** Абсолютный показатель преломления — отношение скорости света в веществе к скорости света в вакууме.

**Определение 48.** Относительный показатель преломления — отношение абсолютных показателей преломления двух сред.



**Определение 49.** Действительное изображение — изображение, находящееся на пересечении лучей, выходящих из источника света.

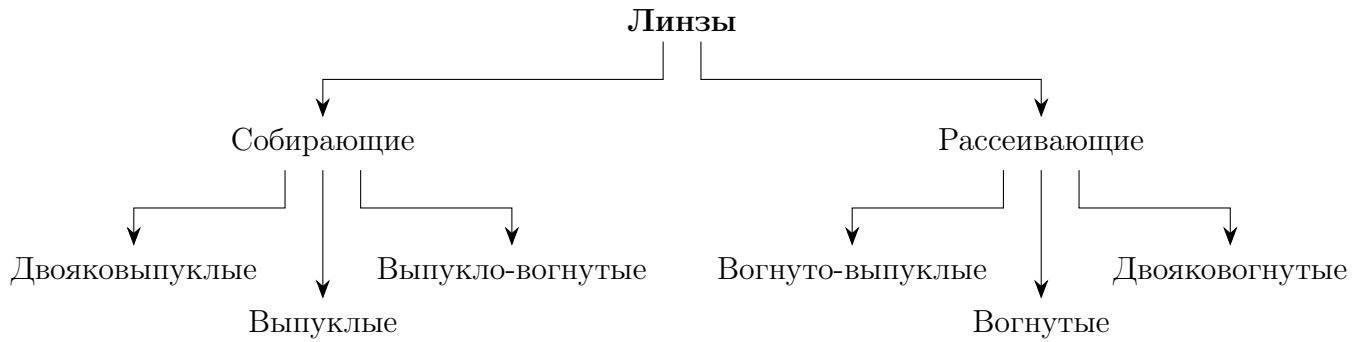
**Определение 50.** Мнимое изображение — изображение, находящееся на пересечении продолжений лучей.

**Формула 4.1.**

$$n = \left[ \frac{360^\circ - \alpha}{\alpha} \right]$$

$n$  — количество отражений,  $\alpha$  — угол падения.

## 4.1 Линзы



**Определение 51.** Оптический центр линзы – это точка, проходя через которую лучи не испытывают преломления.

**Определение 52.** Оптической осью называется любая прямая, проходящая через оптический центр линзы.

**Определение 53.** Главной оптической осью называется оптическая ось, перпендикулярная линзе.

**Определение 54.** Главным фокусом  $F$  называется точка, в которой пересекаются лучи, падающие на линзу параллельно её главной оптической оси.

**Определение 55.** Фокусным расстоянием называется расстояние от оптического центра линзы до её фокуса.

**Определение 56.** Фокальной плоскостью называется плоскость, перпендикулярная главной оптической оси, проходящая через её главный фокус.

## 5 Механика

**Определение 57.** Материальная точка – тело, размерами которого можно пренебречь в рамках данной задачи. Тело можно считать материальной точкой, если его размеры много меньше пройденного расстояния или при поступательном движении.

**Определение 58.** Система отсчёта – совокупность тела отсчёта, системы координат и часов.

**Определение 59.** Траекторией называется линия, вдоль которой тело или материальная точка изменяет своё положение.

**Определение 60.** Путём называется длина траектории, пройденной телом.

**Определение 61.** Перемещением называется вектор, соединяющий начальную и конечную точки траектории.

### 5.1 Законы Ньютона

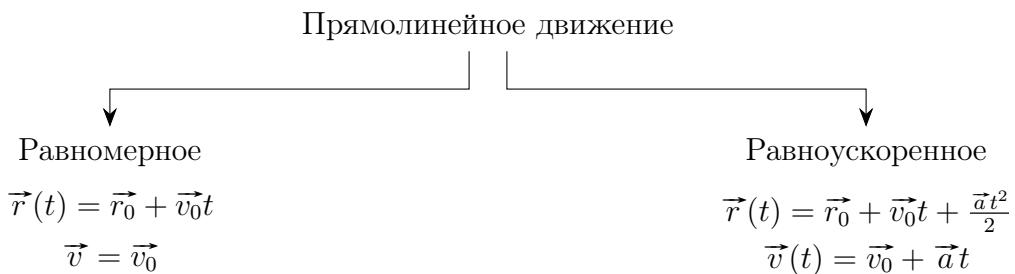
**Определение 62.** Инерциальными системами отсчёта называются системы отсчёта, в которых тела движутся равномерно или находятся в состоянии покоя, при одинаковых начальных условиях движутся одинаково, и изменение скорости тела происходит в результате действия на него других тел.

