

#### 4. Внутренняя энергия идеального газа. Первое начало термодинамики.

Для 1 киломоля  
идеального газа



$$U_{км} = N_A \bar{\varepsilon} = \frac{i}{2} N_A kT = \frac{i}{2} RT$$

Для массы  $m$   
идеального газа



$$U = \frac{m}{\mu} U_{км} = \frac{m i}{\mu 2} RT$$



Внутренняя энергия  
идеального газа –  
суммарная  
кинетическая энергия  
молекул газа



Внутренняя энергия ( $U$ ) – функция состояния системы ( $p, V, T$ ).

Термодинамические  
параметры состояния  
системы...



*Данному равновесному состоянию ( $p, V, T$ ) соответствует  
определенное значение внутренней энергии системы ( $U$ )*

Равновесное  
состояние...

**Изменение внутренней энергии** при переходе системы из одного состояния в другое равно разности значений внутренней энергии в этих состояниях и может происходить:

за счет **работы** над системой или за счет **теплообмена**...



$(A')$



$(Q)$

$$\Delta U = U_2 - U_1 = A' + Q \rightarrow Q = \Delta U + A \quad A' = -A$$



Совершение работы сопровождается перемещением тел, действующих на систему ( движение поршня приводит к совершению работы над газом (  $A'$  ) ; газ при этом совершает работу (  $A$  ) над поршнем)...

**Первое начало термодинамики.**

**Количество тепла  $Q$ , сообщенное системе, идет на приращение ее внутренней энергии  $\Delta U$  и на совершение системой работы ( $A$ ) над внешними телами.**

