

## ЗАКОНЫ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

**Идеальным** называется газ, в котором межмолекулярное взаимодействие отсутствует.

1. **Закон Авогадро:** при одинаковых давлениях и одинаковых температурах в равных объемах различных идеальных газов содержится одинаковое число молекул, т.е. при одинаковых давлениях и одинаковых температурах грамм-молекулы различных идеальных газов занимают одинаковые объемы. Так, при нормальных условиях ( $T = 0^\circ \text{C}$  и  $p = 101\,325 \text{ Па} = 1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.}$ ) грамм-молекулы (1 моль) всех идеальных газов занимают объем  $= 22,414 \text{ дм}^3$ . Число молекул, находящихся в 1 моле идеального газа при нормальных условиях, называется числом *Авогадро*; оно равно  $N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ .
2. Уравнение состояния **идеального газа для 1 моля имеет вид:  $pV = RT$ ,** где  $p$ ,  $V$  и  $T$  – давление, объем и абсолютная температура 1 моля газа, а  $R = 8,31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$  – *универсальная газовая постоянная*. Для произвольной массы  $m$  газа, с числом молей  $\nu$ , уравнение состояния – *уравнение Менделеева-Клапейрона*:

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad \text{или} \quad pV = \nu RT .$$

Из ур-я Менделеева-Клапейрона следует:

а. закон пропорциональности давления температуре:  $p = n_0 k T$ ,

$$pV = nkT ,$$

б. и другая форма ур-я состояния идеального газа:

$k = R/N_A = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  – постоянная Больцмана,  $n_0$  – число молекул в единице объема газа,

$n_0 V = n$  – полное число молекул газа.

3. **Закон Дальтона:** давление смеси газов равно сумме их парциальных давлений  $p_i$ :

$$p = \sum_i p_i.$$

4. **Основное уравнение кинетической теории газов:**

$$p = \frac{1}{3} n_0 m_0 v^2,$$

$m_0$  – масса и  $v$  – среднеквадратичная скорость одной молекулы ( $v = \sqrt{\mathbf{v}^2} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$ ).

5. **Закон Больцмана** о равномерном распределении энергии молекулы по степеням свободы теплового движения молекул:

$$p = n_0 kT = \frac{1}{3} n_0 m_0 v^2, \quad kT = \frac{1}{3} m_0 v^2, \quad m_0 v^2 = 3kT, \quad \boxed{\frac{m_0 v^2}{2} = \frac{3}{2} kT}$$

а). Кинетическая энергия хаотического (теплового) движения молекул пропорциональна абсолютной температуре.

б). На каждую степень свободы молекулы приходится средняя энергия

$$W_{0x} = \frac{m_0 v_x^2}{2} = \frac{1}{2} kT,$$

6. **Первое начало (закон) термодинамики.** Количество теплоты  $\Delta Q$ , сообщенное системе, расходуется на изменение ее внутренней энергии  $\Delta U$  и на совершение системой работы против внешних сил  $\Delta A$ :

$$\boxed{\Delta Q = \Delta U + \Delta A}, \quad \boxed{\Delta Q = \Delta U + p\Delta V},$$

**7. Внутренней энергией**  $U$  называется полная собственная энергия системы за исключением ее потенциальной и кинетической энергии как целое:

$$U = W - (W_{0\Pi} + W_{0K})$$

Она включает в себя энергию хаотического (теплового) движения всех микрочастиц системы (молекул, атомов, ионов и др.), энергию взаимодействия этих частиц, энергию электронных оболочек атомов и ионов, внутриядерную энергию и т. д.

Внутр. энергия идеального газа – функция абсолютной температуры  $T$  и массы газа  $m$ :

$$U = c_v \cdot m \cdot T,$$

где  $c_v$  – удельная теплоемкость газа в изохорном процессе, когда  $A = 0$  и  $\Delta Q = \Delta U$ .

Для одного моля  $m = M$ ,  $c_v \cdot m = c_v \cdot M = C_v$ , и  $U = C_v \cdot T$ .

