



Лекція № 11

Термодинаміка

ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ



?Температура
полум'я

?Температура
сірника

?Температура
магми

Зміст:

- **Теплота, робота та внутрішня енергія термодинамічної системи.**
 -
- Повна і питома теплоємності.
- Перший закон термодинаміки.
- Застосування першого закону термодинаміка до ізопроцесів.
- Формула Маєра.
- Адіабатичний процес. Формула Пуасона.
- Політропний процес, показник політропи.
- Значення показника політропи для різних ізопроцесів.

Внутрішня енергія

- **Внутрішньою енергією** тіла називають енергію цього тіла без урахування кінетичної енергії тіла, як цілого і потенціальної енергії тіла у зовнішньому полі сил. Таким чином, внутрішня енергія - це кінетична енергія хаотичного руху молекул, потенціальна енергія їх взаємодії, а також, енергія атомного ядра і т.п.
- **Внутрішня енергія** є функцією стану системи. Це означає, що кожного разу, коли система опиняється в певному стані, її внутрішня енергія має таке саме значення внутрішньої енергії незалежно від попередньої історії системи. Таким чином, зміна внутрішньої енергії при переході системи з одного стану в інший завжди дорівнює різниці значень внутрішньої енергії в цих станах, незалежно від шляху, яким виконувався перехід.
- **Внутрішня енергія** - це адитивна величина, тобто внутрішня енергія системи дорівнює сумі енергій частинок, з яких складається тіло.

ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ

Внутрішня енергія ідеального газу є сумою кінетичних енергій всіх його молекул (або атомів)

$$U = N \cdot \langle \varepsilon \rangle_{\text{кін}}$$

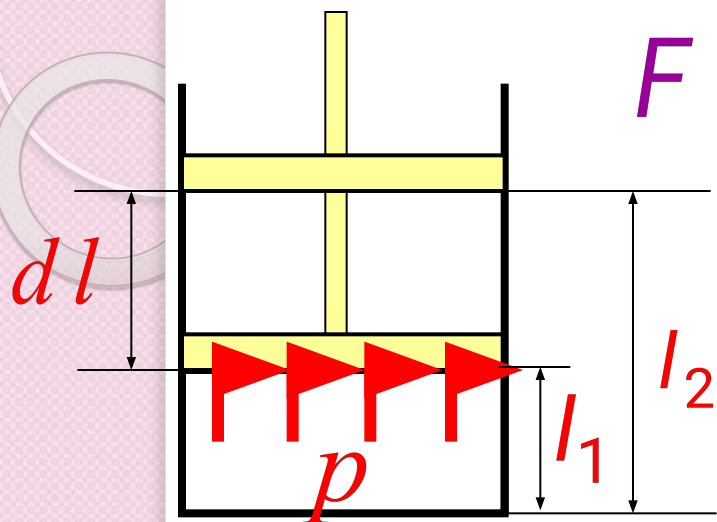
$$U = N \frac{i}{2} kT$$

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

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

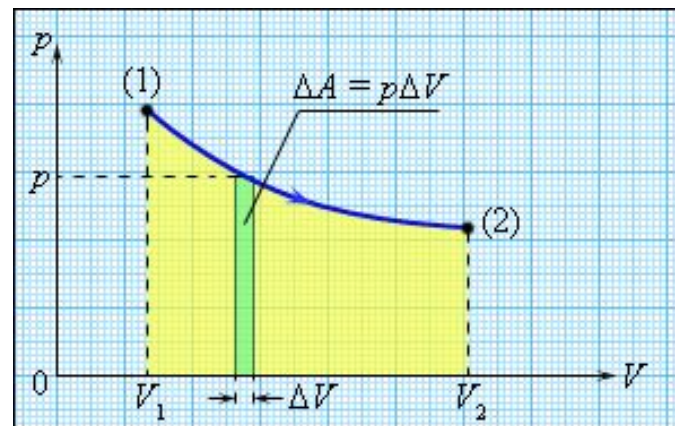
$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}} \quad \text{■ молярна газова стала}$$