**Закон 5.1** (Первый закон Ньютона). Существуют такие инерциальные системы отсчета, в которых всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока действие других тел не заставит его изменить это состояние. Моделью является материальная точка, а явлением — состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.

**Закон 5.2** (Второй закон Ньютона). Под действием силы тело приобретает такое ускорение, что его произведение на массу тела равно действующей силе. Моделью является материальная точка, а явлением — движение с ускорением.

**Закон 5.3** (Третий закон Ньютона). Силы, с которыми взаимодействующие тела действуют друг на друга, равны по модулю и направлены по одной прямой в противоположные стороны. Моделью является система двух материальных точек, а явлением — взаимодействие тел.

## 5.2 Прямолинейное движение



## 5.3 Криволинейное движение

**Определение 63.** Центростремительное ускорение — компонента ускорения точки, характеризующая быстроту изменения направления вектора скорости для траектории с кривизной:

**Определение 64.** Радиус кривизны траектории - радиус окружности, по которой тело двигается в определенный промежуток времени при криволинейном движении.

**Формула 5.4.**

$$R_{\text{крив.}} = \frac{v^2}{a_n}$$

$R_{\text{крив.}}$  [м] — радиус кривизны траектории,  $v$  [м/с] — скорость тела,  $a_n$  [м/с<sup>2</sup>] — полное ускорение тела.

**Закон 5.5** (Закон перемещения тела).

- Равномерное прямолинейное движение:  $\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t; \vec{v} = \vec{v}_0$
- Равноускоренное прямолинейное движение:  $\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a} t^2}{2}; \vec{v}(t) = \vec{v}_0 + \vec{a} t$
- Равномерное движение по окружности:  $a_n = \frac{v^2}{R}$
- Неравномерное движение по окружности:  $\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n; |\vec{a}| = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}$

## 5.4 Импульс и энергия

**Определение 65.** Импульс материальной точки – векторная физическая величина, являющаяся мерой механического движения тела.

**Формула 5.6.**

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

$\vec{p}$  [кг · м/с] – импульс материальной точки,  $m$  [кг] – её масса,  
 $\vec{v}$  [м/с] – её скорость.

**Определение 66.** Импульсом системы материальных точек называется векторная величина, равная сумме импульсов всех материальных точек системы:

$$\vec{p}_{\text{сис.}} = \sum_i m_i \vec{v}_i$$

**Закон 5.7** (Закон сохранения импульса). Сумма импульсов всех тел системы есть величина постоянная, если векторная сумма внешних сил, действующих на систему тел, равна нулю:

$$\vec{F}_{\text{внеш.}} = 0 \iff \vec{p}_{\text{сис.}} = \overrightarrow{\text{const}}$$

*Доказательство.*

$$\Delta \vec{p}_{\text{сис.}} = \sum_i \Delta \vec{p}_i = \Delta t \cdot \sum_i \vec{F}_i \implies \sum_i \vec{F}_i = 0 \iff \Delta \vec{p}_{\text{сис.}} = 0 \iff \vec{p}_{\text{сис.}} = \overrightarrow{\text{const}}$$

■

**Теорема 5.8** (Об изменении кинетической энергии). В инерциальной системе отсчёта для материальной точки работа всех сил, действующих на точку, равна изменению её кинетической энергии:

$$A_{\text{всех сил}} = \Delta K$$

**Определение 67.** Потенциальные силы – силы, работа которых не зависит от траектории точки приложения этих сил и закона её движения, а целиком определяется начальным и конечным положениями данной точки.

*Например: сила тяжести, сила упругости, сила электрического воздействия.*

**Формула 5.9.**

$$A_{\text{пот.}} = -\Delta \Pi$$

$A_{\text{пот.}}$  [Дж] – работа потенциальных сил,  $\Delta \Pi$  [Дж] – изменение потенциальной энергии.

