

## Тема 9. Газовые законы

### 1. Объединенный газовый закон

Между макропараметрами вещества  $p, V, T$  и микропараметрами частиц  $m_0, \bar{E}_k, \bar{v}$  существует связь, которая, на первый взгляд, не очень явно задана основным уравнением МКТ в его новом виде.

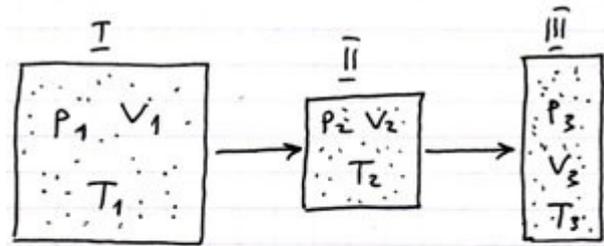
$$\left. \begin{aligned} p &= nkT \\ n &= \frac{N}{V} \end{aligned} \right\} \Rightarrow p = \frac{N}{V} kT \Rightarrow \frac{pV}{T} = N \cdot k$$

Для герметичного сосуда  $m = \text{const}$  - масса всего газа  $\Rightarrow N = \text{const}$  - количество частиц в газе  $\Rightarrow Nk = \text{const}$  - как произведение двух постоянных величин  $\Rightarrow$

$$\boxed{\frac{pV}{T} = \text{const}} \quad \begin{array}{l} \text{объединенный} \\ \text{газовый} \\ \text{закон} \\ \text{ОГЗ} \end{array}$$

Все газовые законы установлены для идеального газа, который находится в герметичном сосуде, т.е.  $m = \text{const}$  - масса всего газа.

Покажем схематически переход газа из состояния I  $\Rightarrow$  в состояние II  $\Rightarrow$  в состояние III:



$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p_3 V_3}{T_3}$$

Переход газа из одного состояния в другое может быть осуществлен его нагреванием, охлаждением, сжатием или разряжением.

### 2. Уравнение состояния идеального газа

Запишем ОГЗ для 1 моля газа:

$$\frac{p V_{\text{моль}}}{T} = N_A \cdot k, \quad \text{где } N_A - \text{пост. Авогадро}$$

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

1 моль - единица изм. к-ва вещь-ва

$$\nu = \frac{m}{M}$$

$m$  - масса газа

$M$  - молярн. масса

$[\nu] - 1 \text{ моль}$

Принято обозначать:

$N_A \cdot k = R$  - универсальная газовая постоянная

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

Итак:

$$\frac{p V_{\text{моль}}}{T} = R \Rightarrow p V_{\text{моль}} = RT \quad \begin{array}{l} \text{ур-ие сост.} \\ \text{для 1 моля} \\ \text{газа} \end{array}$$

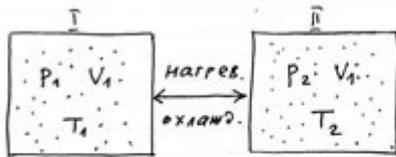
Для  $\nu$  молей:  $pV = \nu RT$ , но  $\nu = \frac{m}{M} \Rightarrow$

$$\Rightarrow pV = \frac{m}{M} RT \quad \begin{array}{l} \text{ур-ие состояния} \\ \text{для любого к-ва} \\ \text{газа} \end{array}$$

Это уравнение также называют также уравнением [Менделеева - Клапейрона](#).

Рассмотрим процессы, протекающие в идеальном газе, когда *один макропараметр остается постоянным*, а два других - меняются. Такие процессы в физике называют **изопроцессами**. Все изопроцессы протекают в герметичном сосуде  $\Rightarrow m = \text{const}$  - это общее условие.

**3. Изохорный процесс** протекает в герметичном сосуде с *абсолютно жесткими стенками*. Если газ нагревать или охлаждать в таком сосуде, то будут меняться **p** и **T** при **V = const**.

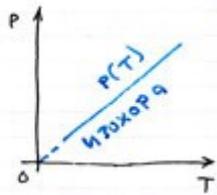


$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_1}{T_2} \Rightarrow \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \Rightarrow \frac{p}{T} = \text{const} \quad \begin{array}{l} \text{ур-ие} \\ \text{изохоры} \\ \text{процесса} \end{array}$$

Применим ОГЗ  $\Rightarrow$  объем сокращаем  $\Rightarrow$  получается **уравнение изохорного процесса**.

$$p(T) \Rightarrow p = \text{const} \cdot T$$

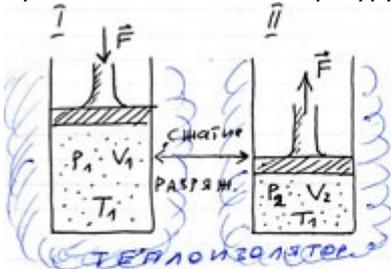
(матем  $y = kx$ )



Математическая зависимость давления от температуры **p(T)** - прямая пропорциональность  $\Rightarrow$  графиком будет прямая, проходящая через начало координат - *изохора*. Угол наклона графика зависит от концентрации газа: чем она больше, тем график проходит круче.