МЕХАНІЧНА РОБОТА



$$F = pS \quad dA = Fdl = pSdl = pdV$$

$$dA = pdV$$



Робота у загальному випадку:



$$A = \int_{V_1}^{V_2} pdV$$

Робота ідеального газу в ізопроцесах

ІЗОБАРНИЙ
ПРОЦЕС

$$p = \text{const}$$

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1)$$

ІЗОТЕРМІЧНИЙ
ПРОЦЕС

$$T = \text{const}$$

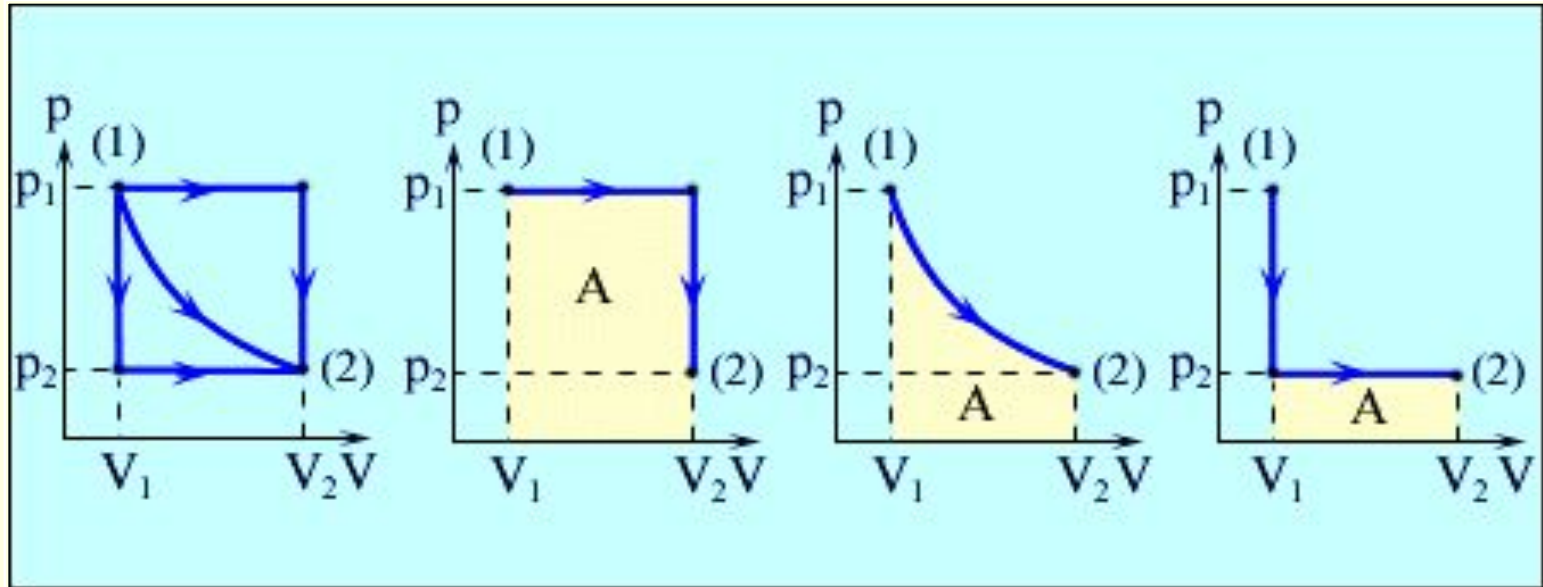
$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \frac{m}{M} RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

ІЗОХОРНИЙ
ПРОЦЕС

$$V = \text{const}$$

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = 0$$

Робота ідеального газу в ізопроцесах



З рисунку видно, що різні способи переходу від стану 1 до стану 2, характеризуються різною роботою, здійсненою системою. Отже, вони потребують і різних затрат тепла, бо зміна внутрішньої енергії залишається незмінною.

КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ

Це енергія, яка передається тілу в процесі теплопередачі ззовні. **Теплопередача** – це такий процес, при якому внутрішня енергія одних тіл зменшується, а інших – відповідно збільшується, причому механічна енергія тіл не змінюється і робота не виконується.

Кількість теплоти, яку потрібно надати будь-якому тілу, щоб підвищити його температуру на **1** К, називається **теплоємністю** цього тіла.

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad [C] = \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ

Питома теплоємність - це фізична величина, що показує, яку кількість теплоти потрібно затратити, щоб нагріти одиницю маси речовини на один Кельвін:

$$c = \frac{dQ}{m \cdot dT} \quad [c] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Кількість теплоти, яку потрібно надати одному молю речовини, щоб підвищити його температуру на один Кельвін називається **молярною теплоємністю**

$$C_M = \frac{dQ}{\nu \cdot dT} \quad [C_M] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

