

ТЕМА 21. ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

- **Тепловий рух** — хаотичний рух частинок, з яких складається тіло.
- **Внутрішня енергія тіла U** — це енергія руху і взаємодії частинок тіла (сума кінетичних та потенціальних енергій усіх молекул чи атомів). Одиницею вимірювання внутрішньої енергії в СІ є 1 Дж.

Внутрішня енергія ідеального газу — це сума кінетичних енергій частинок газу (потенціальною енергією взаємодії частинок можна знехтувати). Внутрішню енергію одноатомного ідеального газу обчислюють за формулою $U = \frac{3}{2} \nu RT = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} RT = \frac{3}{2} pV$, де ν — кількість речовини, m — маса газу, M — молярна маса газу, p —

тиск газу, T — абсолютна температура газу, V — об'єм газу, $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ — універсальна газова стала.

Зміна внутрішньої енергії одноатомного ідеального газу дорівнює $\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} R \Delta T$.

- **Способи зміни внутрішньої енергії** — виконання роботи та теплообмін.
- **Теплообмін** (теплопередача) — це процес передачі енергії від більш нагрітого до менш нагрітого тіла (частин тіла). Види теплообміну: теплопровідність, конвекція, випромінювання.
- **Кількість теплоти Q** — це скалярна величина, що чисельно дорівнює енергії, яку отримує чи віддає тіло під час теплообміну.

Одиницею вимірювання кількості теплоти у СІ є 1 Дж. Позасистемною одиницею вимірювання кількості теплоти є калорія: 1 кал = 4,19 Дж.

При нагріванні чи охолодженні кількість теплоти обчислюють за формулою $Q = cm\Delta T$, де c — питома теплоємність речовини, чисельно дорівнює кількості теплоти, яку потрібно надати 1 кг речовини, щоб нагріти його на 1 К. Питома теплоємність залежить від роду речовини, агрегатного стану та для газів — від способу нагрівання (ізобарно чи ізохорно) і міститься у таблицях. Одиницею вимірювання питомої теплоємності в СІ є $1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

- **Робота газу в термодинаміці.**

— При ізобарному процесі в ідеальному газі ($p = \text{const}$): $A = p\Delta V = \nu R \Delta T = \frac{m}{M} R \Delta T$.

— Під час ізохорного процесу ($V = \text{const}$) газ не виконує роботи: $A = 0$.

— При ізотермічному процесі ($T = \text{const}$) $A = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$.

— Під час довільного процесу в ідеальному газі робота чисельно дорівнює площі фігури, обмеженої графіком процесу в координатах pV , прямими $V = V_1$, $V = V_2$ та віссю $p = 0$ (див. рис.). Якщо об'єм газу під час процесу зростає, то робота газу додатна, при зменшенні об'єму — від'ємна.

— Під час замкнутого циклу робота газу чисельно дорівнює площі фігури, обмеженої графіком циклу в координатах pV . **ККД циклу** дорівнює: $\eta = \frac{A}{Q_{\text{отр}}}$, де A —

робота газу за цикл; $Q_{\text{отр}}$ — кількість теплоти, яку отримав газ під час циклу.

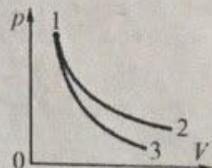
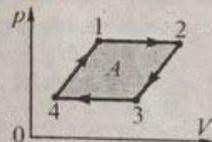
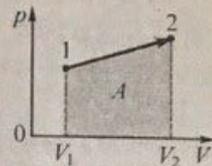
• **1 закон термодинаміки:** $Q = \Delta U + A$, де ΔU — зміна внутрішньої енергії системи; A — робота, яку виконує система; Q — кількість теплоти, що отримує система.

— Для ізотермічного процесу $\Delta T = 0$, тоді $\Delta U = 0$ і 1 закон термодинаміки має вигляд: $Q = A$.

