

Физика

Содержание

1	Обозначения в системе СИ	2
2	Теплопередача	2
2.1	Агрегатное состояние	3
2.2	Удельная теплота	3
3	Электричество	4
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
4	Оптика	10
4.1	Линзы	11
5	Механика	11
5.1	Законы Ньютона	12
5.2	Прямолинейное движение	12
5.3	Криволинейное движение	12
5.4	Импульс и энергия	13
6	Статика	14
7	Термодинамика	14
7.1	Молекулярная кинетическая теория	15
7.2	Строение атома	15
7.3	Идеальный газ	16
7.3	Изопроцессы	18
7.4	Внутренняя энергия идеального газа	18
7.5	Циклы. Термовые машины	19
7.6	Влажный воздух	20

1 Обозначения в системе СИ

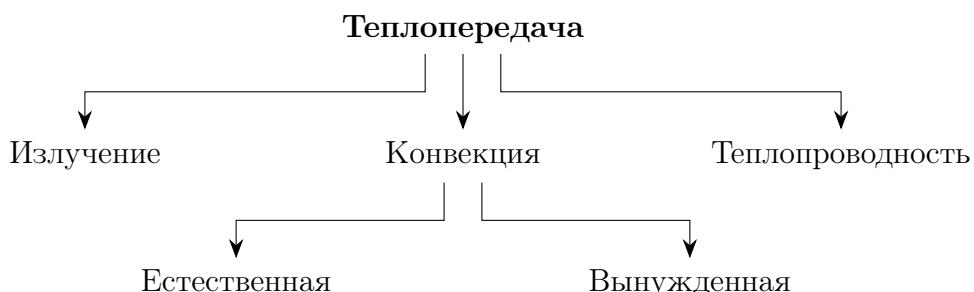
- Длина: [м] – метр.
- Масса: [кг] – килограмм.
- Время: [с] – секунда.
- Сила электрического тока: [А] – ампер.
- Температура: [°C] – градус Цельсия.
- Термодинамическая температура: [К] – кельвин.
- Частота: [Гц] – герц.
- Сила: [Н] – ньютон.
- Энергия, механическая работа, количество теплоты: [Дж] – 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 [$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}}$] – удельная теплоемкость, m [кг] – масса вещества, Δt [$^{\circ}\text{C}$] – 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.

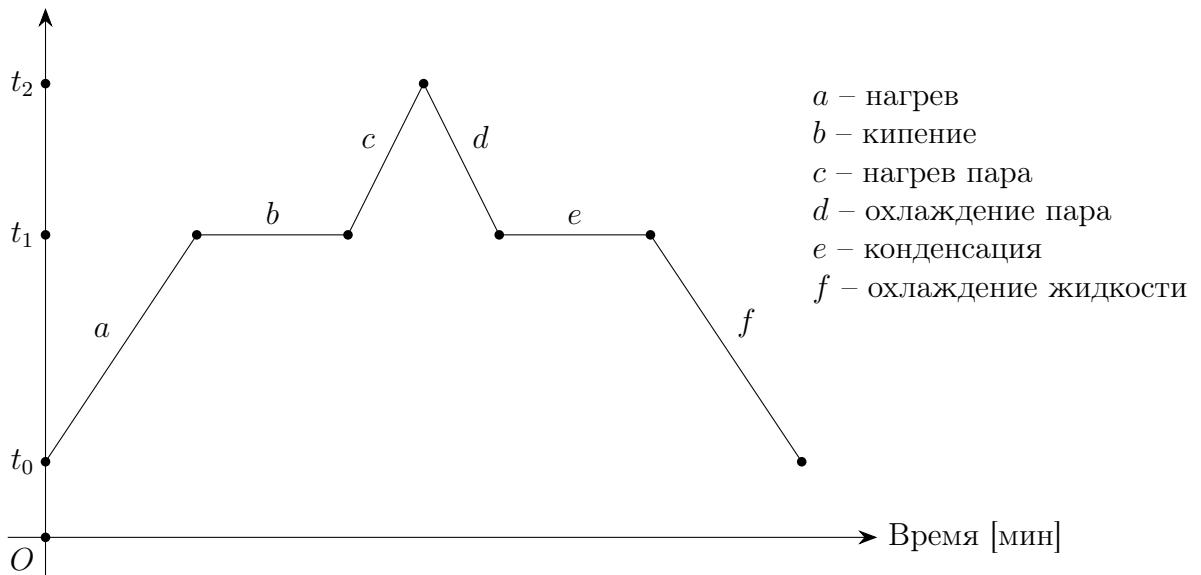
Определение 11. Переход вещества из твердого состояния в газообразное называется сублимацией.