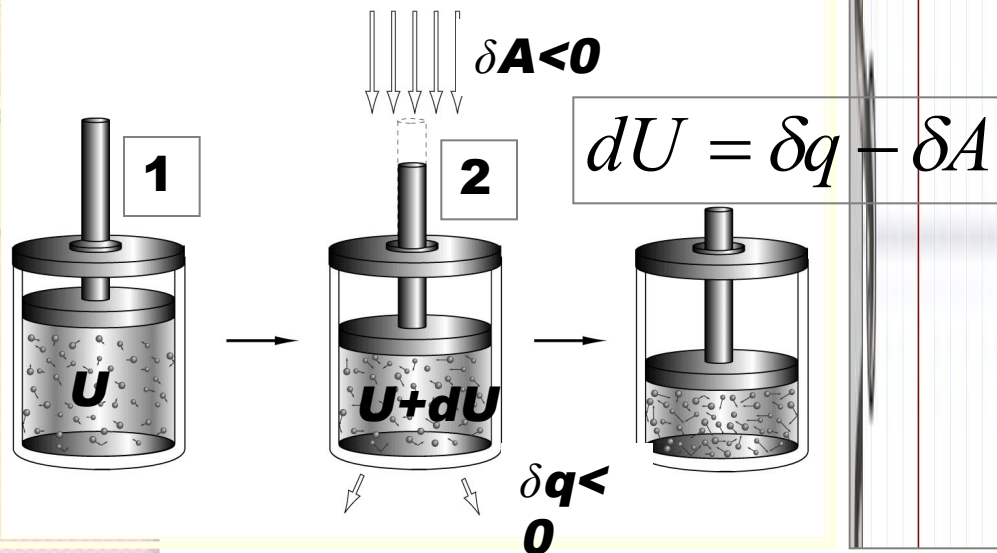
ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

- **Перший закон термодинаміки** є законом збереження енергії, який сформульований у вигляді, зручному для розгляду теплових процесів: **кількість теплоти, надана системі, йде на зміну внутрішньої енергії системи і здійснення системою роботи:**

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad dQ = \frac{i}{2} \nu R dT + p dV$$

де dU - повний диференціал, δQ та δA – варіації. Різниця між варіацією та повним диференціалом полягає у тому, що dU характеризує внутрішній стан системи і не залежить від шляху системи, а δQ та δA залежать від шляху, тобто послідовності станів системи.

Перший закон термодинаміки



Під час переходу системи з термодинамічного стану 1 до термодинамічного стану 2 різниця отриманого від оточуючого середовища тепла $\delta q > 0$ та здійсненої системою роботи $\delta A > 0$, дорівнює зміні внутрішньої енергії системи dU . Ця зміна залежить лише від початкового стану 1 та кінцевого стану 2 і не залежить від способу, яким система здійснювала перехід

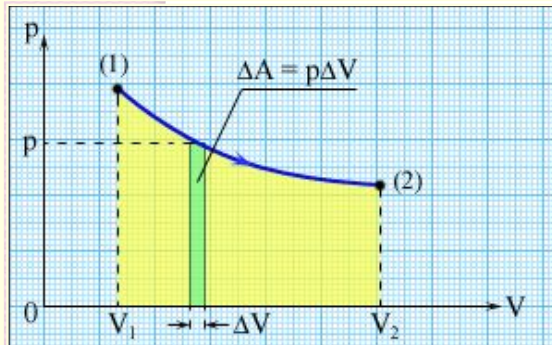
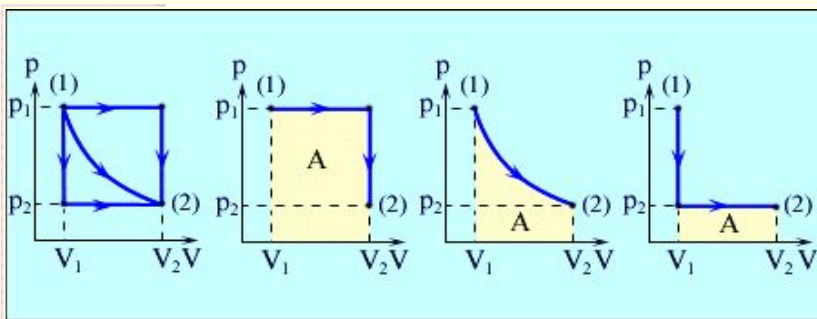
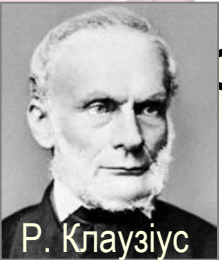


Рисунок ліворуч показує, що робота, яку здійснює термодинамічна система під час переходу від стану 1 до стану 2, чисельно дорівнює інтегралу $A_{12} = \int p dV$, а геометрично – площі під кривою процесу в координатах тиск-об'єм (P - V).