**4. Изотермический процесс** протекает герметичном *абсолютно теплоизолированном* сосуде с поршнем, который *медленно* перемещают (внешняя сила). При медленном смещении поршня и абсолютной теплоизоляции меняются **p** и **V** газа при **T = const**.

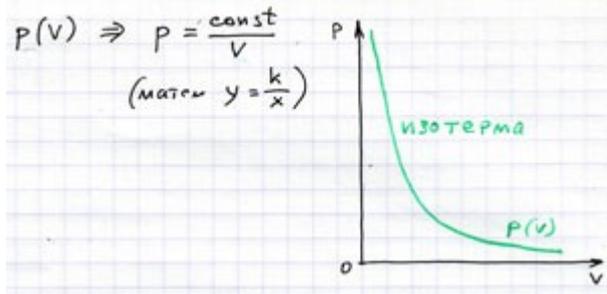
Применим ОГЗ  $\Rightarrow$  температуру сокращаем  $\Rightarrow$  получается **уравнение изотермического процесса**.



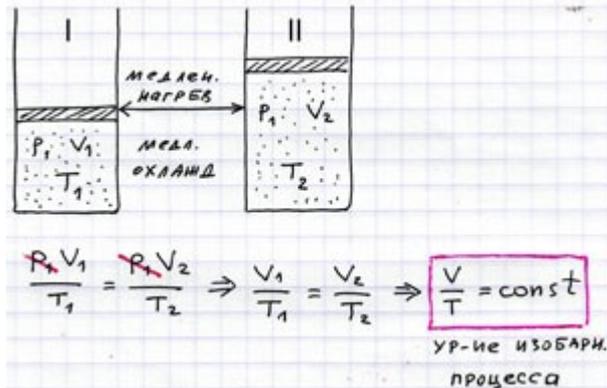
$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_1} \Rightarrow p_1 V_1 = p_2 V_2 \Rightarrow pV = \text{const} \quad \begin{array}{l} \text{ур-ие изотерм} \\ \text{процесса} \end{array}$$

Математическая зависимость давления от объема **p(V)** - обратная пропорциональность  $\Rightarrow$  графиком будет гипербола, в нашем случае - *изотерма*. Ее вид (как сильно она прижата к координатным осям) зависит от

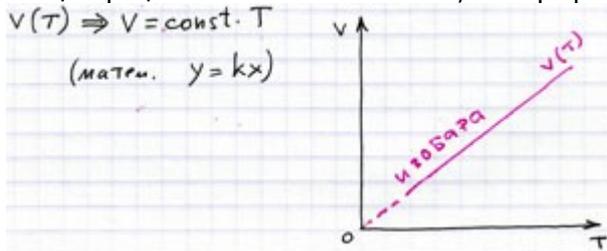
концентрации газа: чем она больше, тем график проходит ближе к осям.



**5. Изобарный процесс** протекает герметичном сосуде с поршнем, который может перемещаться *абсолютно без трения*. При медленном нагревании или охлаждении газа в сосуде вес поршня уравнивается силой давления газа. Поскольку вес поршня постоянен, то меняются **T** и **V** газа при **p = const**. Применим ОГЗ => давление сокращаем => получается **уравнение изобарного процесса**.



Математическая зависимость объема от температуры **V(T)** - прямая пропорциональность => графиком будет прямая, проходящая через начало координат - *изобара*. Угол наклона графика зависит от концентрации газа: чем она больше, тем график проходит круче.



## 6. Внутренняя энергия идеального газа

Вспомним, что внутренняя энергия представляет собой сумму средних **E<sub>к</sub>** и **E<sub>п</sub>** всех молекул тела:

$$U = \sum (\bar{E}_k + \bar{E}_p)$$

Но в идеальном газе *взаимодействие отсутствует*, поэтому сумма средних **E<sub>п</sub> = 0** и остается только сумма средних **E<sub>к</sub>**:

$$U = \sum \bar{E}_k$$

Используя формулу Больцмана, установим связь между количеством молекул **N**, количеством вещества **v**, массой газа **m** и молярной массой **M**, получим формулу для расчета нутренней энергии идеального газа:

$$E_k = \frac{3}{2} k T \quad - \text{ для одной частицы}$$

$$\left. \begin{aligned} N &= \nu N_A \\ \nu &= \frac{m}{M} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \text{ для } N \text{ частиц:}$$

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} N_A \cdot k T \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R T}$$