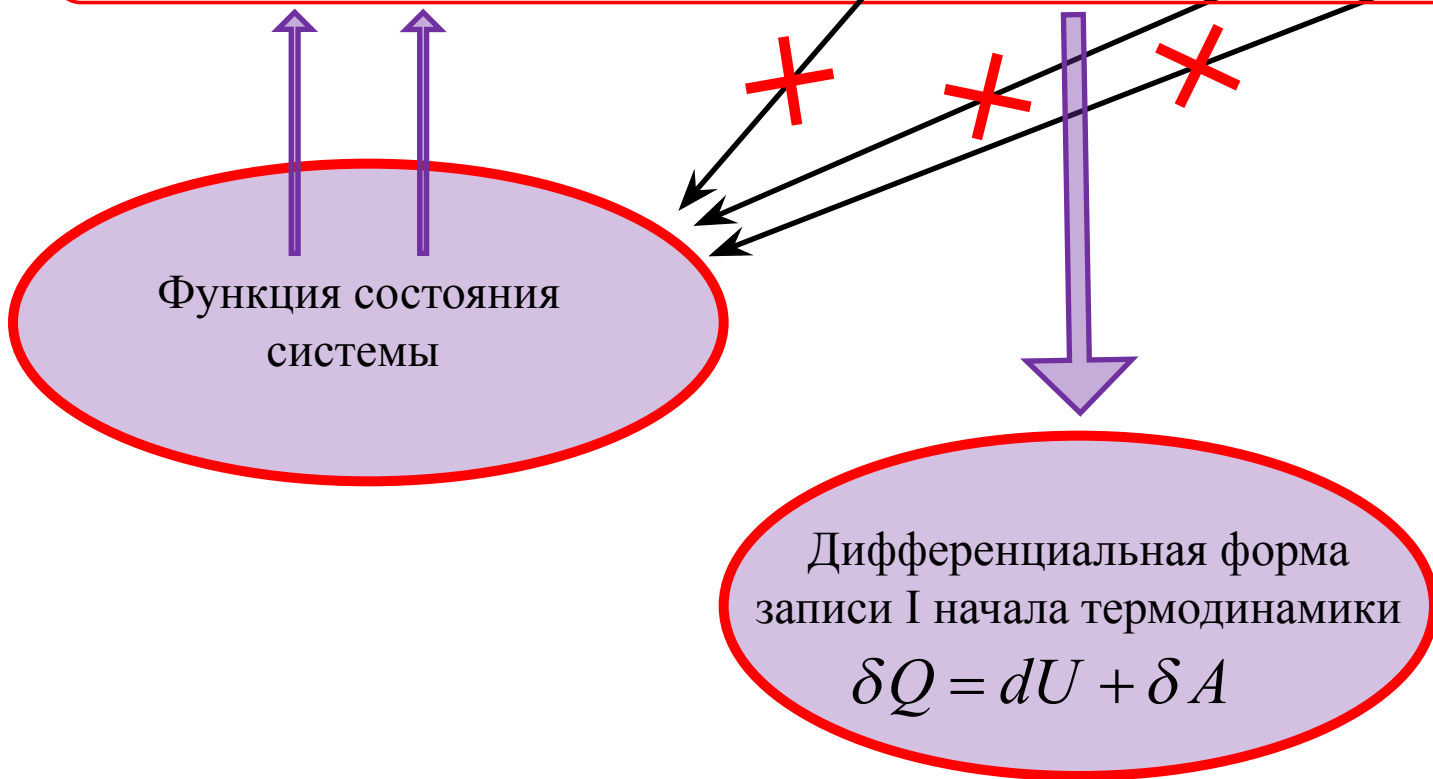


$$Q = \Delta U + A \quad \delta Q = dU + \delta A$$

$$\Delta U = U_2 - U_1 = A' + Q \rightarrow Q = \Delta U + A \quad A' = -A$$

Функция состояния  
системы

Дифференциальная форма  
записи I начала термодинамики  
 $\delta Q = dU + \delta A$



$$U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} RT$$



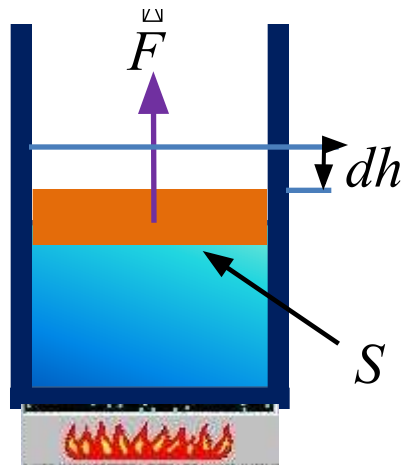
Изменение внутренней  
энергии газа



$$U_2 - U_1 = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R(T_2 - T_1)$$

Изменение состояния газа:

$$\underline{T_1 V_1 p} \Rightarrow \underline{T_2 V_2 p}$$



Газ, заключенный в цилиндрический сосуд, изобарически расширяясь при нагреве, совершает работу по перемещению поршня.

Элементарная работа при расширении газа



$$dA = F \cdot dh = pSdh = pdV$$

Работа газа:



$$A_{12} = \int_{V_1}^{V_2} pdV$$

## 5. Теплоемкость идеального газа. Уравнение Майера.

Теплоёмкость – величина, равная количеству тепла, которое нужно сообщить телу для повышения его температуры на один градус. Зависит от условий нагревания (охлаждения)

$$C_{\text{тела}} = \frac{\delta Q}{dT} \quad \leftarrow \frac{\text{Дж}}{\text{град}}$$

Теплоемкость киломоля вещества

$$\left. \begin{array}{l} C \\ C_V \\ C_p \end{array} \right\} \quad \leftarrow \frac{\text{Дж}}{\text{град} \cdot \text{кмоль}}$$

Теплоемкость киломоля при постоянном объеме

Теплоемкость киломоля при постоянном давлении

Удельная теплоемкость вещества

$$c = \frac{\delta Q}{m dT} \quad \leftarrow \frac{\text{Дж}}{\text{град} \cdot \text{кг}}$$

$$c = \frac{C}{\mu}$$

$$U = \frac{m i}{\mu 2} RT$$

$$\frac{d}{dT} \delta Q = dU + \delta A \Rightarrow \frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT} + p \frac{dV}{dT} = \frac{m i}{\mu 2} R + p \frac{dV}{dT}$$

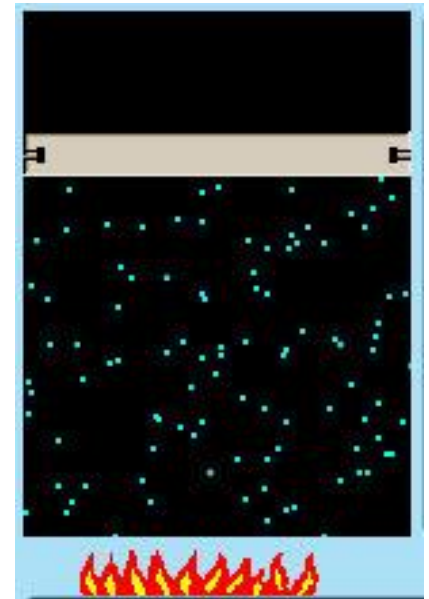
Для 1-го киломоля  $\Rightarrow C_{\text{км}} = \frac{i}{2} R + p \frac{dV_{\text{км}}}{dT}$

Далее – все зависит от процесса....



