

Основные положения МКТ

Левкипп и Демокрит — 400 лет до н. э.

М. В. Ломоносов — XVIII в. { «О причине теплоты и холода»
«О коловратном движении
корпускул»

1. Все вещества состоят из мельчайших частиц (молекул и атомов).
2. Молекулы находятся в непрерывном хаотическом движении.
3. Между молекулами существуют силы взаимодействия.
4. Молекулы разделены промежутками.

Опытные обоснования МКТ**Существование молекул**

1. Закон кратных отношений: при образовании из двух элементов различных веществ массы одного из элементов в разных соединениях находятся в кратных отношениях — $N_2O:N_2O_2$:
: N_2O_3 — 1:2:3.

2. Наблюдение молекул с помощью ионного проектора, электронного микроскопа.

3. Явление диффузии.

Хаотическое движение молекул

1. Броуновское движение.

2. Диффузия и осмос.

3. Давление газа на стенки сосуда.

4. Стремление газа занять любой объем.

Силы взаимодействия

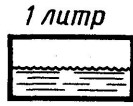
1. Деформация тела.

2. Сохранение формы твердого тела.

3. Поверхностное натяжение жидкости.

Наличие промежутков

1. При смешивании различных жидкостей $V_{\text{смеш}} < \Sigma V_{\text{отдельных жидкостей}}$
2. Диффузия.
3. Деформация.

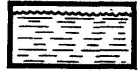


Вода



Спирт

Меньше 2 литров

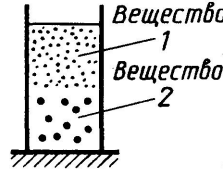


Смесь

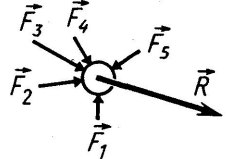
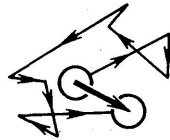
Диффузия

Броуновское движение

Р. Броун (1827) наблюдал:
Создание теории А. Эйнштейном (1905) и исследования М. Смолуховским...
Ж. Перрен (1908—1911) — опыты:



Движение не прекращается

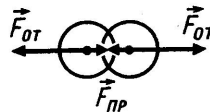
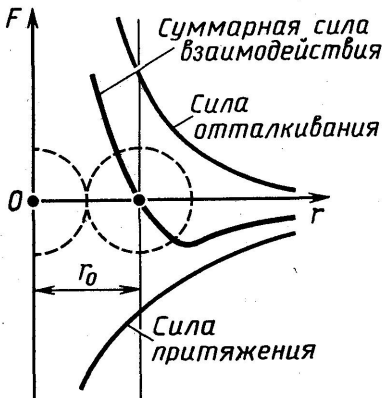


Роль в природе, технике

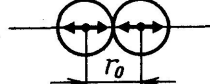
1. Питание растений из почвы.
2. В организмах человека и животных всасывание питательных веществ происходит через стенки органов пищеварения.
3. Цементация.

Силы взаимодействия молекул

1. Силы притяжения и отталкивания действуют одновременно.
2. Силы электромагнитной природы.



$$r < r_0 \quad F_{\text{пр}} < F_{\text{от}}$$



$$r = r_0 \quad F_{\text{пр}} = F_{\text{от}}$$



$$r > r_0 \quad F_{\text{пр}} > F_{\text{от}}$$

Количество вещества (ν)

Один моль содержит N молекул = N молекул в углероде массой 0,012 кг.

Постоянная Авогадро (N_A)

В моле любого вещества $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

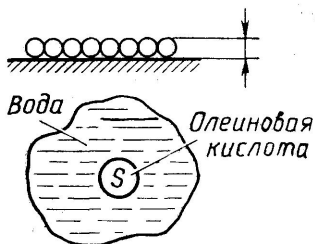
Молярная масса (M)

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

$$M = \frac{m N_A}{N}$$

Выражается молярная масса в $\frac{\text{кг}}{\text{моль}}$.

Размеры молекул



Приближенная модель молекулы — шар.

Олеиновая кислота

Объем 0,5%-ного раствора олеиновой кислоты равен 2 мм³, а объем чистой кислоты в растворе равен $0,005 \cdot 2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 = 10^{-11} \text{ м}^3$; $D = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$;

$$V = S d_0,$$

$$d_0 = \frac{V}{S} = \frac{V \cdot 4}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3}{3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м},$$

$$d_0 = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Масса молекулы (m_0)

$$m_0 = \frac{m}{N} = \frac{m}{\nu N_A} = \frac{M}{N_A},$$

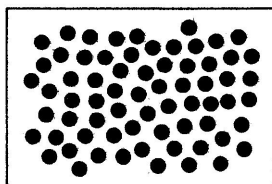
$$m_0 = \rho V_0 = \rho \frac{4}{3} \pi R^3,$$

если приближенная модель молекулы — шар;

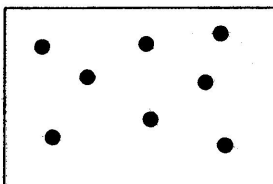
$$m_0 = M_r \frac{1}{12} m_{\text{OC}},$$

где M_r — относительная молекулярная масса;

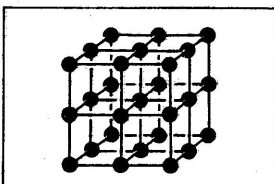
$$1 \text{ а. е. м.} = \frac{1}{12} m_{\text{OC}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$



Жидкость



Газ



Твердое тело

Строение газообразных, жидких и твердых тел

Газообразные. Расстояние между молекулами \gg размера молекул. Силы $F_{от}$ малы. Молекулы движутся от столкновения до столкновения. Газы неограниченно расширяются, легко сжимаются, занимают любой предоставленный им объем.

Жидкие. Расстояние между молекулами значительно $<$, чем в газах. Силы взаимодействия между молекулами достаточно велики, поэтому молекулы жидкости совершают колебания около средних положений равновесия. Энергия $E_{к.ср}$ сравнима с энергией взаимодействия, но молекулы со случайным избытком кинетической энергии меняют положения равновесия и через $\sim 10^{-8}$ с скачкообразно перемещаются, что приводит к текучести жидкости.

Твердые. Расстояние между молекулами $<$, чем в жидкостях. Силы взаимодействия, энергия велики. $E_{п} > E_{к}$ молекул, поэтому молекулы совершают малые колебания около положения равновесия — узла кристаллической решетки.

Силы притяжения и отталкивания молекул уравновешены, если тело не деформировано.

ОК-3

Основное уравнение МКТ газов

Модель идеального газа

1. Межмолекулярные силы взаимодействия отсутствуют.
2. Взаимодействия молекул газа происходят только при их соударениях и являются упругими.
3. Молекулы газа не имеют объема — материальные точки.