— Для ізохорного процесу $\Delta V = 0$, тоді $A = 0$ і 1 закон термодинаміки має вигляд: $Q = \Delta U$.

— Для ізобарного процесу $A = p\Delta V$ і 1 закон термодинаміки набирає вигляду $Q = \Delta U + p\Delta V$.

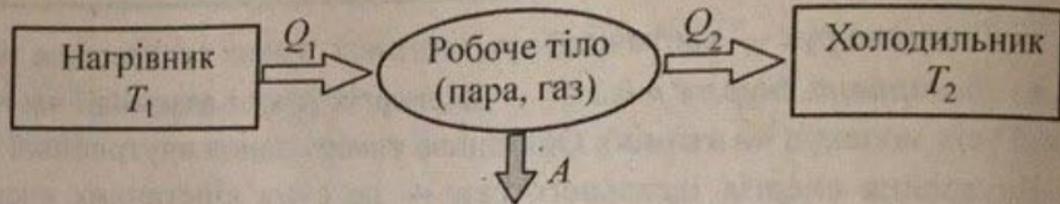
• **Адіабатним** називають процес, що відбувається без теплообміну із зовнішніми тілами: $Q = 0$. При цьому 1 закон термодинаміки записують так: $A = -\Delta U$, тобто система виконує роботу за рахунок зменшення своєї внутрішньої енергії. На рисунку зображено графік адіабати у координатах pV 1–2 адіабата, 1–3 ізотерма.



• Процес називають **необоротним**, якщо самовільно він може протікати лише у певному напрямку. Зворотний до нього процес може відбуватися лише під дією зовнішніх чинників. Наприклад, перетворення механічної енергії у внутрішню, передача енергії від більш нагрітого до менш нагрітого тіла, дифузія тощо.

- *Тепловий двигун* — пристрій, що виконує механічну роботу за рахунок процесів теплообміну.

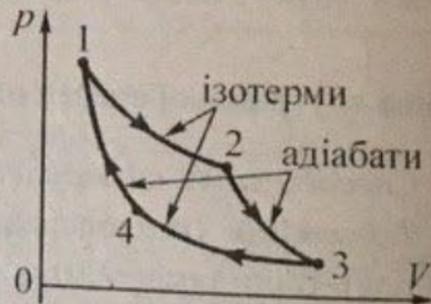
На рисунку зображена блок-схема теплового двигуна, де A — виконана (корисна) робота; Q_1 — кількість теплоти, яку отримало робоче тіло від нагрівника; Q_2 — кількість теплоти, яку робоче тіло передало холодильнику.



За законом збереження енергії $Q_1 = Q_2 + A$.

- *ККД теплового двигуна* дорівнює $\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} < 1$.

Для теплового двигуна, робочим тілом якого є ідеальний газ, у даному інтервалі температур ККД буде максимальним, якщо робочий цикл такого двигуна (*цикл Карно*) складається з двох ізотерм та двох адіабат. На рисунку зображений графік циклу Карно. Максимальний ККД теплового двигуна дорівнює $\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} < 1$. Щоб підвищити ККД, потрібно підвищити температуру нагрівника T_1 і знизити температуру холодильника T_2 .



- При згорянні палива виділяється кількість теплоти, яку обчислюють за формулою $Q = qm$, де q — питома теплота згоряння палива, яка залежить від виду палива та вимірюється у СІ в Дж/кг. Дані про питому теплоту згоряння різних видів палива містяться у таблиці.

Задача 1.