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, λ [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.

$$P = U \cdot I$$

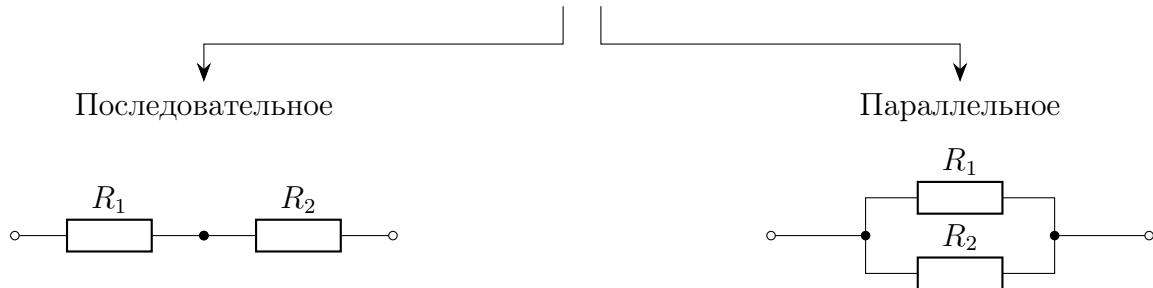
P [Вт] – мощность тока, U [В] – напряжение, I [А] – сила тока.

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, ρ [Ом · м] – удельное сопротивление, l [м] – длина проводника, S [м²] – 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, ε – 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, ε_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.

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

φ [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 [Φ] – электроемкость, q [Кл] – заряд пластины конденсатора, U [В] – напряжение.

Формула 3.13.

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

$C [\Phi]$ – электроемкость, ε – диэлектрическая проницаемость, ε_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.



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

$$C = C_1 + C_2$$

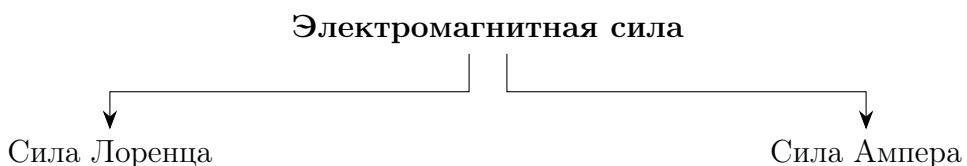
3.6 Магнитное поле

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, α – 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, α – 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° 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.

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

σ [Кл/м²] – поверхностная плотность заряда, q [Кл] – заряд, S [м²] – 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.

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

ν [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.

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

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

Формула 3.19.

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

Φ [Вб] – магнитный поток катушки, N – количество витков катушки, B [Тл] – магнитная индукция, S [м^2] – площадь, α – 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, Φ [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, Φ [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.

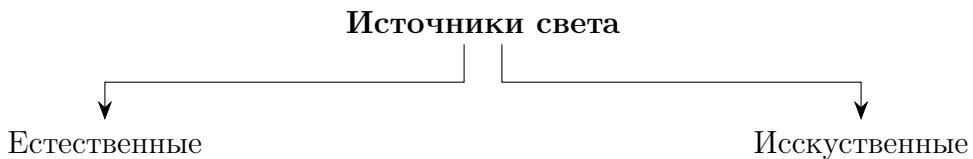
Формула 3.24.