Хаотичность молекулярного движения

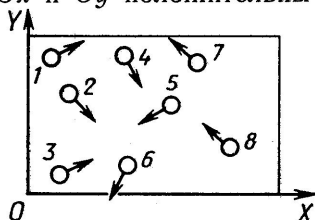
Проекции скоростей молекул на оси Ox и Oy положительны или отрицательны:

$$1, 2, 3 \text{ и } 4 \left. \vphantom{1, 2, 3 \text{ и } 4} \right\} v_x (+)$$

$$6, 5, 2 \text{ и } 4 \left. \vphantom{6, 5, 2 \text{ и } 4} \right\} v_y (-)$$

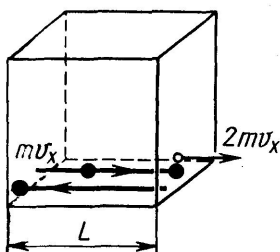
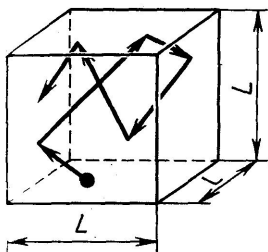
$$5, 6, 7 \text{ и } 8 \left. \vphantom{5, 6, 7 \text{ и } 8} \right\} v_x (-)$$

$$1, 3, 7 \text{ и } 8 \left. \vphantom{1, 3, 7 \text{ и } 8} \right\} v_y (+)$$



Средняя сила давления

Рассмотрим движение одной молекулы, заключенной в кубическом ящике.



Для упрощения предположим, что молекула движется вправо и влево по оси Ox .

Импульс вправо (проекция на ось Ox) равен m_0v_x , влево: $-m_0v_x$ (m_0 — масса молекулы).

Молекула движется, ударяясь о стенки под различными углами.

Изменение импульса: $\Delta p_x = 2mv_x$.

Согласно II закону Ньютона

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

Зная, что $\Delta t = \frac{2L}{v_x}$; где Δt — время между двумя отскоками молекулы, а

$$\Delta p_x = m_0v_x - (-m_0v_x) = 2m_0v_x,$$

получим среднюю силу, действующую на стенку:

$$\bar{F} = \frac{2mv_x}{2L/v_x} = \frac{mv_x^2}{L}.$$

Если в ящике в одном направлении движется N молекул, то средняя сила равна:

$$\bar{F} = N \frac{mv_x^2}{L}.$$

Среднее значение квадрата модуля скорости

Среднее значение квадрата скорости:

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}.$$

Квадрат модуля любого вектора на оси Ox , Oy , Oz равен:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2.$$

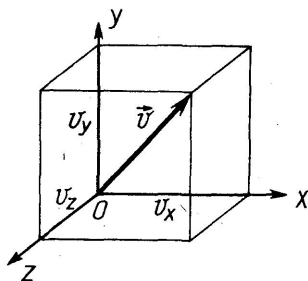
Среднее значение квадратов проекций скоростей:

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

Оси Ox , Oy , Oz равноправны.
Следовательно,

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

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

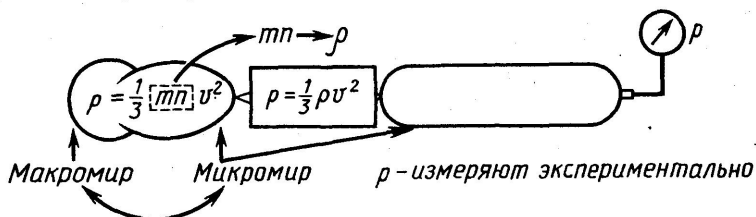


Так как $\overline{F} = \frac{1}{3} N \frac{m_0 \overline{v^2}}{L}$, $p = \frac{F}{S}$, то $p = \frac{1}{3} \frac{Nm_0 \overline{v^2}}{LS} = \frac{1}{3} \frac{Nm_0 \overline{v^2}}{V}$.

Знаем, что $LS = V$ — объем ящика, $\frac{N}{V} = n$ — концентрация молекул.

Следовательно, $p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}$ — основное уравнение

МКТ (уравнение Клаузиуса), устанавливающее связь между микро- и макромиром;



Устанавливается связь между микро- и макромиром.

Так как $E_k = \frac{m_0 v^2}{2}$, откуда $m_0 v^2 = 2E_k$.

Следовательно,

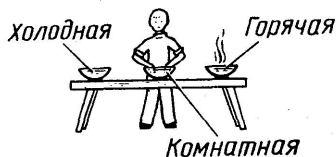
$$p = \frac{2}{3} \overline{E_k} n.$$

Давление идеального газа прямо пропорционально средней кинетической энергии поступательного движения молекул, содержащихся в единице объема газа.

ОК-4

Температура

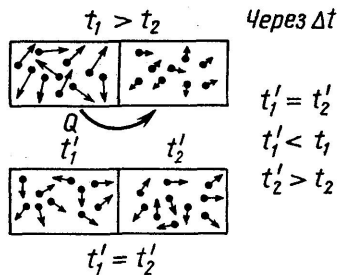
Важнейшим внутренним параметром газа является температура, чувствительность к которой заложена в живых системах, однако она субъективна.



Основные свойства температуры

Тепловое равновесие

1. Характеризует внутреннее состояние макроскопической системы.
2. Температуры тел, находящихся в тепловом контакте, выравниваются.

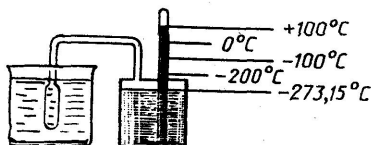
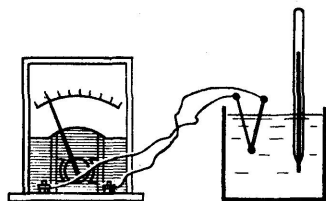


Измерение температуры

1. Тело необходимо привести в тепловой контакт с термометром.
2. Термометр должен иметь массу значительно меньше массы тела.
3. Показание термометра следует отсчитывать после наступления теплового равновесия.

Термометры

1. Жидкостный термометр (ртуть: температура от -38 до 260 °С; глицерин: от -50 до 100 °С).
2. Термопара (температура от -269 до 2300 °С).



3. Термисторы: сопротивление зависит от температуры.
4. Газовые термометры.

Физический смысл температуры

Какая физическая величина является одинаковой у любых тел при тепловом равновесии?

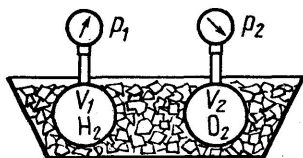
Предположим, что при тепловом равновесии средние кинетические энергии молекул одинаковы. Из основного уравнения МКТ можно получить равенство

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

Для проверки этого равенства опытным путем измерим отношение $\frac{pV}{N}$ для 1 моль водорода:

$$V = 0,1 \text{ м}^3 \text{ при } t = 0 \text{ } ^\circ\text{С.}$$

Если $p_H = 2,265 \cdot 10^4 \text{ Па}$, то



$$\frac{\rho_{\text{H}_2} V_{\text{H}_2}}{N_{\text{H}_2}} = \frac{2,265 \cdot 10^4 \frac{\text{H}}{\text{M}^2} \cdot 0,1 \text{ м}^3}{6,02 \cdot 10^{23}} = 3,76 \cdot 10^{-21} \text{ Дж.}$$

Такое же значение получится и для 1 моля кислорода, следовательно, и для всех других газов. Таким образом, физическая величина,

обладающая свойством температуры,— это

$$\bar{E} = \frac{mv^2}{2}.$$

Градус и джоуль

Измерим $\frac{\rho_1 V_1}{n_1}$ для газа, находящегося в контакте с тающим льдом, и $\frac{\rho_2 V_2}{n_2}$ — для пара с кипящей водой. Оказалось: $\frac{\rho_2 V_2}{n_2} > \frac{\rho_1 V_1}{n_1}$ в 1,3661 раза. Разность этих значений равна $1,38 \cdot 10^{-21}$ Дж.