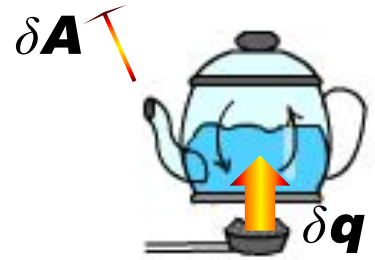
З рисунку видно, що різні способи переходу від стану 1 до стану 2, характеризуються різною роботою, здійсненою системою. Отже, вони потребують і різних затрат тепла, бо зміна внутрішньої енергії залишається незмінною.



Р. Клаузіус

Перший закон термодинаміки-2

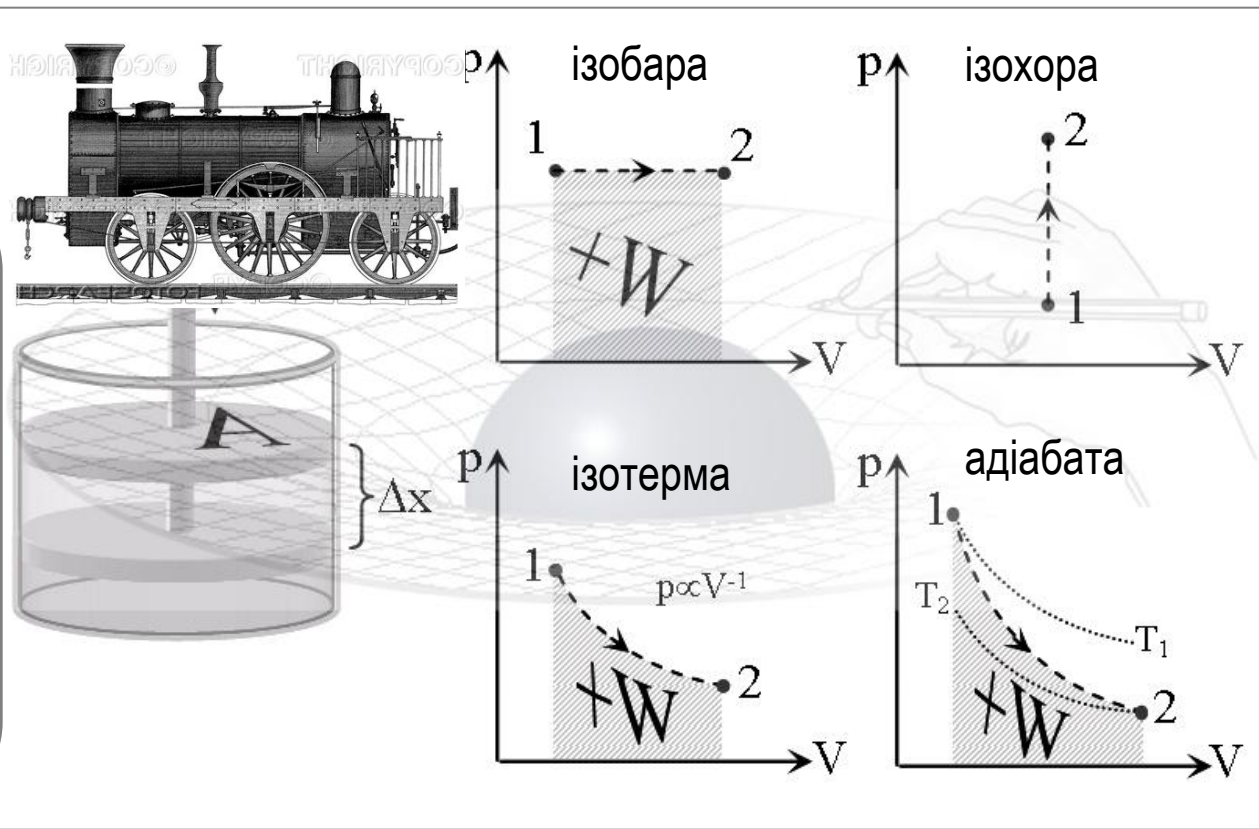
$$\delta q = dU + \delta A$$



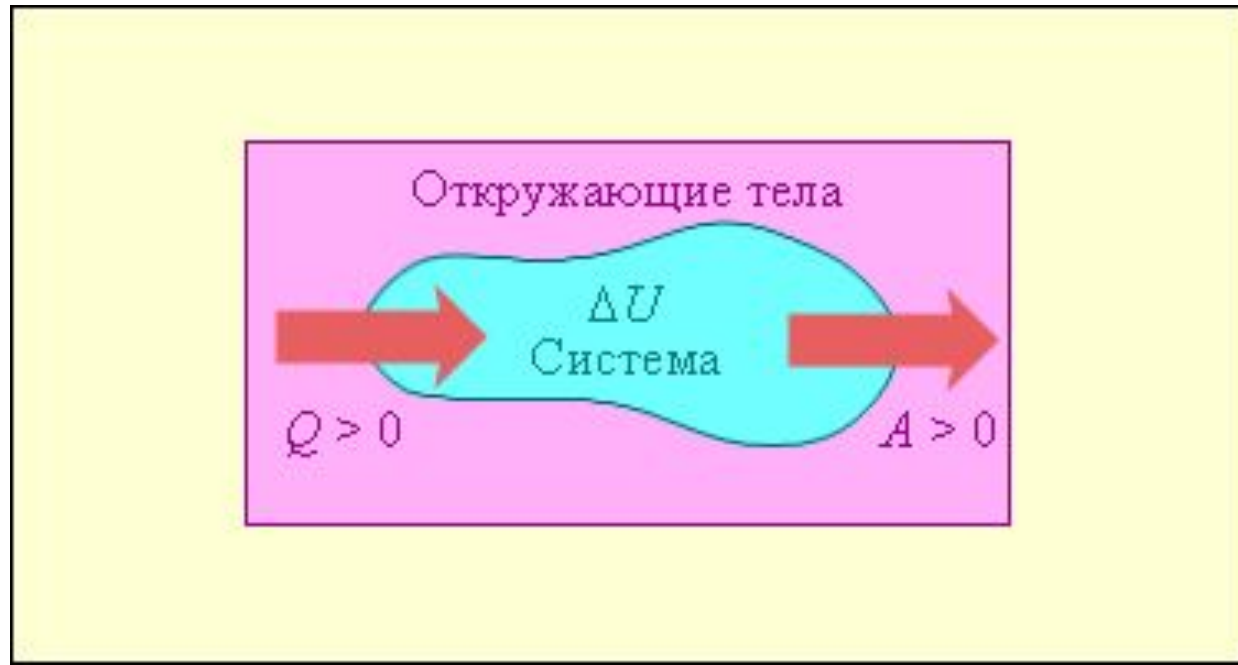
Heat from boiler is transferred to the circulating water

Технічна термодинаміка дещо інакше трактує перший закон: теплота, підведена до системи від зовнішнього середовища (δq), витрачається на зміну внутрішньої енергії (dU) та роботу здійснену системою над оточуючим середовищем (δA). Неможливо отримати роботи більше, ніж підведено тепла.

Рисунок показує графіки та роботу найбільш відомих термодинамічних процесів: ізобаричного ($p_1=p_2$), ізохоричного ($V_1=V_2$), ізотермічного ($T_1=T_2$) та адіабатичного ($S_1=S_2$). Зверніть увагу, що робота ізохоричного процесу є нульовою



ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ