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

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.

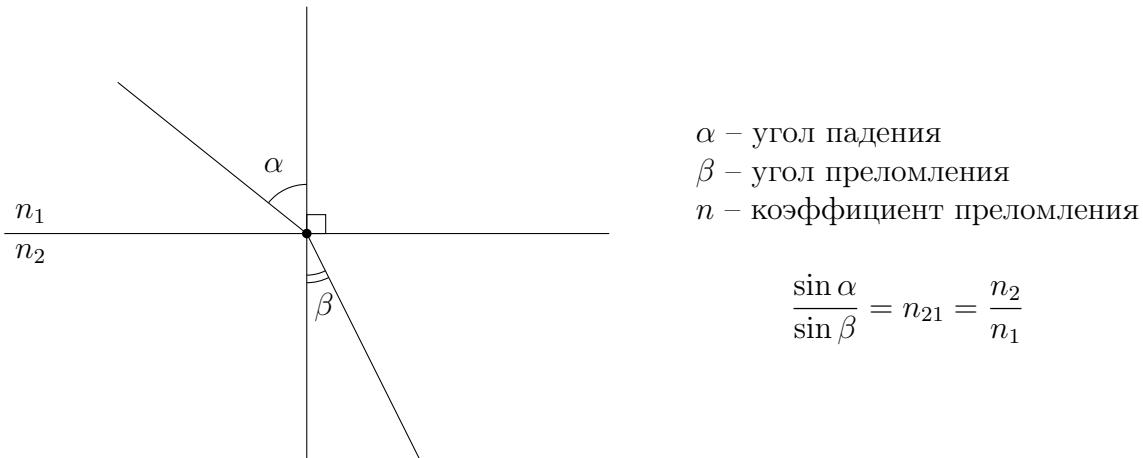
Определение 44. Тень – область пространства, куда не попадает свет.

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.

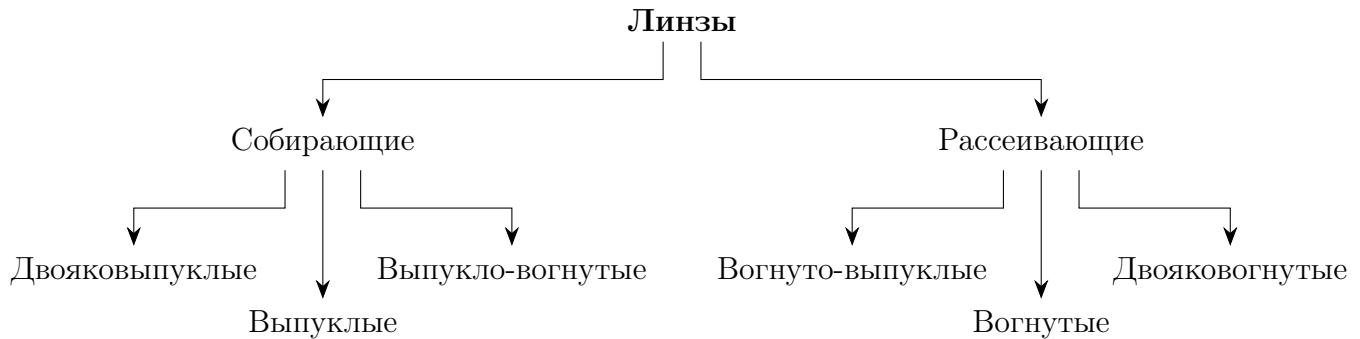
Определение 50. Мнимое изображение – изображение, находящееся на пересечении продолжений лучей.

Формула 4.1.