Если эту разность разделить на 100, то найдем, что одному градусу по Цельсию (1°C) соответствует $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж по Кельвину.

Коэффициент $1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ — постоянная Больцмана.

Абсолютная температура и абсолютный нуль

При $T=0$ К кинетическая энергия E_k поступательно движущихся молекул равна 0.

Так как $\Delta t = \Delta T$, то Δt на $1^\circ\text{C} = \Delta T$ на 1 К.

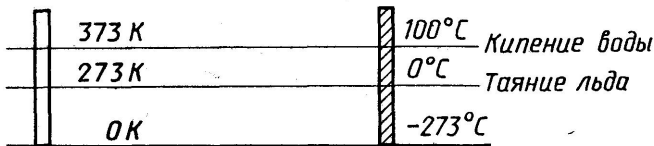
При $T=1$ К кинетическая энергия E_k равна $3/2k \cdot 1$ К, при $T=2$ К кинетическая энергия $E_k = 3/2k \cdot 2$ К, а при любой T кинетическая энергия $E_k = \frac{3}{2} kT$, т. е. средняя кинетическая энергия E_k хаотического поступательного движения молекул газа пропорциональна абсолютной температуре T .

Абсолютная шкала температур, шкала Цельсия

При $T=0$ К кинетическая энергия E_k поступательно движущихся молекул равна нулю.

Шкала Кельвина

Шкала Цельсия



T выражается в К СИ $1^\circ\text{C} = 1\text{К}$

$$T = t + 273,15^\circ\text{C}$$

$$t = T - 273,15^\circ\text{C}$$

Скорость теплового движения молекул

МКТ газов основана на том, что газы состоят из беспорядочно движущихся молекул. Понятие температуры связано с E_k хаотического движения молекул, формулой

$$\frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad \overline{v^2} = \frac{3kT}{m_0},$$

где $\overline{v^2}$ — среднее значение квадрата скорости.
Однако

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

В н и м а н и е! Средняя квадратичная скорость $\sqrt{\overline{v^2}}$ теплового движения молекул не равна их средней скорости \overline{v} , т. е. $\overline{v} \neq \sqrt{\overline{v^2}}$.

Так как $N_A k = \text{const} = R$, $m_0 = \frac{M}{N_A}$, то $\overline{v} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$.

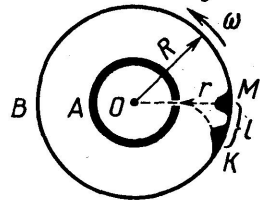
При $t = 0^\circ \text{C}$

$\left\{ \begin{array}{l} \overline{v}_{\text{N}_2} \approx 500 \text{ м/с,} \\ \overline{v}_{\text{H}_2} \approx 1800 \text{ м/с.} \end{array} \right.$ Физики XIX в. были ошеломлены.

Экспериментальное определение скорости движения молекул**Сущность опыта О. Штерна (1920)**

1. Если цилиндры неподвижны, то атомы попадают в точку M .

2. При вращении цилиндров со скоростью ω атомы попадают в точку K . Так как скорости атомов неодинаковы, то полоска размыта. Расстояние от щели до стенки цилиндра B равно r . Используя l , ω , R и r , находим

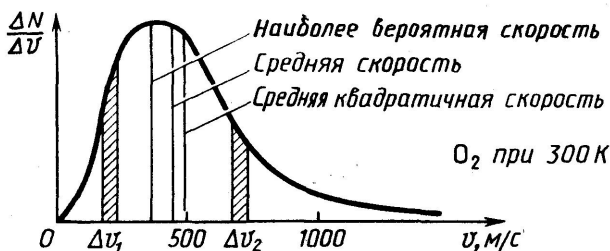


$$l = \omega R t, \quad t = \frac{r}{v} \rightarrow l = \omega R \frac{r}{v} \rightarrow \boxed{v = \frac{\omega R r}{l}}.$$

Опыт блестяще подтвердил правильность молекулярно-кинетической теории.

Распределение молекул по скоростям

График распределения молекул по скоростям
Английский физик Дж. Максвелл и австрийский физик Л. Больцман



Кривая распределения Максвелла соответствует результатам, полученным в опыте Штерна!

Количество частиц, имеющих скорости в интервале Δv , равно ΔN ; v — одна из скоростей этого интервала.

Из графика видно, что количество частиц ΔN , имеющих скорости в равных интервалах Δv_1 и Δv_2 , различно.

Скорость, около которой расположены наиболее «населенные» интервалы, — наиболее вероятная скорость теплового движения молекул.

Основные выводы

1. Большинство молекул движется с наиболее вероятной скоростью, несмотря на хаотическое движение.

2. Распределение по скоростям имеет определенную закономерность.

3. Среди молекул газа имеются как очень быстрые, так и очень медленные молекулы.

4. Распределение молекул по скоростям зависит от температуры.

5. Чем больше T , тем больше максимум кривой распределения смещается в сторону больших скоростей.

* Средняя скорость броуновской частицы

Броуновская частица массой m участвует в тепловом движении молекул, поэтому ее средняя скорость приблизительно может быть определена так:

$$\bar{v} \approx \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

Средняя скорость броуновской частицы зависит от T и m : чем больше T , тем больше \bar{v} броуновской частицы; с увеличением m скорость \bar{v} убывает. (Звездочкой отмечен материал, который в программу не входит.)

ОК-6

Уравнение состояния идеального газа

Уравнение Клапейрона

1834 г. Французский физик Б. Клапейрон, работавший дли-

тельное время в Петербурге, вывел уравнение состояния идеального газа для постоянной массы газа ($m = \text{const}$).

Из уравнения $\frac{m_0 \bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT$ и основного } $p = nkT$.

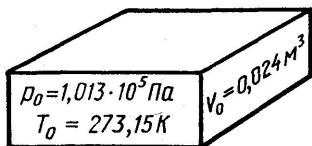
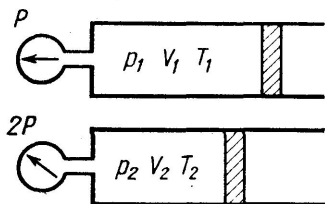
уравнения МКТ $p = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$

Зная, что $n = \frac{N}{V}$, $N = \text{const}$, получим $p = \frac{NkT}{V}$,

$$\frac{pV}{T} = Nk = \text{const.}$$

Это уравнение связывает давление, объем и температуру, которые определяют состояние идеального газа, и называется уравнением состояния идеального газа.

Для постоянной массы идеального газа отношение произведения давления на объем к данной температуре есть величина постоянная:



$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{const.}$$

т. е. уравнение Клапейрона.

Уравнение Менделеева — Клапейрона

Для одного моля газа при нормальных условиях:

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{10^5 \text{ Па} \cdot 0,024 \text{ м}^3 / \text{моль}}{273 \text{ К}} = 8,31 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{моль} \cdot \text{К}} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

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

— универсальная газовая постоянная.