Інше формулювання: неможливо створення вічного двигуна першого роду, тобто двигуна в якому вся енергія перетворювалася б на роботу.

Застосування I закону термодинаміки до ізопроцесів

$$dQ = \frac{i}{2} \nu R dT + p dV$$

1. ІЗОБАРНИЙ ПРОЦЕС:

$$Q = \frac{i}{2} \nu R \Delta T + p \Delta V = \frac{i+2}{2} \nu R \Delta T = \frac{i+2}{2} p \Delta V$$

$$C_p = \frac{dQ}{\nu \cdot dT} = \frac{i+2}{2} R$$

2. ІЗОТЕРМІЧНИЙ ПРОЦЕС:

$$dT = 0 \Rightarrow dU = 0 \Rightarrow$$
$$dQ = dA = pdV \quad C_T = \infty \quad Q = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

3. ІЗОХОРНИЙ ПРОЦЕС:

$$dV = 0 \Rightarrow dA = 0 \Rightarrow$$
$$dQ = dU = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R dT \quad Q = \Delta U = \frac{i}{2} \nu R \Delta T$$
$$C_V = \frac{i}{2} R$$

Рівняння Маєра:

$$C_p - C_V = R$$

Адіабатним називається процес, який протікає без теплообміну із зовнішнім середовищем $dQ=0$

Рівняння Маєра: $C_p - C_V = R$ $\frac{C_p}{C_V} - 1 = \frac{R}{C_V}$

$\gamma = \frac{C_p}{C_V}$ - показник Пуассона $\Rightarrow \gamma - 1 = \frac{R}{C_V}$