**Молярная теплоемкость при постоянном объеме:**

$$C_v = \left( \frac{dQ}{dT} \right)_v = \left( \frac{dU}{dT} \right)_v = \frac{dU}{dT}$$

**Молярная теплоемкость при постоянном давлении:**

$$C_p = \left( \frac{dQ}{dT} \right)_p = \left( \frac{dU}{dT} \right)_p + \left( \frac{dA}{dT} \right)_p = C_v + p \left( \frac{dV}{dT} \right)_p = C_v + R, \Rightarrow C_p > C_v$$

Отсюда следует, что

а)  $R$  численно равна работе при нагревании 1 моля газа на 1 Кельвин в изобарном процессе,

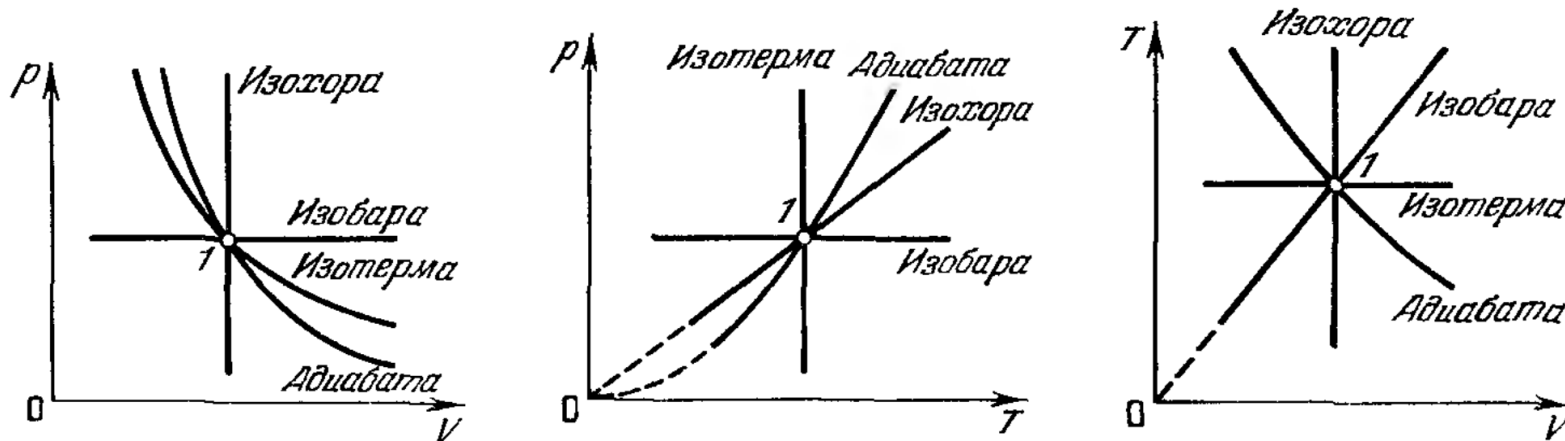
б) связь между теплоемкостями  $C_p$  и  $C_v$ :  $\gamma = C_p / C_v = (C_v + R)/C_v$ ,  $C_v = R/(\gamma - 1)$  и

с) расчетная формула внутренней энергии:  $U = C_v T = RT/(\gamma - 1)$  или  $U = pV/(\gamma - 1)$ .

## 8. Термодинамические процессы. Обратимые процессы. Работа идеального газа.

Изопроцессы:    изобарный            $p = \text{Const}$ ,  $VT^{-1} = \text{Const}$ ,  $A = p(V_2 - V_1)$   
                   изохорный            $V = \text{Const}$ ,  $pT^{-1} = \text{Const}$ ,  $A = 0$   
                   изотермический  $T = \text{Const}$ ,  $pV = \text{Const}$ ,  $A = RT \ln(V_2/V_1)$

Адиабатический (адиабатный)  $\Delta Q = 0$  (отсутствует теплообмен с внешней средой)  
 $pV^\gamma = \text{Const}$ ,  $pT^{\gamma/(1-\gamma)} = \text{Const}$  и  $TV^{(\gamma-1)} = \text{Const}$ ;  $A = -\Delta U = U_1 - U_2$