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = R.$$

1874 г. Д. И. Менделеев вывел уравнение для произвольного числа молекул:

$$N = \frac{m}{m_0} \rightarrow N = \frac{m}{M} N_A \rightarrow \frac{pV}{T} = \frac{m}{M} N_A k \rightarrow \frac{pV}{T} = \frac{m}{M} R.$$

Уравнение Менделеева — Клапейрона:

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

OK-7

Изотермический процесс

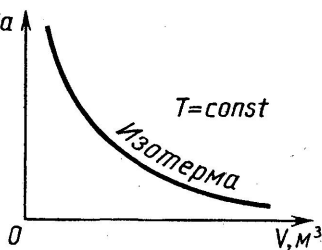
Р. Бойль (1662), Э. Мариотт (1676) $p, \text{Па}$

$$pV = \text{const при } T = \text{const}.$$

Для данной массы газа произведение давления газа на его объем постоянно, если температура газа не меняется:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \text{ при } T = \text{const};$$

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \rightarrow \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}.$$



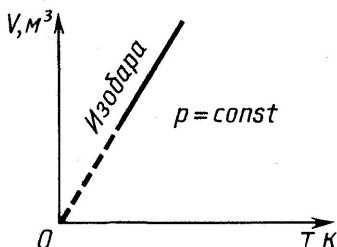
Изобарный процесс

Ж. Гей-Люссак (1802)

$$\frac{V}{T} = \text{const при } p = \text{const}.$$

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

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \text{ при } p = \text{const}; \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$



Отношение объемов прямо пропорционально отношению абсолютных температур.

Объем данной массы газа при постоянном давлении зависит от температуры по линейному закону:

$$V = V_0 (1 + \alpha_V \Delta t),$$

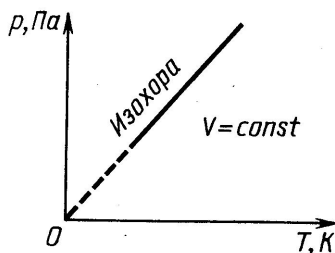
где α_V — коэффициент объемного расширения:

$$\alpha_V = \frac{V - V_0}{V_0 (t - t_0)} = \frac{1}{273,15} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

Изохорный процесс

Ж. Шарль (1787)

$$\frac{p}{T} = \text{const при } V = \text{const.}$$



Для данной массы газа отношение давления к температуре постоянно, если объем газа не меняется:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \text{ при } V = \text{const};$$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \rightarrow \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Давление данной массы газа при постоянном объеме зависит от температуры по линейному закону:

$$p = p_0 (1 + \beta \Delta t),$$

где β — температурный коэффициент давления:

$$\beta = \frac{p - p_0}{p_0 (t - t_0)} = \frac{1}{273,15} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

Свойства газов

1. Управление давлением газа.
2. Большая сжимаемость.
3. Зависимость p и V от T .

Использование свойств газов в технике

Амортизатор (в шинах), рабочее тело в двигателях (тепловых, на сжатом газе), двигателях внутреннего сгорания, в огнестрельном оружии для выталкивания пули из ствола...

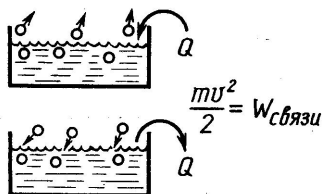
OK-8

Испарение и конденсация

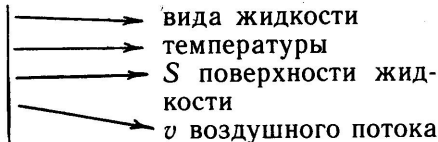
Парообразование — переход вещества из жидкого состояния в газообразное.

Испарение — парообразование со свободной поверхности жидкости (с поглощением Q) при $T = \text{const}$.

Конденсация — переход вещества из газообразного состояния в жидкое (с выделением Q) при $T = \text{const}$.



Интенсивность
испарения
зависит от



Насыщенный пар

Число молекул, покинувших жидкость за единицу времени

100
100
100
|| 100

Число молекул, вернувшихся в жидкость за единицу времени

— 20
— 35
— 40
— 100 ||

Пар ненасыщенный

|| Пар насыщенный: динамическое равновесие между жидкостью и паром

Свойства насыщенного пара

3—4-жидкость

2—3-насыщенный пар

1—2-ненасыщенный пар

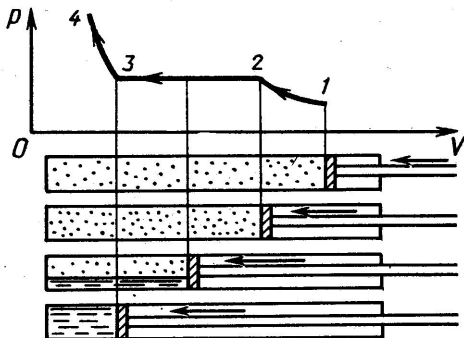
1. Давление насыщенного пара:

а) не зависит от объема над испаряющейся жидкостью при $T = \text{const}$;

б) зависит от вида жидкости;

в) зависит от температуры: чем $> T$, тем $> p$;

г) $p = \text{max}$ при T кипения.



2. Закон

$$\rho V = \frac{m}{M} RT$$

— к насыщенным и ненасыщенным

парам, но тем точнее, чем дальше от насыщения.

Закон

$$\frac{\rho V}{T} = R$$

к насыщенным парам неприменим, так как изменяется m газа.

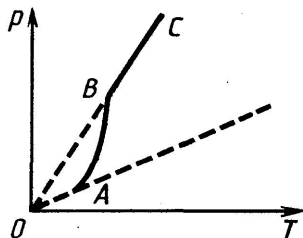
3. Пар можно перевести из ненасыщенного в насыщенный: уменьшить V , понизить t (потеют стекла, стены в ванной комнате и т. д.).

Из насыщенного в ненасыщенный: увеличить V , повысить t .

Насыщенный (участок $A - B$) Ненасыщенный (участок $B - C$)

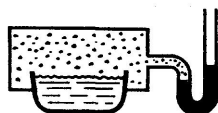


4. Зависимость $\rho_{н.п}$ от T . Участок $A - B$: закон Шарля не выполняется, так как изменяется концентрация молекул. Участок $B - C$: закон Шарля выполняется.



5. Зависимость давления p насыщенного пара от вида жидкости:

кПа		мм рт. ст.	} $t = 20^\circ \text{C}$
1,2	— вода	— 17,5	
3,2	— спирт	— 44	
38,7	— эфир	— 437	



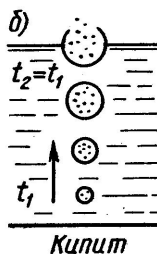
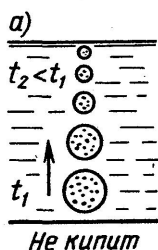
Кипение

Парообразование со всего объема жидкости при $T = \text{const}$ — кипение.

Кипение жидкости начинается при температуре, когда p насыщенного пара в пузырьках равно $p_{\text{внеш}}$. Например, для воды при $t_k = 100^\circ \text{C}$ $p_{н.п} = 10^5 \text{ Па}$, $p_{\text{атм}} = 10^5 \text{ Па}$. Следовательно, вода закипит. T_k зависит от p на поверхности жидкости. Если $H_{\text{горы}} = 7000 \text{ м}$, $p_{\text{атм}} = 4 \cdot 10^4 \text{ Па}$, $T_k = 70^\circ \text{C}$, так как $p_{н.п}$ при 70°C равно $4 \cdot 10^4 \text{ Па}$. При кипении $T_{\text{ж}}$ постоянна. С понижением давления на поверхности жидкости T_k уменьшается.