внутр. энерг. ид. газа

Таким образом, можно утверждать, что внутренняя энергия идеального газа прямо пропорциональна

абсолютной температуре:  $\Delta U \sim \Delta T$

Существует всего ДВА способа изменения внутренней энергии:

1-ый - **ТЕПЛОПЕРЕДАЧА** (нагрев или охлаждение газа);

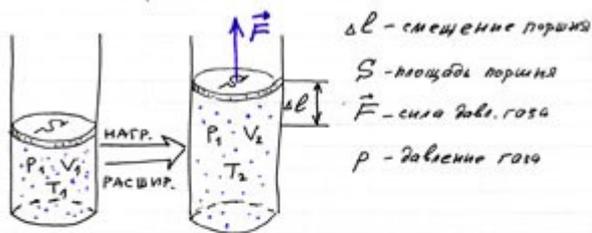
2-ой - **РАБОТА** (сжатие или расширение газа).

В любом случае меняется **T** или **V** => меняется **U** газа.

## 7. Работа газа

Вычислим работу газа при изобарном расширении:

$$m = \text{const}; \quad p = \text{const}$$



$$\left. \begin{aligned} A &= F \cdot \Delta l \\ F &= p S \end{aligned} \right\} \Rightarrow A = p \cdot S \cdot \Delta l \Rightarrow A = p \cdot \Delta V = p \cdot (V_2 - V_1)$$

$\Delta V$  - изменение объема

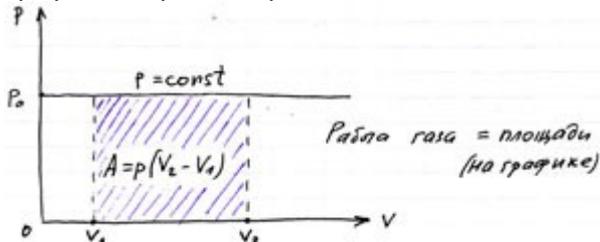
$V_1$  - нач. объем газа

$V_2$  - кон. объем газа

если  $V_2 > V_1$  (расшир.)  $\Rightarrow A > 0 \Rightarrow \Delta U < 0$  - <sup>газ</sup>охлажд.

если  $V_2 < V_1$  (сжатие)  $\Rightarrow A < 0 \Rightarrow \Delta U > 0$  - <sup>газ</sup>нагрев.

Графически работа представляет собой площадь прямоугольника - только для этого простейшего случая.



При изотермическом процессе работа также вычислялась бы как площадь, но *криволинейной трапеции*.

Площадь такой фигуры можно вычислить только методом интегрирования (интегралы вы будете изучать в математике позже).

## 8. Теплообмен

**Теплообмен** - это способ изменения внутренней энергии без совершения работы.

Существует 3 вида теплообмена:

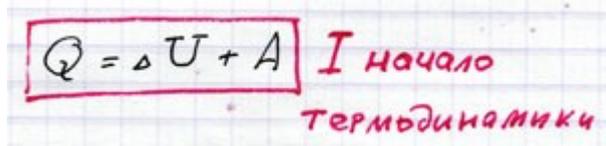
**КОНВЕКЦИЯ** - это самопроизвольное перемешивание неравномерно нагретых слоев жидкости или газа под действием силы тяжести. Известно, что нагретый газ (или жидкость) имеет меньшую плотность, чем холодный => меньший вес => поднимается вверх, а его место занимают холодные слои.

**ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ** - это передача тела внутри твердого тела вследствие его особого строения. Молекулы твердого тела совершают хаотические колебания вблизи положения равновесия. Если одну часть твердого тела нагревать, то произойдет усиление интенсивности хаотических колебаний - размах колебаний увеличится => возрастет взаимодействие с соседними молекулами => им будет передана часть **Ek** => возрастет размах их колебаний и т.д. По твердому телу распространяется "волна" усиления хаотических колебаний - оно проводит тепло. Разные твердые тела обладают разной теплопроводностью.

**ИЗЛУЧЕНИЕ** - это передача тепла с помощью невидимых инфракрасных (тепловых) лучей через любые прозрачные среды. Для передачи тепловой энергии излучением не обязательно наличие физической среды, в которой есть микрочастицы. Вакуум - это пустота. Тепло от Солнца передается к на Землю через 150 000 000 км космической пустоты 5 млрд. лет..

Итак, если системе физических тел передано некоторое количество теплоты **Q**, то ее внутренняя энергия **U** возрастает и системой может быть совершена некоторая работа **A**. Если при этом газ расширяется => **A > 0** => работу совершает газ (физическая система) => газ охлаждается => его **T** понижается и **U** уменьшается. Если газ сжимать => **A < 0** => работу совершают над газом (над физической системой) => газ нагревается => его **T** повышается и **U** возрастает.