**Определение 68.** Непотенциальные силы – силы, работа которых зависит от траектории движения тела.

*Например: сила трения.*

**Закон 5.10** (Закон сохранения энергии). В замкнутой системе тел, где действуют только потенциальные силы, полная механическая энергия остается постоянной:

$$A_{\text{непот.}} = 0 \iff E = \text{const}$$

*Доказательство.*

$$A_{\text{пот.}} + A_{\text{непот.}} = \Delta K \implies A_{\text{непот.}} = \Delta K + \Delta \Pi = \Delta E \implies A_{\text{непот.}} = 0 \iff E = \text{const}$$

■

**Определение 69.** Абсолютно упругое соударение – тела после соударения разлетаются без потерь энергии.

*Выполняются ЗСИ и ЗСЭ.*

**Определение 70.** Абсолютно неупругое соударение – тела после соударения движутся как единое тело.

**Определение 71.** Неупругое столкновение – тела после соударения разлетаются с потерями энергии.

*Выполняется ЗСИ. ЗСЭ принимает вид:  $E_1 = E_2 + Q$ .*

## 5.5 Механические колебания

**Определение 72.** Механические колебания – механическое движение, периодически повторяющееся вблизи положения равновесия.

**Определение 73.** Полное колебание – возвращение в начальную точку с тем же направлением скорости.

**Определение 74.** Период колебаний – время одного колебания.

**Определение 75.** Частота – число колебаний в секунду.

**Определение 76.** Циклическая частота – число колебаний за  $2\pi$  секунд.

**Определение 77.** Амплитуда – максимальное отхождение от положения равновесия.

**Определение 78.** Гармонические колебания – колебания, идущие по закону синуса / косинуса.

**Теорема 5.11.** Уравнение незатухающих гармонических колебаний:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0$$

$\omega$  [1/c] – циклическая частота.

**Теорема 5.12.** Решением уравнения незатухающих гармонических колебаний является:

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

$A$  [м] – амплитудное значение колебаний,  $\omega$  [1/c] – циклическая частота,  $t$  [с] – время,  $\varphi_0$  – начальная фаза,  $\omega t + \varphi_0$  – фаза колебаний.

**Следствие 5.12.1.** Для пружинного маятника  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \implies T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ . Для математического маятника  $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}} \implies T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ .

**Теорема 5.13.** Уравнения фазовых кривых гармонических колебаний:

$$\left( \frac{x(t)}{x_{\max}} \right)^2 + \left( \frac{v(t)}{v_{\max}} \right)^2 = 1; \quad \left( \frac{a(t)}{a_{\max}} \right)^2 + \left( \frac{v(t)}{v_{\max}} \right)^2 = 1$$

## 5.6 Волны

**Определение 79.** Механическая волна – распространение колебаний в упругой среде.

**Определение 80.** Поперечная волна – волна, в которой направление колебаний частицы перпендикулярно направлению распространения.

*Поперечные волны распространяются только в твёрдых телах.*

**Определение 81.** Продольная волна – волна, в которой направление колебаний частицы параллельно направлению распространения.

*Продольные волны распространяются в жидкостях, твёрдых телах и газах.*

**Определение 82.** Колебания в одной фазе – колебания, в которых скорости в каждый момент времени сонаправлены.

**Определение 83.** Колебания в разнофазе – колебания, в которых скорости в каждый момент времени противоположно направлены.

**Определение 84.** Колебания со сдвигом фазы – колебания, в которых скорости в разные моменты времени сонаправлены или противоположно направлены.

**Определение 85.** Длина волны – расстояние между двумя ближайшими точками, колеблющимися в одной фазе.

**Определение 86.** Скорость распространения волны – скорость передачи энергии волной.

**Формула 5.14.**

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{\nu}$$

$\lambda$  [м] – длина волны,  $v$  [м/с] – скорость распространения волны,  
 $T$  [с] – период колебания волны,  $\nu$  [1/с] – частота колебания волны.

## 6 Статика

**Закон 6.1.** Материальная точка находится в равновесии, если векторная сумма сил, действующих на неё, равна нулевому вектору:

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{0}$$

**Определение 87.** Плечом силы называется расстояние от линии действия силы до оси вращения тела.

**Определение 88.** Момент силы – векторная физическая величина, характеризующая действие силы на механический объект, которое может вызвать его вращательное движение.

**Формула 6.2.**

$$\vec{M} = l \cdot \vec{F}$$

$\vec{M}$  [Н · м] – момент силы,  $l$  [м] – плечо силы,  $\vec{F}$  [Н] – сила.