При подъеме пузырьки водяного пара конденсируются.

При подъеме пузырьков температура выравнивается, давление с высотой уменьшается, пузырьки растут, лопаются, жидкость кипит.



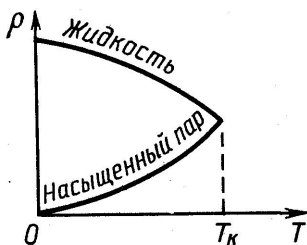
Перегретая жидкость

1. $T_{п. ж} > T_{к'}$
2. Критическая температура ($T_{кр}$) — температура, при которой исчезает различие в физических свойствах между жидкостью и насыщенным паром.

3. При $T_{кр}$ плотность $\rho_{н. п}$ и $\rho_{ж}$ становятся максимальными, $\rho_{ж}$ — минимальной. С ростом температуры уменьшается L , а при $T_{кр}$ она равна нулю.

4. Если $T \geq T_{кр}$, то газ нельзя обратить в жидкость при любом давлении.

5. Газ обращается в жидкость, если $T < T_{кр}$ и повышается давление.

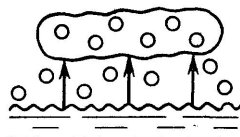


ОК-9

Влажность воздуха

Водяной пар в атмосфере

В воздухе всегда есть водяной пар ($\sim 1\%$). Он образуется в результате испарения с поверхностей океанов, морей, озер; в течение года образуется $4,25 \cdot 10^{14}$ т.

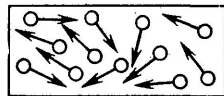


Абсолютная влажность воздуха. Парциальное давление водяного пара. Выражается ρ в $\text{кг}/\text{м}^3$.

Абсолютная влажность воздуха показывает, какая масса m воды содержится в единице объема V :

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

Давление, которое производил бы водяной пар, если бы все остальные газы отсутствовали, называется парциальным давлением ($P_{п}$).



Относительная влажность воздуха

$$\varphi = \frac{p_{п}}{p_0} \cdot 100\%.$$

Относительной влажностью воздуха φ называется величина, равная отношению давления водяного пара в воздухе к давлению насыщенного пара при той же температуре.

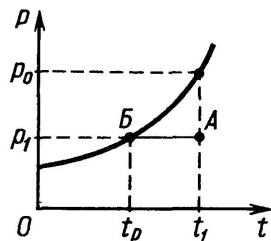
Если $\rho = \frac{\rho RT}{M}$, то $\rho_{п} = \frac{\rho_{п} RT}{M}$;

$$\rho_0 = \frac{\rho_0 R T}{M} \rightarrow \varphi = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_0} \rightarrow \boxed{\varphi = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_0} \cdot 100\%}$$

Точка росы

Понижается t при $\rho_{\text{атм}} = \text{const}$, и при определенной t пар становится насыщенным.

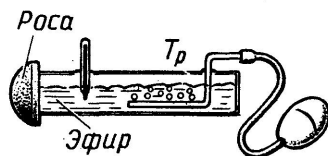
Температура, при которой водяной пар становится насыщенным, называется **точкой росы**.



Экспериментальное определение относительной влажности воздуха

Гигрометр

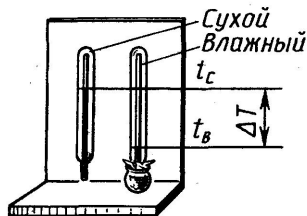
Зная t точки росы и t воздуха, по таблицам находим $\rho_{\text{п}}$ и $\rho_{\text{н}}$ и определяем относительную влажность:



$$\boxed{\varphi = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}} \cdot 100\%}$$

Психрометр (от греческого «психриа» — холод)

Зная t сухого и влажного термометров и разность Δt , по таблицам определяем φ .



Значение влажности

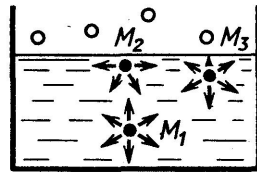
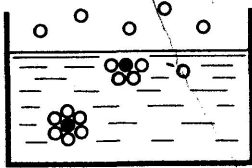
1. Самочувствие человека; наиболее благоприятная влажность от 40 до 50%.
2. Прогноз погоды.
3. Развитие флоры и фауны.
4. Сохранность произведений искусств и архитектуры.
5. Сушка изделий.

* ОК-10

Поверхностное натяжение жидкостей

Поверхность жидкости

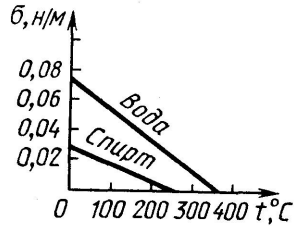
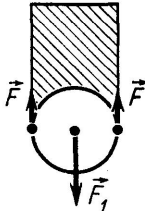
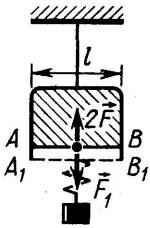
Молекулы с поверхности жидкости втягиваются внутрь жидкости. Поверхностный слой создает давление на жидкость — **молекулярное давление**.



На каждую молекулу действует равнодействующая сила F_p , направленная вниз. Наибольшая F_p действует на молекулу, находящуюся в поверхностном слое жидкости.

Сила поверхностного натяжения

Сила, которая действует вдоль поверхности жидкости, перпендикулярной к линии, ограничивающей эту поверхность, и стремится сократить ее до минимума, называется силой поверхностного натяжения.



$$2F = F_1,$$

где F_1 — модуль силы упругости;

$$F = \frac{F_1}{2},$$

где F — модуль силы поверхностного натяжения

σ зависит от вида жидкости, температуры, состояния жидкости

$$F \sim l, F = \sigma l.$$

$$\sigma = \frac{F}{l} \rightarrow \frac{H}{m}.$$

Смачивание

1. Если сила взаимодействия между молекулами жидкости и вещества больше силы взаимодействия между молекулами этой жидкости, то жидкость смачивает твердую поверхность, т. е. $\beta < 90^\circ$.



Вогнутый мениск Выпуклый мениск

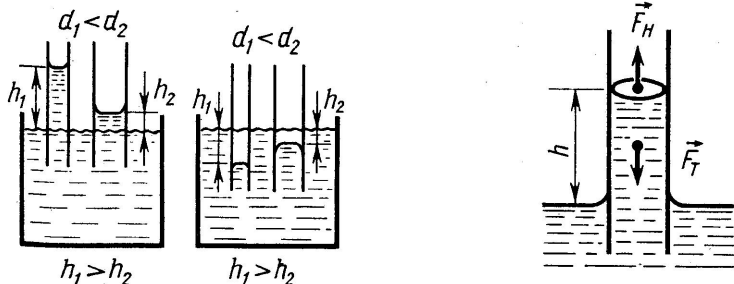
2. Если сила взаимодействия между молекулами жидкости и вещества меньше силы взаимодействия между молекулами этой жидкости, то жидкость не смачивает твердую поверхность, т. е. $\beta > 90^\circ$.