Таким образом, для тепловых процессов справедлив **закон сохранения и превращения энергии**:


$$Q = \Delta U + A$$

*I начало*  
*Термодинамика*

сообщаемая системе теплота идет на изменение ее внутренней энергии и совершение механической работы.

Этот закон также называют **первым началом термодинамики**.

**Термодинамика** - это раздел физики, в котором изучают различные тепловые явления, происходящие без совершения механической работы, а также соответствующие взаимные превращения различных видов энергии.

## 9. Применение I начала термодинамики к различным тепловым процессам

Изохорный процесс:

$$V = \text{const} \Rightarrow \Delta V = 0 \Rightarrow A = 0 \Rightarrow Q = \Delta U$$

**I начало:** Вся сообщаемая системе теплота идет на изменение ее внутренней энергии.

Изотермический процесс:

$$T = \text{const} \Rightarrow \Delta U = 0 \Rightarrow Q = A$$

**I начало:** Вся сообщаемая системе теплота идет на совершение механической работы.

Изобарный процесс:

$$Q = \Delta U + A$$

**I начало** выполняется без оговорок.

Существует особый процесс - **адиабатный**. Его не ставят в один ряд с изопроцессами, рассмотренными ранее, поскольку его главное условие - **отсутствие теплообмена с окружающей средой**  $Q = 0$ , а все макропараметры **p, V, T** в этом процессе меняются. Этот процесс можно осуществить в герметичном сосуде, если газ сжать очень быстро. Тогда за малое время тепло не сможет проникнуть внутрь сосуда или выйти наружу.

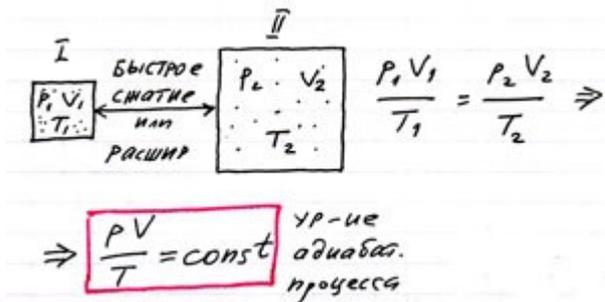
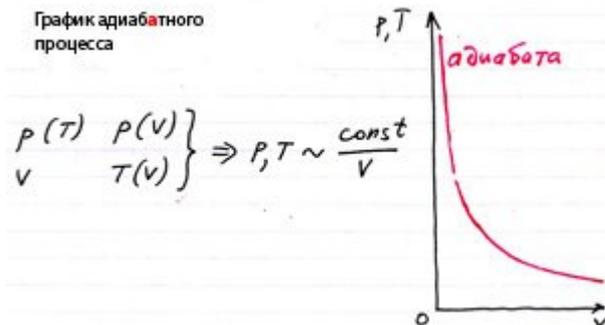


График адиабаты напоминает график изотермы, но проходит гораздо круче, поскольку в этом процессе при изменении  $V$  меняются сразу ДВА других макропараметра -  $p$  и  $T$ .



Контрольные вопросы:

1. Назовите макропараметры вещества
2. Назовите микропараметры частиц.
3. Как связать между собой макропараметры и микропараметры?
4. Запишите формулу ОГЗ.
5. При каких условиях выполняется ОГЗ?
6. Запишите ОГЗ для 1 моля газа.
7. Как вычислить количество вещества?
8. Через какие величины вводится универсальная газовая постоянная?
9. Запишите уравнение состояния для 1 моля газа.
10. Запишите уравнение состояния для любой массы газа.
11. какие процессы и почему называют «изопроцессами»?
12. Как протекает изохорный процесс?
13. Как выглядит график изохорного процесса в осях  $p, T$ ?
14. Запишите уравнение изохорного процесса.
15. Как протекает изотермический процесс?
16. Как выглядит график изотермического процесса в осях  $p, V$ ?
17. Запишите уравнение изотермического процесса.
18. Как протекает изобарный процесс?
19. Как выглядит график изотермического процесса в осях  $V, T$ ?
20. Запишите уравнение изобарного процесса.
21. Почему внутренняя энергия идеального газа зависит только от средней  $E_k$ ?
22. Как связана внутренняя идеального газа с абсолютной температурой?
23. Какие способы изменения внутренней энергии вы знаете?
24. Как вычисляется работа идеального газа при изобарном процессе?
25. Что такое «теплообмен»?
26. Что такое «конвекция»?
27. Что такое «теплопроводность»?
28. Что такое «излучение»?
29. Сформулируйте I начало термодинамики.
30. Почему адиабатный процесс нельзя отнести к изопроцессам?
31. Запишите уравнение адиабатного процесса.
32. Как выглядит график адиабатного процесса?
33. Приведите примеры адиабатного процесса в природе и технике.