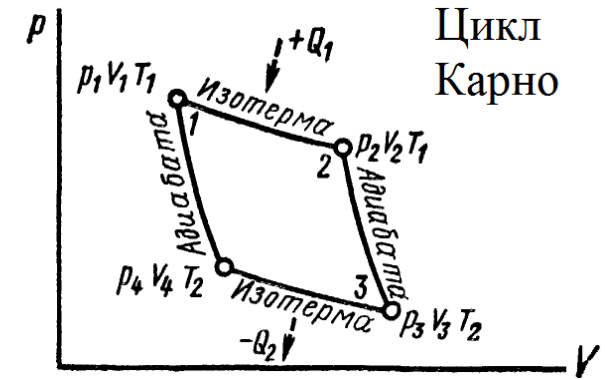
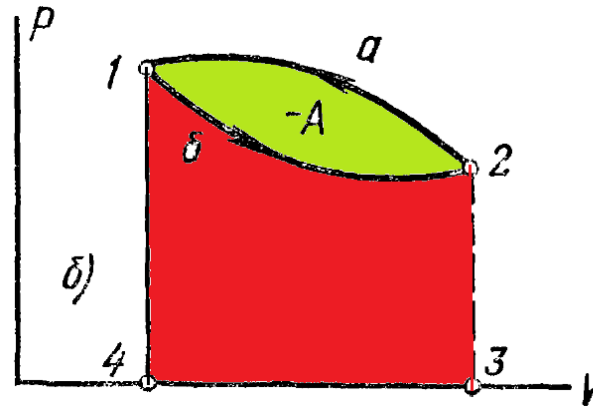
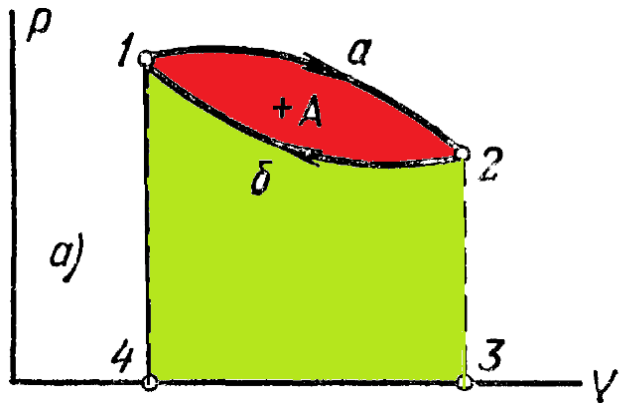
## 9. Круговые процессы. Цикл Карно. Второе начало термодинамики.

Круговым процессом (или циклом) называется такой процесс, при котором система после ряда изменений возвращается в исходное состояние. На графике цикл изображается замкнутой кривой. Работа, совершаемая при круговом процессе, численно равна площади, охватываемой кривой. После совершения цикла система возвращается в прежнее состояние. Поэтому всякая функция состояния, в частности внутренняя энергия, имеет в начале и в конце цикла одинаковое значение.

1 нач. т.-д.  $\rightarrow \Delta Q = \Delta U + A; \Delta U = U_2 - U_1 = 0, U_2 = U_1;$

а) Прямой цикл  $1a2\delta 1$ :  $\Delta Q = A, \eta = A/Q_1 = (Q_1 - Q_2)/Q_1 \leq 1 \rightarrow$  КПД ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ

б) Обратный цикл  $1\delta 2a 1$ :  $\Delta Q = -A, \eta_{\text{хол}} = Q_2/A = Q_2/(Q_1 - Q_2) \geq 1 \rightarrow$  Холодильный коэфф.



КПД тепловой машины в цикле Карно:  $\eta = A/Q_1 = (Q_1 - Q_2)/Q_1 = (T_1 - T_2)/T_1; (T_1 > T_2).$

Второй закон термодинамики указывает на направление естественных энергетических превращений и тем самым выражает необратимость природных процессов.