Капиллярность

Высота h зависит от рода жидкости, радиуса трубки.

$$F = \sigma l = \sigma 2\pi r,$$
$$F_n = mg \rightarrow \sigma 2\pi r = V\rho g = \pi r^2 h\rho g$$
$$2\sigma = rh\rho g \rightarrow$$

$$h = \frac{2\sigma}{r\rho g}.$$



Учет смачивания в природе и технике

Тела, пронизанные большим числом тонких каналов, активно впитывают в себя воду и другие жидкости — только необходимо, чтобы жидкость смачивала поверхности этих тел. Так, полотенце впитывает в себя воду при вытирании рук. В фитиле керосин непрерывно поднимается по капиллярам вверх, где и сгорает. В технике применяют фитильный способ подачи масла. Так как кирпичи — это пористые тела, то кирпичные дома в нижней части должны быть изолированы от влаги материалом, не имеющим капилляров. В почве вода поднимается по многочисленным капиллярам и испаряется. Это ведет к потере влаги, необходимой растениям.

ОК-11

Кристаллические и аморфные тела

Твердое состояние вещества

1. Обычно вещество называют твердым, если оно сохраняет свою форму и объем, т. е. *внешние признаки*.

2. В физике под твердыми телами подразумевают вещества, у которых имеется кристаллическое строение, т. е. «дальний порядок», в расположении его частиц.

В зависимости от структуры различают тела кристаллические и аморфные.

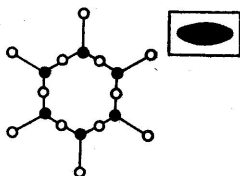
Кристаллические тела

Монокристаллы —

одинокые кристаллы (кварц, алмаз).

Поликристаллы —

много кристаллов (металлы, сахар, поваренная соль).



Свойства

1. Температура плавления $t_{пл} = \text{const}$.
2. Каждое вещество имеет свою температуру плавления.

Анизотропия —

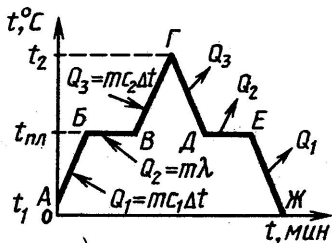
зависимость физических свойств от направления внутри кристалла.

Механическая прочность, оптические, электрические, тепловые свойства.

Изотропия —

одинаковые физические свойства по всем направлениям.

У поликристаллов анизотропия свойственна для каждого кристалла. Так как кристаллики расположены друг относительно друга хаотически, тело в целом изотропно.



АБ — нагревание вещества в твердом состоянии;

БВ — плавление вещества в твердом и жидком состоянии;

ВГ — нагревание вещества в жидком состоянии;

ГД — охлаждение вещества в жидком состоянии;

ДЕ — кристаллизация вещества;

ЕЖ — охлаждение вещества в твердом состоянии.

Аморфные тела

Не имеют постоянной температуры плавления

Не имеют кристаллического строения

Изотропны

Обладают ближний порядок

Только способны переходить в кристаллическое и жидкое состояние

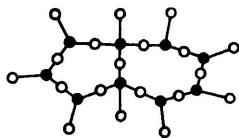
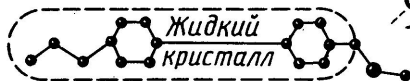
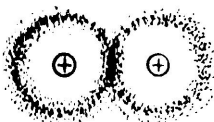
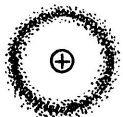
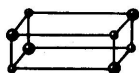
Типы кристаллов

Ионные

Атомные

Металлические

Молекулярные



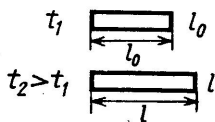
Кристаллическая форма вещества более устойчива, чем аморфная.

* Тепловое расширение твердых тел

Линейное

$$l = l_0 (1 + \alpha \Delta t),$$

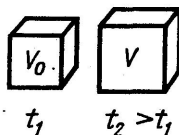
$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta t} \rightarrow K^{-1},$$



Объемное

$$V = V_0 (1 + \beta \Delta t),$$

$$\beta = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta t} \rightarrow K^{-1},$$



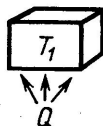
α — температурный коэффициент линейного расширения;
 β — температурный коэффициент объемного расширения.

Удельная теплота плавления

Количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг кристаллического вещества в жидкое состояние при $T = \text{const}$, называется удельной теплотой плавления (λ):

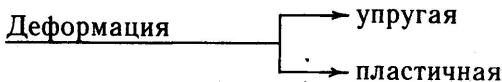
$$T_1 = T_2 = \text{const}, \quad \boxed{Q = m\lambda}, \quad \lambda = \frac{Q}{m}.$$

Выражается λ в $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.



ОК-12

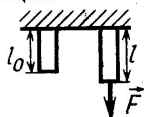
Деформация. Виды деформации



Виды деформации

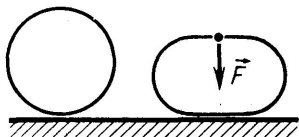
Растяжение

Тросы
Канаты
Веревки



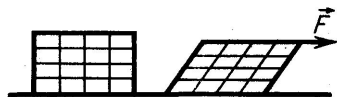
Сжатие

Фундамент строения
Опоры мостов



Сдвиг

Асфальт дороги



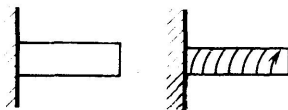
Изгиб

Балки, перекрытия балок



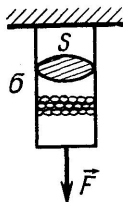
Кручение

Автомобильный вал
Деформация незначительна



Механическое напряжение (σ)

$$\left. \begin{aligned} \sigma &\sim F, \\ \sigma &\sim \frac{1}{S} \end{aligned} \right\} \sigma = \frac{F}{S}$$



Выражается σ в $\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$, или в Па.

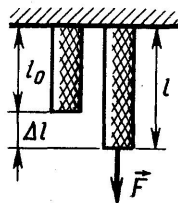
На графике видно: чем \angle угол наклона, тем упругие свойства материала выше, т. е. $E_2 > E_1$.

Закон Гука

Пусть l — конечная длина; l_0 — начальная длина; Δl — абсолютное изменение длины;

$\frac{|\Delta l|}{l_0} = \epsilon$ — относительное изменение длины.

При малых деформациях $\sigma = \frac{F}{S}$, $k \sim \frac{S}{l_0}$.



Для перехода к равенству k и $\frac{S}{l_0}$ введем коэффициент пропорциональности E , который называется *модулем Юнга* (модуль упругости материала), характеризующий упругие свойства материала.

Следовательно, $k = E \cdot \frac{S}{l_0}$.

Так как $F = k |\Delta l|$, то $\sigma = \frac{k |\Delta l|}{S} = \frac{ES |\Delta l|}{Sl_0} = E |\epsilon|$.