**Закон 6.3.** Абсолютно твёрдое тело находится в равновесии, если векторная сумма сил, действующих на это тело, и алгебраическая сумма всех моментов этих сил, равны нулю:

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{0}; \sum_{i=1}^n M - \sum_{i=1}^m M' = 0$$

$M$  [ $\text{Н} \cdot \text{м}$ ] – момент силы, стремящейся повернуть тело по часовой стрелке,  $M'$  [ $\text{Н} \cdot \text{м}$ ] – момент силы, стремящейся повернуть тело против часовой стрелки.

## 7 Термодинамика

**Определение 89.** Механика изучает макроскопические объекты, состоящие из множества частиц. Термодинамика изучает микроскопические объекты, состоящие из молекул и атомов.

### 7.1 Молекулярная кинетическая теория

**Определение 90.** Тепловое движение – беспорядочное движение частиц.

**Определение 91.** Абсолютный нуль – температура, при которой частицы перестают двигаться ( $\approx -273^\circ\text{C}$ ).

**Закон 7.1** (Основные положения МКТ).

1. Все тела состоят из мельчайших частиц.
2. Частицы взаимодействуют друг с другом.
3. Частицы находятся в беспорядочном движении, если температура превышает абсолютный нуль.

**Определение 92.** Относительной молекулярной (атомной) массой называется отношение массы молекулы (атома) к  $\frac{1}{12}$  массы изотопа углерода-12:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12}m_C}$$

$M_r$  [а. е. м.] – относительная молекулярная масса,  $m_0$  [кг] – масса молекулы вещества,  $m_C$  [кг] – масса атома углерода-12.

**Определение 93.** 1 моль вещества – количество частиц в 12 г изотопа углерода-12.

**Определение 94.** Молярная масса – масса 1 моля вещества.

*Численно молярная масса равна молекулярной.*

**Формула 7.2.**

$$M = m_0 \cdot N_A$$

$M$  [кг/моль] – молярная масса вещества,  $m_0$  [кг] – масса молекулы вещества,  $N_A$  – постоянная Авогадро ( $\approx 6.02 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ ).

### 7.2 Строение атома

**Закон 7.3.**

$$m_p \approx m_n \approx 10^{-27} \text{ кг} \approx 1 \text{ а. е. м.}; m_e \approx 10^{-30} \text{ кг}$$

$m_p$  – масса протона,  $m_n$  – масса нейтрона,  $m_e$  – масса электрона.

#### Закон 7.4.

$$\bar{e} = q_p = -q_e \approx 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$\bar{e}$  – элементарный заряд,  $q_p$  – заряд протона,  $q_e$  – заряд электрона.

**Определение 95.** Зарядовое число ( $Z$ ) – количество протонов в атомном ядре, равное порядковому номеру химического элемента в таблице Менделеева.

#### Определение 96.

$$M = N_p + N_n$$

$M$  – массовое число (количество нуклонов),  $N_p$  – количество протонов,  $N_n$  – количество нейтронов.

### 7.3 Идеальный газ

**Определение 97.** Идеальный газ – модель газа, в которой не учитывается взаимодействие молекул (молекулы считаются материальными точками).

**Определение 98.** Давление газа – это сила, которую газ оказывает на стенки его сосуда.

*Давление газа обуславливается ударением молекул газа о стенки сосуда.*

**Определение 99.** Концентрация – отношение общего числа молекул газа к его объёму:

$$n = \frac{N}{V}$$

$n [\text{м}^{-3}]$  – концентрация,  $N$  – число молекул в газе,  $V [\text{м}^3]$  – объём газа.

**Определение 100.** Средняя квадратичная скорость – это скорость, равная корню квадратному из средней арифметической величины квадратов скоростей отдельных молекул:

$$v_{\text{ср. кв.}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{v_i^2}{N}}$$

$v_{\text{ср. кв.}} [\text{м/с}]$  – средняя квадратичная скорость,  $v_i [\text{м/с}]$  – скорость  $i$ -й частицы газа,  $N$  – количество частиц.

**Закон 7.5** (Основное уравнение МКТ).

$$p = \frac{2}{3}n \cdot \bar{E}$$

$p [\text{Па}]$  – давление,  $n [\text{м}^{-3}]$  – концентрация,  $\bar{E} [\text{Дж}]$  – средняя кинетическая энергия поступательного движения.