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

n – количество отражений, α – 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

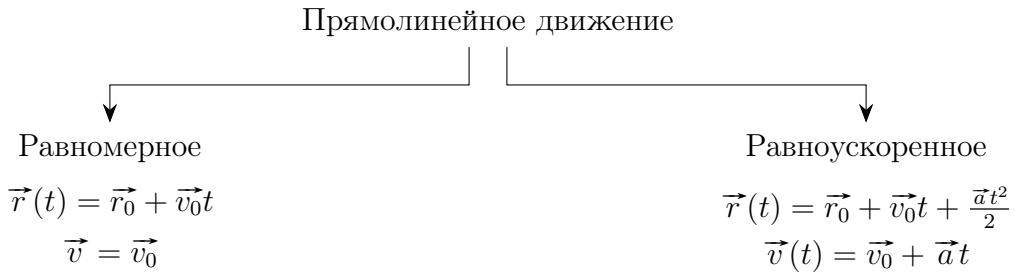
Определение 62. Инерциальными системами отсчёта называются системы отсчёта, в которых тела движутся равномерно или находятся в состоянии покоя, при одинаковых начальных условиях движутся одинаково, и изменение скорости тела происходит в результате действия на него других тел.

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/c²] — 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: $E_1 = E_2 + Q$.

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

Определение 73. 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:

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

M [Н · м] – момент силы, стремящейся повернуть тело по часовой стрелке, M' [Н · м] – момент силы, стремящейся повернуть тело против часовой стрелки.

7 Термодинамика

Определение 74. Механика изучает макроскопические объекты, состоящие из множества частиц. Термодинамика изучает микроскопические объекты, состоящие из молекул и атомов.

7.1 Молекулярная кинетическая теория

Определение 75. Тепловое движение – беспорядочное движение частиц.

Определение 76. 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 77. 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 78. 1 моль вещества – количество частиц в 12 г изотопа углерода-12.

Определение 79. 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 80. Зарядовое число (Z) – количество протонов в атомном ядре, равное порядковому номеру химического элемента в таблице Менделеева.

Определение 81.

$$M = N_p + N_n$$

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

7.3 Идеальный газ

Определение 82. Идеальный газ – модель газа, в которой не учитывается взаимодействие молекул (молекулы считаются материальными точками).

Определение 83. Давление газа – это сила, которую газ оказывает на стенки его сосуда.

Давление газа обуславливается ударением молекул газа о стенки сосуда.

Определение 84. Концентрация – отношение общего числа молекул газа к его объёму:

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

n [м⁻³] – концентрация, N – число молекул в газе, V [м³] – объём газа.

Определение 85. Средняя квадратичная скорость – это скорость, равная корню квадратному из средней арифметической величины квадратов скоростей отдельных молекул:

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

$v_{\text{ср. кв.}}$ [м/с] – средняя квадратичная скорость, v_i [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 [Па] – давление, n [м⁻³] – концентрация, \bar{E} [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^2 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 86. 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 87. Термодинамическое 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 [м³] – объём, ν [моль] – количество вещества, R – универсальная газовая постоянная (≈ 8.31 Дж/(моль · 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 88. 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:

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

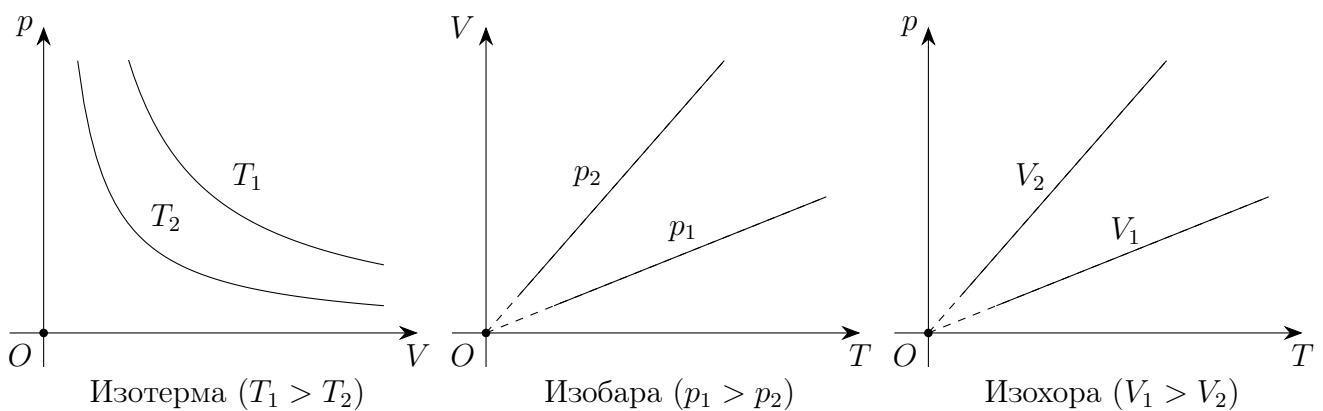
Закон 7.10 (Закон Гей-Люссака). Объём газа в изобарическом процессе пропорционален абсолютной температуре газа:

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

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 89. Внутренняя энергия идеального газа является кинетической энергией движения частиц.

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

Определение 90. Число степеней свободы – минимальное необходимое число осей для полного описания движения частицы.

Формула 7.12.

$$U = \frac{i}{2}\nu RT$$

U [Дж] – внутренняя энергия ИГ, i – число степеней свободы, ν [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).

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

Следствие 7.11.4 (Адиабатный процесс).

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

7.5 Циклы. Тепловые машины

Определение 91. 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_{x} [Дж] – теплота, полученная холодильником, $A_{\text{мех}}$ [Дж] – механическая работа тепловой машины.

Формула 7.15.

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

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

Доказательство.

$$\eta = \frac{A_{\text{полезная}}}{A_{\text{затраченная}}} = \frac{A_{\text{мех}}}{Q_{\text{н}}} = \frac{Q_{\text{н}} - Q_{\text{x}}}{Q_{\text{н}}} = 1 - \frac{Q_{\text{x}}}{Q_{\text{н}}}$$

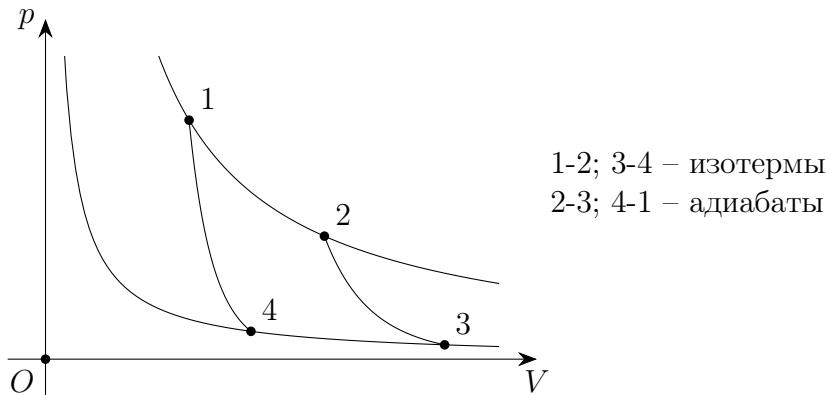
■

Определение 92. 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 93. Цикл Карно – идеальный круговой процесс. КПД тепловой машины Карно равен:

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



7.6 Влажный воздух

Определение 94. Динамическое равновесие – состояние системы (жидкость + пар), при котором число вылетающих молекул равно числу возвращающихся.

Определение 95. Насыщенный пар – пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью.

Определение 96. Кипение – парообразование по всей поверхности жидкости.

Кипение происходит, когда давление насыщенного пара уравнивается с атмосферным.

Определение 97. Абсолютная влажность воздуха – содержание водяного пара в воздухе на единицу объёма.

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

ρ [кг/м³] – абсолютная влажность воздуха, $m_{\text{пара}}$ [кг] – содержание пара в воздухе, $V_{\text{воздуха}}$ [м³] – объём воздуха.

Определение 98. Относительная влажность воздуха – отношение парциального давления водяного пара, содержащегося в воздухе, к давлению насыщенного пара при той же температуре.

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

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