Изохорический ( $V=const$ ) процесс.

$$C_{\text{км}} = \frac{i}{2}R + p \frac{dV_{\text{км}}}{dT}$$



Теплоемкость киломоля  
идеального газа при  
постоянном объеме:

$$\Rightarrow C_V = \frac{i}{2}R + p \frac{dV_{\text{кл}}}{dT} = \frac{i}{2}R + \underline{0}$$

$$C_V = \frac{dU_{\text{км}}}{dT} = \frac{i}{2}R$$

Изобарический ( $p=const$ ) процесс.

$$C_{км} = \frac{i}{2}R + p \frac{dV_{км}}{dT}$$

$$pV = \frac{m}{\mu}RT \Rightarrow V_{км} = \frac{RT}{p}$$

Теплоемкость киломоля  
идеального газа при  
постоянном давлении:

$$\rightarrow C_p = \frac{\delta Q_p}{dT} = \frac{dU_{км}}{dT} + p \frac{dV_{км}}{dT} = C_V + p \frac{d}{dT} \left( \frac{RT}{p} \right) = C_V + R$$

$$C_p = C_V + R$$

← Уравнение Майера

$$C_p > C_V$$

$$C_p = C_V + R = \frac{i}{2}R + R = \frac{i+2}{2}R$$



$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i} > 1$$

$$C_V = \frac{dU_{\text{км}}}{dT} = \frac{i}{2}R$$

$\gamma$  – отношение  $C_p$  к  $C_V$

$$\frac{3+2}{3} = 1,67$$

$$\frac{5+2}{5} = 1,40$$

Газ	Количество атомов в молекуле	$C_V \cdot 10^{-3}$ дж/град·кмоль		$C_P \cdot 10^{-3}$ дж/град·кмоль		$\gamma$	
		теор.	эксп.	теор.	эксп.	теор.	эксп.
Гелий (He) . . . .	1	12,5	12,5	20,8	20,9	1,67	1,67
Кислород (O <sub>2</sub> ) . .	2	20,8	20,9	29,1	28,9	1,40	1,40
Окись углерода (CO) . . . . .	2	20,8	21,0	29,1	29,3	1,40	1,40
Пары воды (H <sub>2</sub> O)	3	25,0	27,8	33,2	36,2	1,33	1,31

6. Первое начало термодинамики и работа, совершаемая идеальным газом для различных физических процессов.

Изотермический процесс



$$T = const \Rightarrow pV = p_1V_1 = p_2V_2 = const$$

$$Q = \Delta U + A$$



$$T = const \Rightarrow$$

$$\Delta U = 0 \Rightarrow Q = A_{12}$$

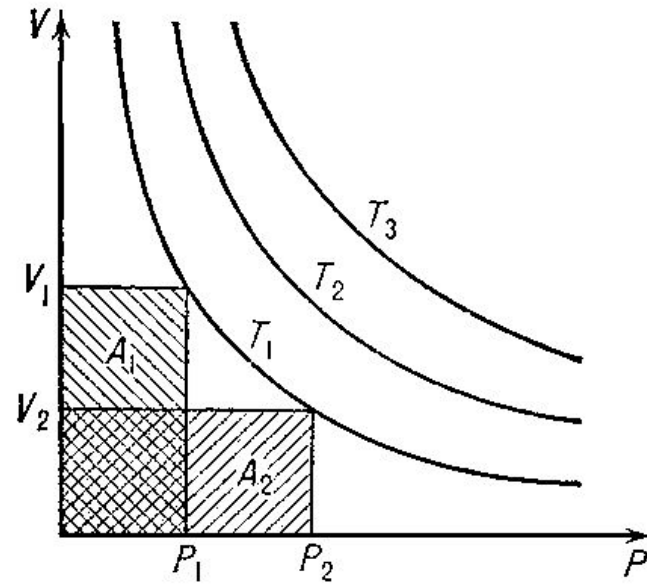
$$= \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV = \frac{m}{\mu} RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$



$$A_{12} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$p = \frac{m RT}{\mu V}$$