*Доказательство.* Пусть имеем сосуд в форме прямоугольного параллелепипеда с площадью поперечного сечения  $S$  и перпендикулярным ему ребром длины  $l$ , заполненный идеальным газом. Рассмотрим внутри него частицу массы  $m_0$ : если в проекции ребра длины  $l$  она движется со скоростью  $v_x$ , то её импульс до соударения со стенкой сосуда будет равен  $m_0 v_x$ , а после –  $-m_0 v_x$ , тогда стенке сосуда передастся импульс  $p = 2m_0 v_x$ . Время, через которое частица сталкивается с одной стенкой равно  $t = \frac{2l}{v_x}$ . Тогда сила, с которой частица взаимодействует со

стенкой сосуда равна  $F_x = \frac{p}{t} = \frac{m_0 v_x^2}{l}$ . По определению давление равно  $p = \frac{F}{S}$ , откуда:

$$p_x S = \frac{m_0 v_x^2}{l} \implies p_x = \frac{m_0 v_x^2}{l S} = p_x = \frac{m_0 v_x^2}{V}$$

Значит, для всех частиц давление можно посчитать, используя  $\bar{v}_x$  среднюю скорость частицы и  $N$  количество частиц. При этом из-за того, что все частицы движутся хаотично, и направления их движения равновероятны:

$$\bar{v}_x^2 = \bar{v}_y^2 = \bar{v}_z^2 = \frac{1}{3} \bar{v}^2$$

Отсюда давление всех частиц равно:

$$p = N \frac{m_0 \bar{v}^2}{3V} = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2 = \frac{2}{3} n \bar{E}$$

■

**Определение 101.** макроскопические параметры – характеристики макроскопической системы.

Например, для газа в сосуде: давление, температура, объём.

**Формула 7.6.**

$$\bar{E} = \frac{3}{2} K_B \cdot T$$

$\bar{E}$  [Дж] – средняя кинетическая энергия поступательного движения,  $K_B$  – постоянная Больцмана ( $\approx 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К),  $T$  [К] – температура.

*Доказательство.*

$$p = \frac{2}{3} n \cdot \bar{E} = \frac{2N}{3V} \cdot \bar{E} \implies \frac{pV}{N} = \frac{2}{3} \bar{E} = \text{const} \quad (\text{при } T = \text{const}) \implies \frac{pV}{N} = K_B \cdot T \implies \bar{E} = \frac{3}{2} K_B \cdot T$$

■

**Следствие 7.4.1.** Температура – мера кинетической энергии поступательного движения частиц.

**Определение 102.** Тепловое равновесие – состояние системы, при котором все макроскопические параметры не изменяются на протяжении долгого времени.

Теплообмен идёт до установления одинаковой температуры у термодинамических систем.

**Формула 7.7.**

$$v_{\text{ср. кв.}} = \sqrt{\frac{3K_B \cdot T}{m_0}}$$

$v_{\text{ср. кв.}}$  [м/с] – средняя квадратичная скорость,  $K_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  [К] – температура,  $m_0$  [кг] – масса частицы.

*Доказательство.*

$$\bar{E} = \frac{m_0 v_{\text{ср. кв.}}^2}{2} = \frac{3}{2} K_B \cdot T \implies v_{\text{ср. кв.}} = \sqrt{\frac{3K_B \cdot T}{m_0}}$$

■

**Формула 7.8** (Уравнение Менделеева-Клапейрона).

$$pV = \nu RT$$

$p$  [Па] – давление,  $V$  [ $\text{м}^3$ ] – объём,  $\nu$  [моль] – количество вещества,  
 $R$  – универсальная газовая постоянная ( $\approx 8.31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ ),  
 $T$  [К] – температура.

*Доказательство.*

$$\frac{pV}{N} = K_B \cdot T \implies pV = \nu \cdot N_A \cdot K_B \cdot T = \nu RT = \frac{m}{M} R \cdot T$$

■

### 7.3 Изопроцессы

**Определение 103.** Изопроцессы – процессы, в которых один из параметров состояния не изменяется.

**Закон 7.9** (Закон Бойля-Мариотта). Давление газа в изотермическом процессе обратно пропорционально занимаемому газом объёму:

$$T = \text{const} \implies pV = \text{const}$$

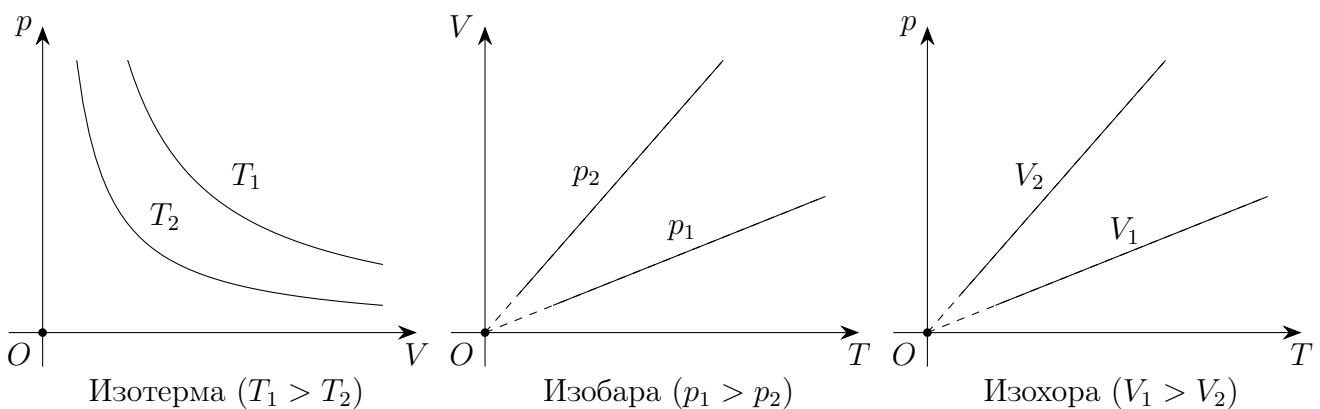
**Закон 7.10** (Закон Гей-Люссака). Объём газа в изобарическом процессе пропорционален абсолютной температуре газа:

$$p = \text{const} \implies \frac{V}{T} = \text{const}$$

**Закон 7.11** (Закон Шарля). Абсолютная температура газа в изохорном процессе пропорциональна давлению газа:

$$V = \text{const} \implies \frac{T}{P} = \text{const}$$

**Следствие 7.9.1** (Графики термодинамических изопроцессов).



### 7.4 Внутренняя энергия идеального газа

**Определение 104.** Внутренняя энергия идеального газа является кинетической энергией движения частиц.

*Внутренняя энергия ИГ зависит от температуры. Движение состоит из поступательного и вращательного.*

**Определение 105.** Число степеней свободы – минимальное необходимое число осей для полного описания движения частицы.

**Формула 7.12.**

$$U = \frac{i}{2} \nu R T$$

$U$  [Дж] – внутренняя энергия ИГ,  $i$  – число степеней свободы,  $\nu$  [моль] – количество вещества,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  [К] – температура.

Для 1-ат молекулы:  $i = 3$ , для 2-ат:  $i = 5$ , для 3-ат:  $i = 6$   
( $i = 5$  в случае линейной молекулы.)

**Формула 7.13** (Первое начало термодинамики).

$$Q = \Delta U + A_{\text{газа}}$$

$Q$  [Дж] – получено количество теплоты,  $U$  [Дж] – внутренняя энергия ИГ,  $A_{\text{газа}}$  [Дж] – работа газа.

Работа газа равна площади графика процесса на  $pV$ -диаграмме.

**Следствие 7.11.1** (Изотермический процесс).

$$T = \text{const} \implies \Delta U = 0 \implies Q = A_{\text{газа}}$$

**Следствие 7.11.2** (Изохорный процесс).

$$V = \text{const} \implies A_{\text{газа}} = 0 \implies Q = \Delta U$$

**Следствие 7.11.3** (Изобарный процесс).

$$p = \text{const} \implies A_{\text{газа}} = p\Delta V; \Delta U = \frac{i}{2} \nu R \Delta T \implies Q = \frac{i}{2} \nu R \Delta T + p\Delta V = \frac{i+2}{2} \nu R \Delta T = \frac{i+2}{2} p \Delta V$$

**Следствие 7.11.4** (Адиабатный процесс).

$$Q = 0 \implies A_{\text{газа}} = -\Delta U$$

## 7.5 Циклы. Тепловые машины

**Определение 106.** Тепловая машина состоит из нагревателя, рабочего тела и холодильника.

**Формула 7.14.**

$$Q_{\text{н}} = Q_{\text{x}} + A_{\text{мех}}$$

$Q_{\text{н}}$  [Дж] – теплота, отданная нагревателем,  $Q_{\text{x}}$  [Дж] – теплота, полученная холодильником,  $A_{\text{мех}}$  [Дж] – механическая работа тепловой машины.