Перший закон термодинаміки:

$$dQ = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R dT + p dV \Rightarrow C_V \frac{m}{M} dT + p dV = 0$$

$$p = \frac{m}{M} R T \frac{1}{V} \quad \text{рівняння Менделєєва – Клапейрона}$$

$$\frac{m}{M} C_V dT + \frac{m}{M} \frac{RT}{V} dV = 0 \Rightarrow C_V dT + \frac{RT}{V} dV = 0 : TC_V$$

$$\frac{dT}{T} + \frac{R}{C_V} \frac{dV}{V} = 0 \quad \text{або} \quad d\left(\ln T + \frac{R}{C_V} \ln V\right) = 0$$

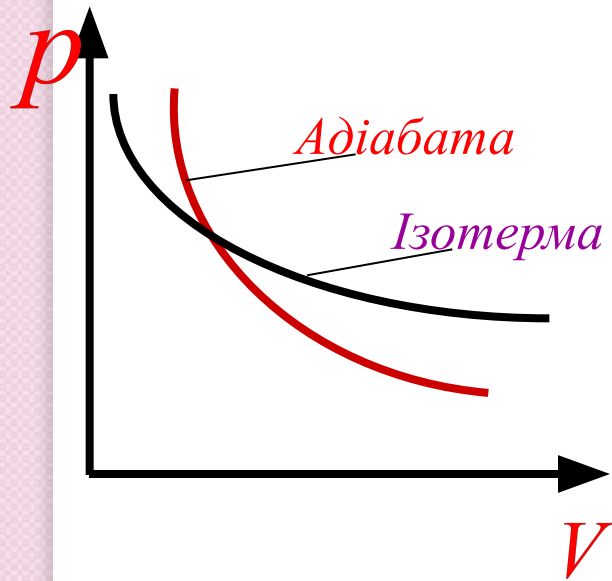
$$\ln T + \frac{R}{C_V} \ln V = \text{const} \quad \ln T + (\gamma - 1) \ln V = \text{const},$$

$$\ln T + \ln V^{\gamma-1} = \text{const} \Rightarrow \ln(T \cdot V^{\gamma-1}) = \text{const} \Rightarrow T \cdot V^{\gamma-1} = \text{const}$$

$T \cdot V^{\gamma-1} = \text{const}$ - рівняння адіабати

З рівняння Менделєєва Клапейрона: $T = \frac{M}{m} \frac{pV}{R}$

$$\frac{M}{m} \frac{pV}{R} \cdot V^{\gamma-1} = \text{const} \Rightarrow pV \cdot V^{\gamma-1} = \frac{mR\text{const}}{M} \Rightarrow pV^\gamma = \text{const}$$



Рівняння адіабати:

$$T \cdot V^{\gamma-1} = \text{const}$$

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

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i} \quad \text{показник адіабати}$$

Для одноатомного газу:

$$\gamma = \frac{5}{3} = 1,67$$

Для двоатомного газу:

$$\gamma = \frac{7}{5} = 1,4$$

Для трьохатомного газу:

$$\gamma = \frac{8}{6} = 1,33$$

ПОЛІТРОПНІ ПРОЦЕСИ

Політропними називають процеси, в яких теплоємність тіла залишається сталою $C = const$

Запишемо рівняння I закону термодинаміки для одного моля газу:

$$\nu = \frac{m}{M} = 1 \quad \text{та врахуємо, що} \quad dQ = CdT$$

$$CdT = C_V dT + pdV$$

Рівняння Менделєєва – Клапейрона для одного моля має вигляд :

$$pV = RT$$

Продиференціюємо це рівняння: $pdV + Vdp = RdT$

$$\frac{pdV + Vdp}{R} = dT$$

$$C \frac{pdV + Vdp}{R} = C_V \frac{pdV + Vdp}{R} + pdV \Rightarrow C(pdV + Vdp) = C_V(pdV + Vdp) + RpdV$$

$$(C - C_V - R)pdV + (C - C_V)Vdp = 0$$

Виконаємо заміну: $C_p = C_V + R$, та розділимо рівняння на: pV

$$(C - C_p) \frac{dV}{V} + (C - C_V) \frac{dp}{p} = 0 \quad (C - C_p) \ln V + (C - C_V) \ln p = const$$

Розділимо це співвідношення на: $(C - C_V)$ Це можливо за умови: $C \neq C_V$

$$\frac{C - C_p}{C - C_V} \ln V + \ln p = const \Rightarrow \ln pV^n = const$$

$$n = \frac{C - C_p}{C - C_V} \quad \text{- показник політропи}$$

$pV^n = const$ - рівняння політропного процесу

Усі ізопроцеси та адіабатний процес – це політропні процеси з різними показниками політропи.