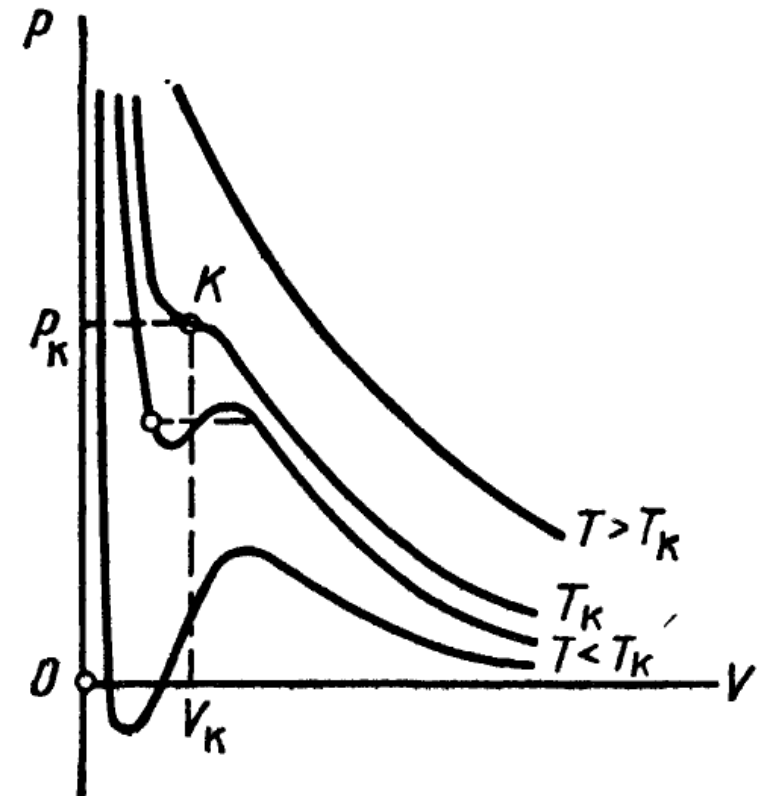
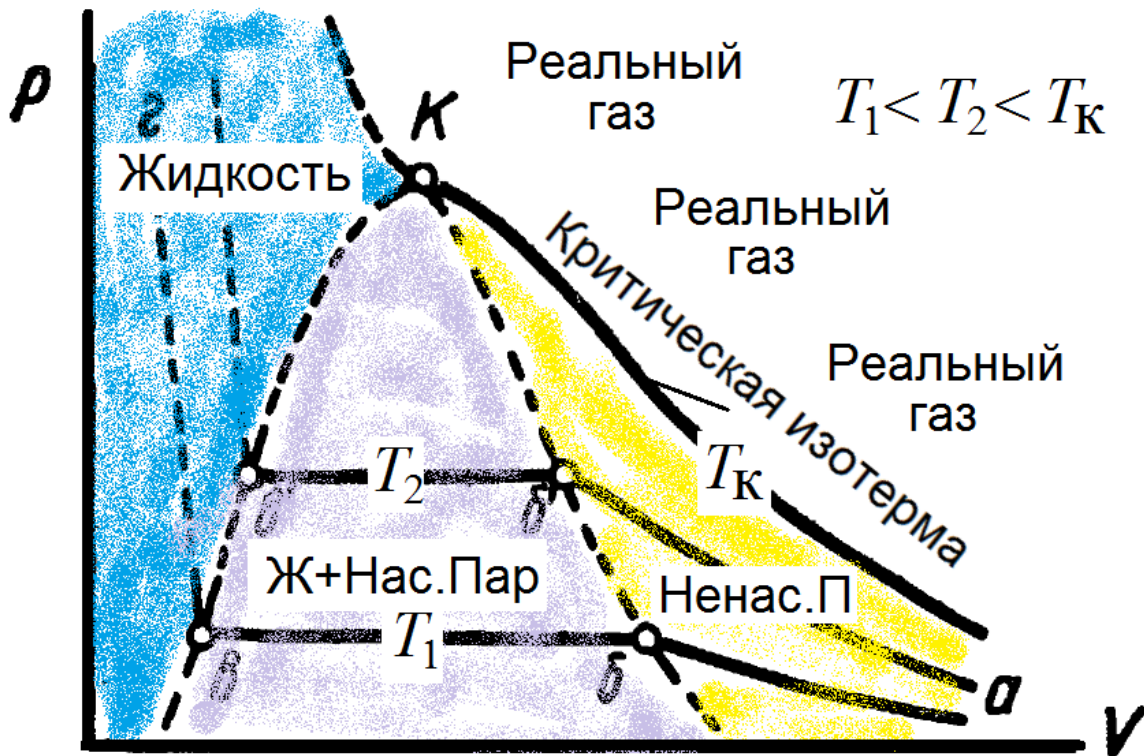
Р. Клаузиус: невозможно перевести тепло от более холодной системы к более горячей при отсутствии одновременных изменений в обеих системах или окружающих телах.

У. Кельвин: невозможно осуществить такой периодический процесс, единственным результатом которого было бы получение работы за счет теплоты, взятой от одного источника.

1 з-н. т.-д. (з-н сохранения энергии) можно высказать в форме утверждения: невозможно построить вечный двигатель первого рода, то формулировка второго закона позволяет выразить этот закон в виде утверждения: невозможно построить вечный двигатель второго рода, т. е. двигатель, совершающий работу за счет охлаждения какого-либо одного тела.