Таким образом, видно, что при малых деформациях σ прямо пропорциональна ϵ , т. е.

$$\sigma = E |\epsilon| \quad \text{— закон Гука.}$$

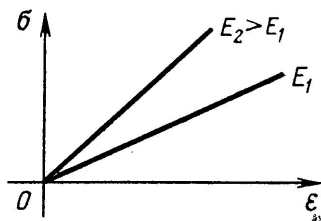


Диаграмма растяжения материала

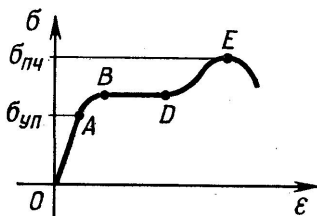
1. Напряжение $\sigma_{уп}$, выше которого начинается нарушение линейной зависимости σ от ϵ , называется пределом упругости (точка A).

2. Участок AB: ϵ растет непропорционально.

3. Участок BD: ϵ растет — стержень растягивается; $\sigma = \text{const}$ — наблюдается текучесть материала.

4. При увеличении деформации ϵ растет, в точке E достигает максимума — образец разрушается.

Предел прочности $\sigma_{пч}$ — напряжение, при котором стержень разрушается.



Механические свойства материалов

Пластичность — свойство материала при незначительных нагрузках приобретать остаточную деформацию (свинец, воск).

Хрупкость — свойство материала разрушаться при небольших деформациях (стекло, фарфор).

ОК-13

Способы изменения внутренней энергии

I. Совершение работы

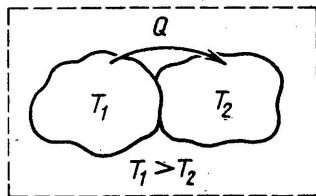
II. Теплопередача

1. Теплопроводность.
2. Конвекция.
3. Излучение.

$$\Sigma U = \text{const.}$$

Для замкнутой системы

$$\Delta U = 0$$



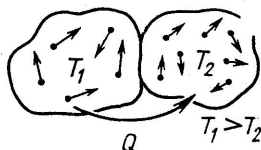
I. Совершение работы

$$\Delta U = A_{\text{тр}} \begin{cases} \text{Обработка деталей напильником, резцом.} \\ \text{Работа по преодолению } F_{\text{тр}}. \end{cases}$$

II. Теплопередача

$$\Delta U = Q,$$

где Q — количество теплоты, переданное телу.



1. *Теплопроводностью* называется процесс передачи внутренней энергии от одних частей тела к другим. Обусловлен этот процесс хаотическим движением молекул без переноса вещества.

2. *Конвекция* — теплообмен, который происходит при перемешивании неравномерно нагретых газов или жидкостей под действием силы тяжести.

3. *Излучение* тела, которое определяется только его температурой, называется тепловым излучением.

Теплоемкость тела (c_T)

$$T_1 < T_2, Q_1 = Q_2, c_1 > c_2.$$

$$c_T = \frac{Q}{\Delta T}.$$



Теплоемкость тела c_T показывает, какое количество теплоты Q необходимо для изменения температуры тела T на 1 К.

Выражается c_T в $\frac{\text{Дж}}{\text{К}}$.

Удельная теплоемкость вещества (c)

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}.$$

Удельная теплоемкость c — это количество теплоты, которое получает или отдает 1 кг вещества при изменении его температуры на 1 К.

Выражается c в $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Молярная теплоемкость (c_m)

$$c_m = \frac{QM}{m\Delta T},$$

c_B 4200 Дж
 Вода
 $0,2 \text{ кг } \Delta t \approx 5^\circ\text{C}$
 $Q_1 = Q_2$

c_{CB} 4200 Дж
 Свинец
 $0,2 \text{ кг } \Delta t \approx 164^\circ\text{C}$
 $c_{CB} < c_B$

где M — молярная масса вещества; m — масса вещества.

Выражается c_m в $\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.

Связь между c и c_m

$$c_m = cM.$$

Удельная теплоемкость газа

Эта теплоемкость зависит от характера процесса, при котором происходит нагревание газа.

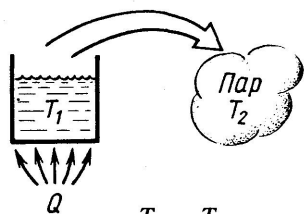
Рассмотрим удельную теплоемкость газа при $p = \text{const}$ и $V = \text{const}$: $c_{p=\text{const}} \neq c_{V=\text{const}}$

$$c_p > c_v,$$

так как при $p = \text{const}$ газ совершает работу.

Удельная теплота парообразования r

Отношение количества теплоты, необходимого для превращения жидкости в пар при $T = \text{const}$, к массе этого вещества называется удельной теплотой парообразования:



$$Q = mr,$$

$$r = \frac{Q}{m}.$$

$$T_1 = T_2$$

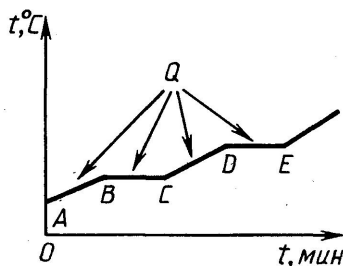
AB — нагревание тела;

BC — плавление тела;

CD — нагревание жидкости;

DE — парообразование.

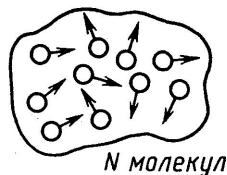
Выражается r в $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.



OK-14

Внутренняя энергия идеального газа

Предположим, что в рассматриваемой модели молекулы — материальные точки, движущиеся с v , а силы взаимодействия равны нулю. Тогда полная внутренняя энергия идеального газа определится только кинетической энергией поступательного движения частиц.



$$U = E_{k_1} + E_{k_2} + \dots + E_{k_N} = NE_k.$$

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа

$$U = N \overline{E_k}, \quad \overline{E_k} = \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T, \quad N = N_A \nu,$$

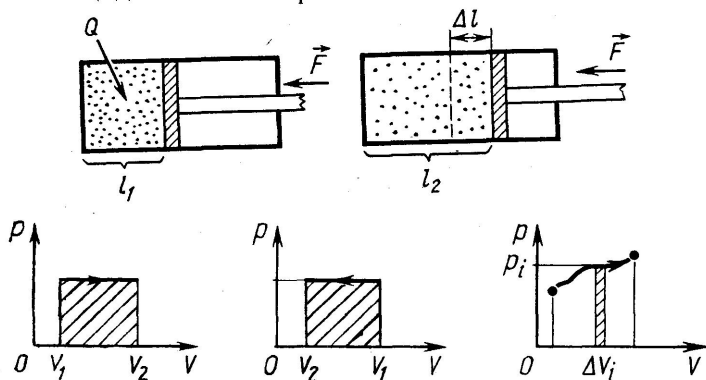
$$U = N_A \nu \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T,$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T,$$

т. е. ΔU прямо пропорциональна изменению абсолютной температуры газа.

Работа в термодинамике

S — площадь сечения поршня.



$$A = F \Delta l \cos \alpha, \quad \text{при } \alpha = 0 \quad A = F \Delta l,$$

$$A = p S \Delta l = p \Delta V,$$

$$A = p (V_2 - V_1).$$

$$A = +p \Delta V \quad A = -p \Delta V \quad A = \sum p_i \Delta V_i$$

$$\left. \begin{array}{l} A = p \Delta V, \\ p \Delta V = \frac{m}{M} R \Delta T \end{array} \right\} \rightarrow A = \frac{m}{M} R \Delta T \rightarrow A = \frac{m}{M} R (T_2 - T_1).$$

Первый закон термодинамики

Энергия в природе не возникает из ничего и не исчезает — закон сохранения энергии.