## Изотермы



$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \Rightarrow A_1 = A_2$$

Изохорический процесс



$$V = const$$

$$Q = \Delta U + A$$

$$V = const \Rightarrow Q = \Delta U + \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV \Rightarrow Q = \Delta U + 0$$



$$Q = \Delta U; \quad A = 0$$

Изобарический процесс



$$p = const$$

$$Q = \Delta U + A$$

$$p = const \Rightarrow Q = \Delta U + \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV = \Delta U + p(V_2 - V_1)$$



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

## 7. Адиабатический процесс. Уравнение Пуассона.

Адиабатическим называется процесс, протекающий без теплообмена с внешней средой (быстро протекающий процесс).



$$\delta Q = 0$$

$$\delta Q = dU + \delta A$$



$$TV^{\gamma-1} = const$$



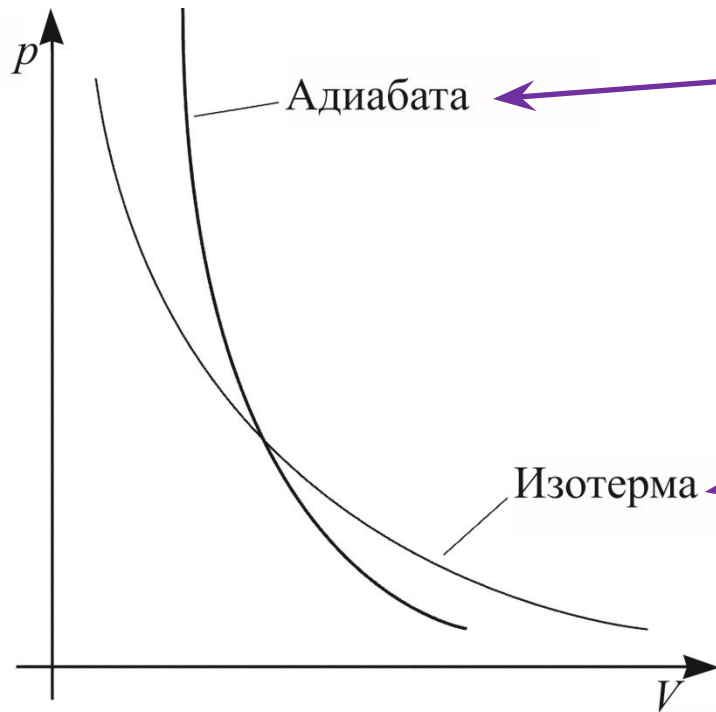
$$T = \frac{\mu}{m} \frac{pV}{R}$$



$$pV^{\gamma} = const$$

Уравнение  
Пуассона

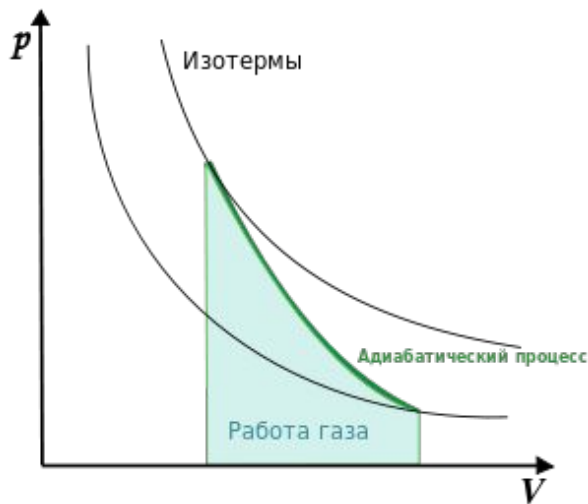




$$pV^\gamma = p_1V_1^\gamma = p_2V_2^\gamma = const$$

$$pV = p_1V_1 = p_2V_2 = const$$

$$A_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$



Адиабатический процесс



$$Q = 0$$

$$Q = \Delta U + A$$

$$Q = 0 \Rightarrow A_{12} = -\Delta U = -(U_2 - U_1) = -\frac{m i}{\mu 2} R(T_2 - T_1)$$