# Реальные газы. Изотермы паров. Уравнение Ван-дер-Ваальса

$$pV = RT \longrightarrow \left( p + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT$$



$$T_K = \frac{8a}{27bR}; \quad V_K = 3b; \quad p_K = \frac{a}{27b^2}.$$

## Фазовое равновесие. Фазовые переходы. Тройная точка.

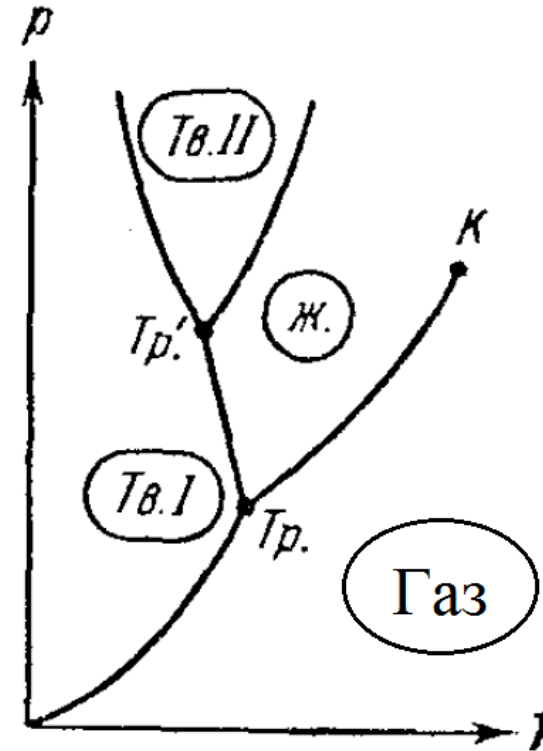
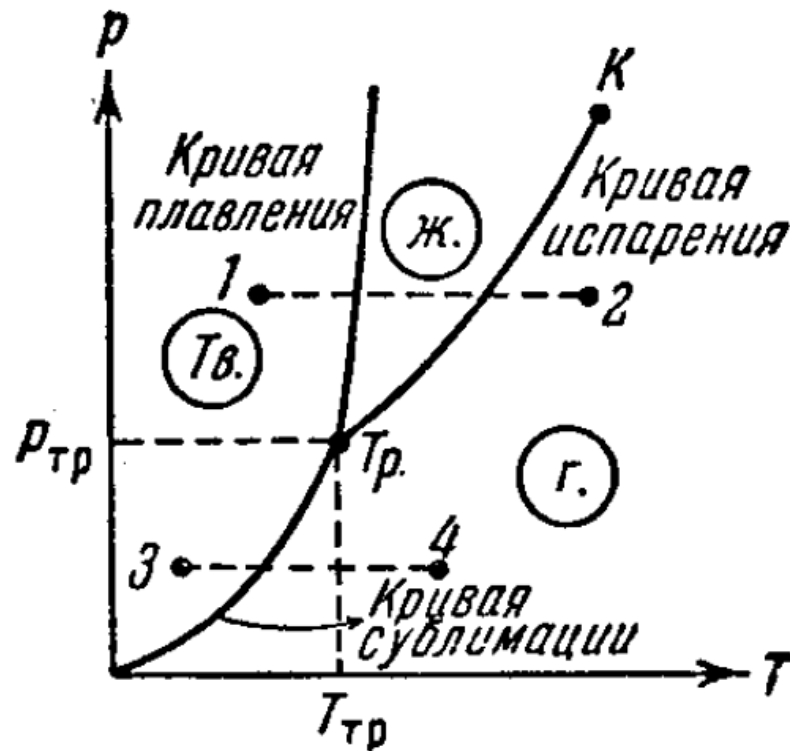
Твердое тело → Плавление → Жидкость → Кипение → Насыщ. пар

Твердое тело → Плавление → Жидкость → Испарение → Ненас. пар

Ненас. пар → Конденсация → Жидкость → Кристаллизация → Твердое тело

Твердое тело → Возгонка (Сублимация) → Газ

Газ → Десублимация → Твердое тело



Фазовый переход 1 рода → если есть скрытая теплота перехода. Теплоемкость меняется скачком.

Иначе – это переход 2 рода. Все агрегатные превращения – это фаз. пер. 1 рода.