Тепловий двигун працює за циклом Карно. Температура нагрівника дорівнює 100°C , а температура холодильника 0°C . За 1с робоче тіло двигуна віддає холодильнику $27,3\text{ кДж}$ теплоти. Яку кількість теплоти робоче тіло отримує від нагрівника за 1с ?

$$T_1 = 373\text{ K}$$

$$T_2 = 273\text{ K}$$

$$Q_2 = 27,3\text{ кДж}$$

$$Q_1 = ?$$

ККД теплового двигуна, що працює за циклом Карно:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

$$\text{Звідси: } 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \text{ тоді}$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \boxed{Q_1 = Q_2 \frac{T_1}{T_2}};$$

$$Q_1 = 27,3\text{ кДж} \cdot \frac{373\text{ K}}{273\text{ K}} = \underline{\underline{37,3\text{ кДж}}}$$

Задача 2.

Який шлях пройде автомобіль, потужність двигуна якого дорівнює 10 кВт, витративши 5 л бензину? ККД двигуна 20%, густина бензину $700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, питома теплота згоряння бензину $46 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$. Швидкість руху автомобіля дорівнює $20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

$$P = 10000 \text{ Вт}$$

$$v = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$q = 46 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$V = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$\rho = 700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\eta = 0,2$$

$$\text{ККД двигуна: } \eta = \frac{A_k}{A_3}, \text{ де } A_k = Pt = P \frac{l}{v};$$

A_k - корисна робота двигуна.

$$A_3 = Q = qm = q\rho V - \text{затрачена робота (ексерсія)}$$

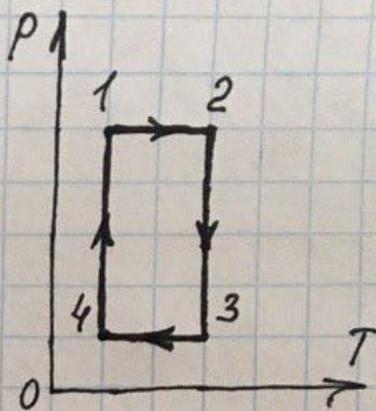
$l - ?$

$$\eta = \frac{Pl}{q\rho Vv} \quad \text{звідси} \quad \boxed{l = \frac{\eta q \rho V v}{P}}$$

$$l = \frac{0,2 \cdot 46 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{10000 \text{ Вт}} = \underline{\underline{64400 \text{ м}}}$$

Задача 3 (ЗНО - 2011)

На рисунку в системі координат pT зображено замкнений цикл 1-2-3-4-1 теплової машини, у якій робочим тілом є ідеальний газ. Визначте співвідношення абсолютних значень робіт газу на ділянках 1-2 і 3-4.



$$p_1 = p_2 = 5p$$

$$p_3 = p_4 = p$$

$$T_1 = T_4 = T$$

$$T_2 = T_3 = 3T$$

Процеси 1-2 і 3-4 ізобарні, тому робота газу під час цих процесів дорівнює

$$A_{12} = p_1(V_2 - V_1) = \nu R(T_2 - T_1) = 2\nu R T;$$

$$A_{34} = p_3(V_4 - V_3) = \nu R(T_4 - T_3) = -2\nu R T$$

$$\frac{|A_{12}|}{|A_{34}|} = ?$$

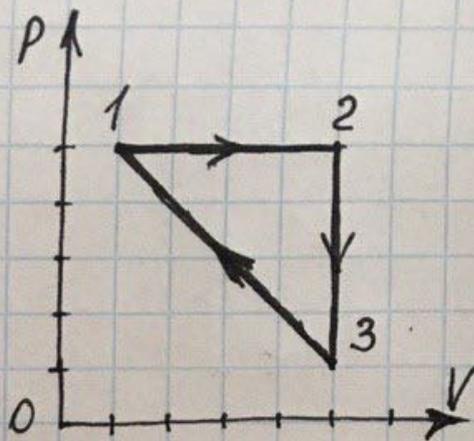
Відношення модулів робіт дорівнює:

$$\frac{|A_{12}|}{|A_{34}|} = \frac{|2\nu R T|}{|-2\nu R T|} = \underline{\underline{1}}$$

Відповідь: 1

Задача 4 (ЗНО - 2010).