Изменение внутренней энергии системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе:

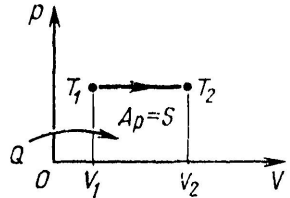
$$\Delta U = A + Q \quad \text{— первый закон термодинамики.}$$

Применение первого закона термодинамики

1. Изобарный процесс

$p = \text{const}; T_2 > T_1, \Delta U > 0, A > 0.$

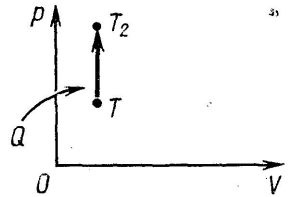
$$Q = \Delta U + A$$



2. Изохорный процесс

$V = \text{const}; T_2 > T_1, \Delta U > 0, \Delta V = 0, A = p\Delta V = 0.$

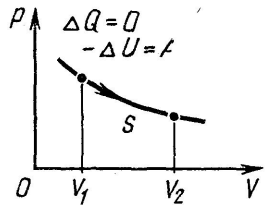
$$Q = \Delta U$$



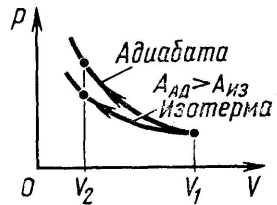
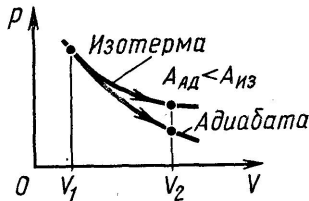
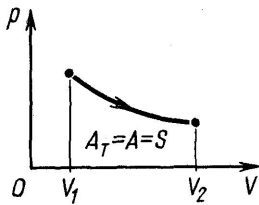
3. Изотермический процесс

$T = \text{const}; \Delta U = 0, A_T < A_p, S$ — площадь.

$$Q = A$$



4. Адиабатный процесс (без теплообмена с окружающей средой, $Q = 0$)



ОК-15

Удельная теплота сгорания

Величина, характеризующая количество теплоты, выделяющейся при полном сжигании единицы массы топлива, называется удельной теплотой сгорания:

$$q = \frac{Q_{\text{выд.}}}{m}$$

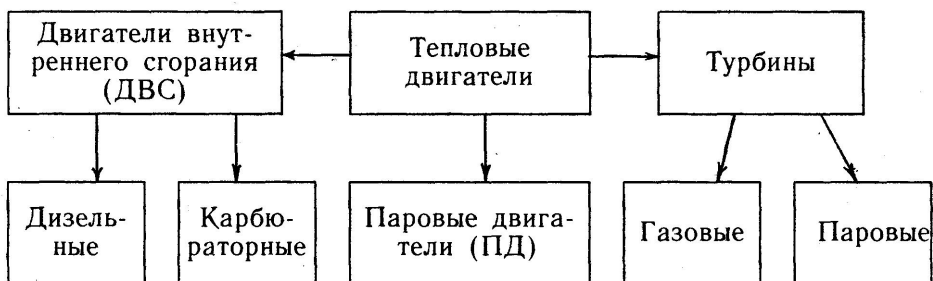
Выражается q в Дж/кг.

Современная энергетика потребляет $3 \cdot 10^{20}$ Дж энергии в год.

а получает 90% от общей вырабатываемой энергии только за счет сжигания топлива.

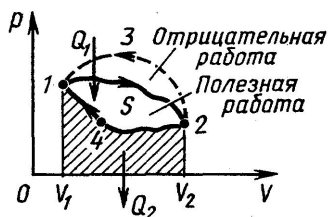
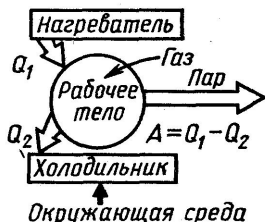
Тепловые двигатели

Машины, преобразующие внутреннюю энергию топлива в механическую, называются тепловыми двигателями.



1698 г.— англичанин Т. Севери	}	→ ПД
1763 г.— русский И. И. Ползунов		
1774 г.— англичанин Дж. Уатт		
1707 г.— француз Д. Папен	}	→ ДВС
1860 г.— француз Ленуар		
1876 г.— немец Н Отто		
1889 г.— швед К. Лаваль		
		→ паровая турбина

Принцип работы тепловых двигателей



Тепловая машина работает циклично. Рабочее вещество совершает положительную работу (+A), расширяясь от V_1 до V_2 . Чтобы замкнуть цикл, можно возвратить: 1) по тому же пути $A=0$; 2) через состояние 2, 3, 1 ($-A$) (холодильник); 3) через состояние 2, 4, 1 (+A), совершена положительная работа, равная площади (S) цикла.

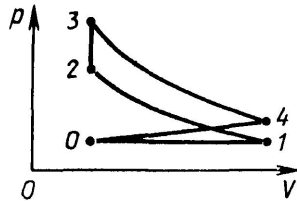
Для того чтобы цикл был замкнутый, необходимо:

- путь 1—2: $A=0$, так как $A_{1,2} = A_{2,1}$;
- путь 2—3—1: $A < 0$, так как $A_{1,2} < A_{2,3,1}$;
- путь 2—4—1: $A > 0$, так как $A_{1,2} > A_{2,4,1}$, $A = S_{\text{цикла}}$ (численно).

Любая тепловая машина состоит из нагревателя, рабочего тела и холодильника.

Принцип действия ДВС по индикаторной диаграмме

- 0—1 — впуск горячей смеси (изобара);
1—2 — сжатие — адиабатный процесс;
т. 2 — загорается горячая смесь;
2—3 — резко возрастает p (изохора);
3—4 — рабочий ход — адиабатный процесс;



4—0 — выпуск горячей смеси.

Цикл Карно

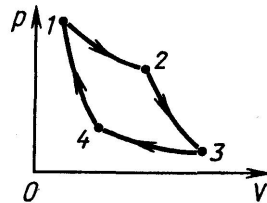
1—2 — при тепловом контакте с нагревателем газ расширяется изотермически;

2—3 — расширяется адиабатно.

После контакта с холодильником:

3—4 — изотермическое сжатие;

4—1 — адиабатное сжатие.



КПД теплового двигателя

$$\eta = \frac{A}{Q_H}$$

$$\eta = \frac{Q_H - Q_X}{Q_H} = 1 - \frac{Q_X}{Q_H}$$

Для идеального двигателя (цикл Карно):

$$\eta = \frac{T_H - T_X}{T_H} = 1 - \frac{T_X}{T_H}$$

1. η не зависит от Q , p , V , m топлива.

2. η является функцией только двух температур.

Использование тепловых двигателей

Паровые турбины на ТЭС, АЭС; все виды транспорта; речные и морские суда; в сельском хозяйстве, строительной и оборонной промышленности.

Более 80% электроэнергии вырабатывается на тепловых электростанциях.

Охрана природы

Сооружения, препятствующие выбросу в атмосферу вредных веществ; увеличение эффективности использования энергии; экономия; замена ДВС электродвигателями.