**Формула 7.15.**

$$\eta = 1 - \frac{Q_{\text{x}}}{Q_{\text{н}}}$$

$\eta$  – КПД тепловой машины,  $Q_{\text{н}}$  [Дж] – теплота, отданная нагревателем,  $Q_{\text{x}}$  [Дж] – теплота, полученная холодильником.

*Доказательство.*

$$\eta = \frac{A_{\text{полезная}}}{A_{\text{затраченная}}} = \frac{A_{\text{мех}}}{Q_h} = \frac{Q_h - Q_x}{Q_h} = 1 - \frac{Q_x}{Q_h}$$

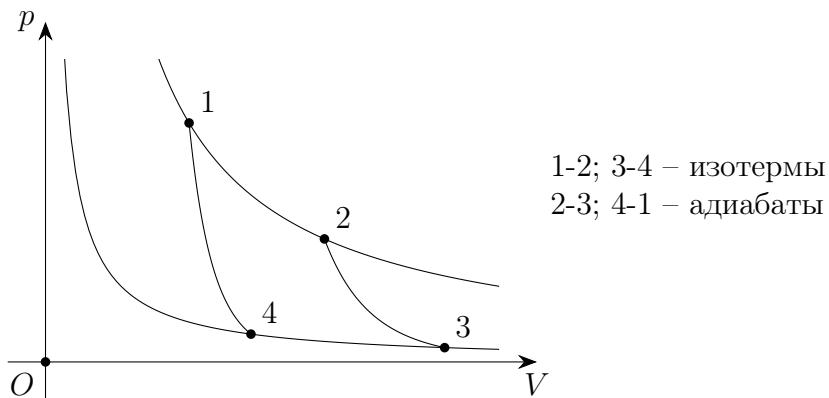
■

**Определение 107.** Цикл – процесс, в результате которого система возвращается в исходное состояние.

Циклы бывают прямые (по часовой стрелке,  $A > 0$ ) и обратные (против часовой стрелки,  $A < 0$ ). Работа газа за цикл равна площади фигуры, образованной графиком цикла на  $pV$ -диаграмме.

**Определение 108.** Цикл Карно – идеальный круговой процесс. КПД тепловой машины Карно равен:

$$\eta = 1 - \frac{T_x}{T_h}$$



## 7.6 Влажный воздух

**Определение 109.** Динамическое равновесие – состояние системы (жидкость + пар), при котором число вылетающих молекул равно числу возвращающихся.

**Определение 110.** Насыщенный пар – пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью.

*Ненасыщенный пар – это ИГ с 6 степенями свободы. Давление насыщенного пара зависит от температуры газа.*

**Определение 111.** Кипение – парообразование по всей поверхности жидкости.

*Кипение происходит, когда давление насыщенного пара уравнивается с атмосферным.*

**Определение 112.** Абсолютная влажность воздуха – содержание водяного пара в воздухе на единицу объёма.

$$\rho = \frac{m_{\text{пара}}}{V_{\text{воздуха}}}$$

$\rho$  [кг/м<sup>3</sup>] – абсолютная влажность воздуха,  $m_{\text{пара}}$  [кг] – содержание пара в воздухе,  $V_{\text{воздуха}}$  [м<sup>3</sup>] – объём воздуха.

**Определение 113.** Относительная влажность воздуха – отношение парциального давления водяного пара, содержащегося в воздухе, к давлению насыщенного пара при той же температуре.

$$\varphi = \frac{p_{\text{вод.пар}}}{p_{\text{нас.пар}}} \cdot 100\%$$

$\varphi$  – относительная влажность воздуха,  $p_{\text{вод.пар}}$  [Па] – парциальное давление водяного пара,  $p_{\text{нас.пар}}$  [Па] – парциальное давление насыщенного пара.

**Закон 7.16.** Влажный воздух состоит из сухого воздуха ( $\text{N}_2 + \text{O}_2 + \text{CO}_2 + \text{примеси}$ ) и  $\text{H}_2\text{O}$  водяного пара.

**Закон 7.17 (Дальтона).**

$$p_{\text{вв}} = p_{\text{св}} + p_{\text{ви}}$$

$p_{\text{вв}}$  [Па] – давление влажного воздуха,  $p_{\text{св}}$  [Па] – давление сухого воздуха,  $p_{\text{ви}}$  [Па] – давление водяного пара.