Для ізобарного процесу	$C - C_p \Rightarrow n = 0$
Для ізотермічного процесу	$n = 1$
Для ізохорного процесу	$C = C_V \Rightarrow n = \infty$
Для адіабатного процесу	$n = \gamma$

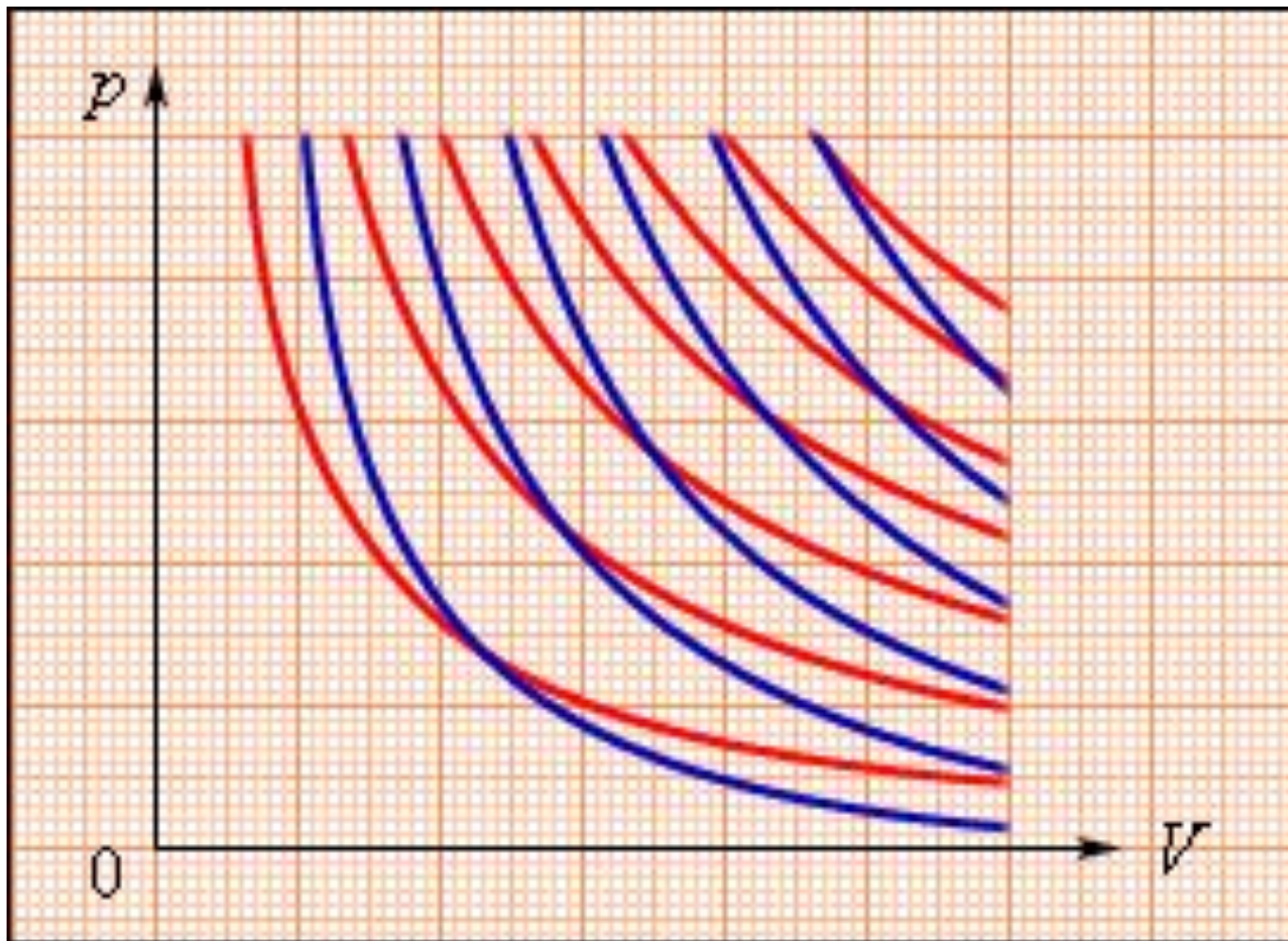
Теплоємність ідеального газу для політропного процесу