Під час зображеного на графіку циклічного процесу газ виконав роботу 80 Дж. Визначте яку роботу виконав газ під час ізобарного розширення. Відповідь запишіть у джоулях.



$$A = 80 \text{ Дж}$$

$$A_{12} = ?$$

Робота газу за цикл дорівнює площі трикутника на графіку залежності $p(V)$:

$$A = \frac{4p \cdot 4V}{2} = 8pV$$

При ізобарному процесі робота газу дорівнює:

$$A_{12} = p_1(V_2 - V_1) = 5p \cdot 4V = 20pV.$$

Поділимо отримані рівняння:

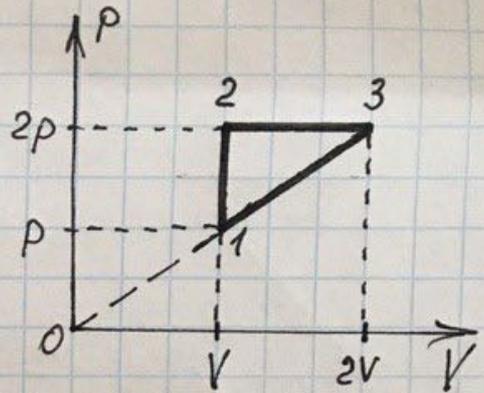
$$\frac{A}{A_{12}} = \frac{8pV}{20pV} = \frac{2}{5}.$$

Звідси $A_{12} = \frac{5}{2}A$. $A_{12} = \frac{5 \cdot 80 \text{ Дж}}{2} = \underline{\underline{200 \text{ Дж}}}$

Відповідь: 200 Дж.

Задача 5*

Визначте ККД циклу (див. рисунок), якщо робочим тілом є одноатомний ідеальний газ.



$$\begin{aligned} p_1 &= p \\ p_2 &= p_3 = 2p \\ V_1 &= V_2 = V \\ V_3 &= 2V \end{aligned}$$

ККД циклу, якщо робочим тілом є ідеальний газ:

$$\eta = \frac{A}{Q}, \text{ де } A - \text{виконана (корисна робота);}$$

Q - кількість теплоти, яку отримало робоче тіло від нагрівника.

Робота газу за цикл дорівнює площі трикутника на графіку залежності $p(V)$:

$$A = \frac{1}{2} (p_2 - p_1)(V_3 - V_2) = \frac{1}{2} (2p - p)(2V - V) = \frac{1}{2} pV.$$

Знайдемо к-сть теплоти Q , яку отримав газ за цикл:

$$Q = Q_{12} + Q_{23}.$$

Процес 1-2 ізохорний. Застосуємо 1 закон термодинаміки до цього процесу:

$$\begin{aligned} Q_{12} &= \Delta U_{12} = \frac{3}{2} \nu R (T_2 - T_1) = \frac{3}{2} (\nu R T_2 - \nu R T_1) = \frac{3}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1) = \\ &= \frac{3}{2} (2pV - pV) = \frac{3}{2} pV. \end{aligned}$$

Процес 2-3 ізобарний. Застосуємо 1 зак. термодинаміки до цього процесу:

$$\begin{aligned} Q_{23} &= \Delta U_{23} + A_{23} = \frac{3}{2} \nu R (T_3 - T_2) + p_2 (V_3 - V_2) = \frac{3}{2} (p_3 V_3 - p_2 V_2) + p_2 (V_3 - V_2) = \\ &= \frac{3}{2} (2p \cdot 2V - 2p \cdot V) + 2p(2V - V) = 3pV + 2pV = \underline{5pV} \end{aligned}$$

$$\text{Отже, } \eta = \frac{\frac{1}{2} pV}{\frac{3}{2} pV + 5pV} = \frac{\frac{1}{2} pV}{\frac{13}{2} pV} = \frac{1}{13} \quad \left[\text{Відповідь: } \eta = \frac{1}{13} \right]$$