$$C = \frac{nC_V - C_p}{n - 1}$$

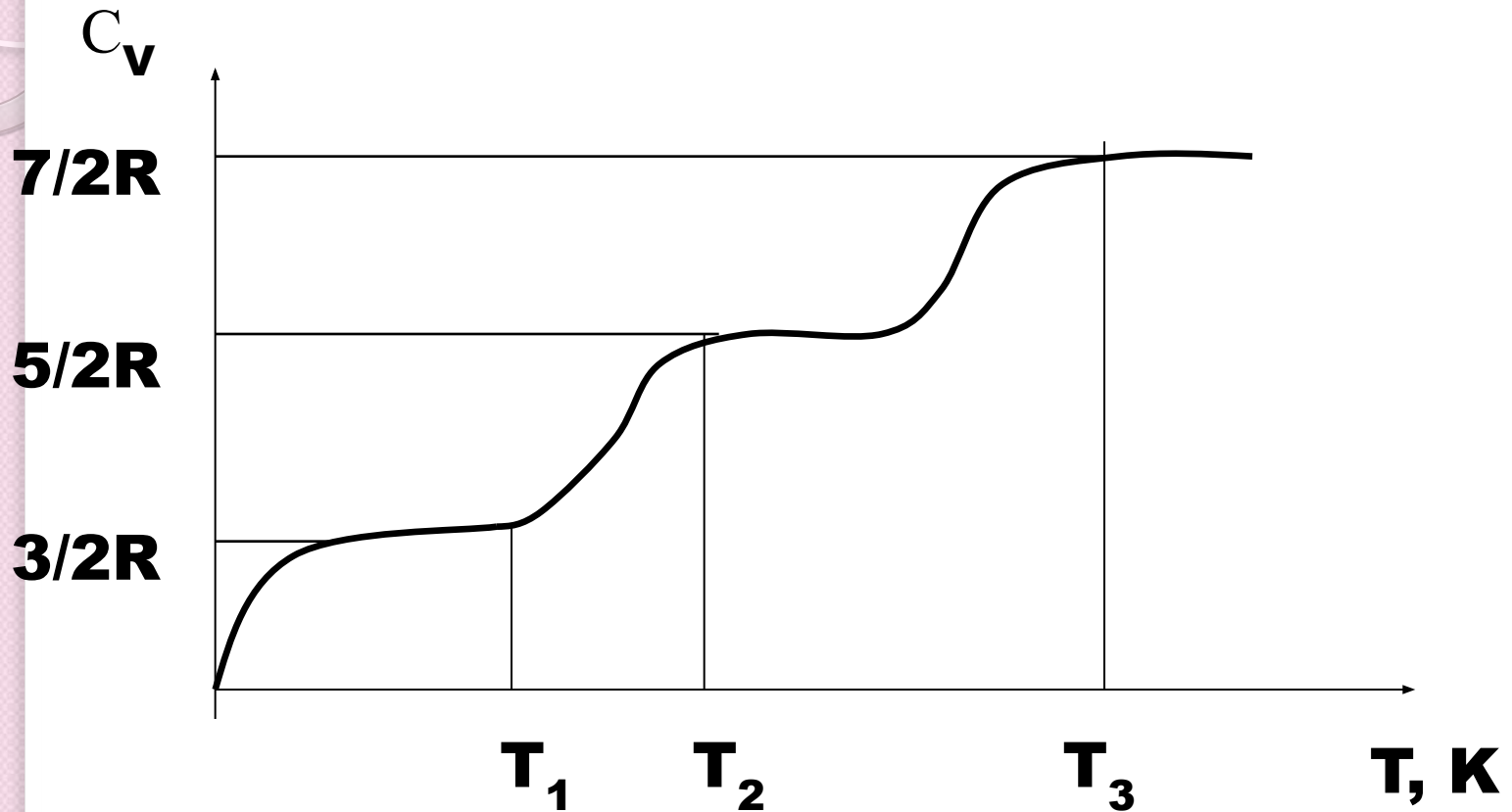
Робота при політропному процесі для:

$$n \neq 1$$

$$A = \frac{p_1 V_1}{n - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right]$$



КЛАСИЧНА ТЕОРІЯ ТЕПЛОЄМНОСТІ



Тест

1. Навести приклади того, як можна отримати опік долонь від тіл температура яких є нижчою.
2. Де варто зберігати молоко для ефективного утворення вершків.
3. Напрямок дії гравітаційної сили збігається з напрямком сили тяжіння?