

§ 37. РОБОТА В ТЕРМОДИНАМІЦІ

Наприкінці XVIII ст. англійський фізик Бенджамін Томпсон (граф Румфорд) досліджував тепло, що виділяється під час свердління бронзових гармат. Румфорд устигав закип'ятити поставлені на гарматах казани з водою за рахунок тепла, що виділялося, поки коні рухали дуже тупе свердло. У цьому випадку енергія механічного руху свердла перетворювалася на енергію хаотичного руху молекул бронзи та води. А чи можна зробити навпаки?

1 Чому при зміні об'єму газу змінюється його внутрішня енергія

Внутрішня енергія газу може змінюватися, якщо зовнішні сили, що діють на нього, виконують роботу (додатну або від'ємну). Наприклад, якщо газ стискають (газ виконує від'ємну роботу) (рис. 37.1) і він при цьому не віддає енергію навколишньому середовищу, то швидкість руху молекул газу, а відповідно, і внутрішня енергія, і температура газу збільшуються. І навпаки, якщо газ розширюється (тобто виконує додатну роботу), то швидкість руху молекул, температура і внутрішня енергія газу зменшуються.

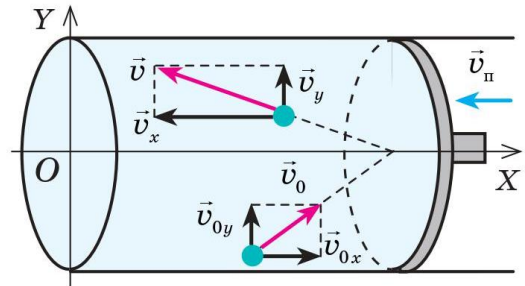


Рис. 37.1. При стисненні газу швидкість руху молекул після зіткнення з поршнем збільшується ($v > v_0$) — газ нагрівається. (Аналогічно збільшується швидкість руху м'яча після удару волейболіста, коли рука рухається назустріч м'ячу.)

2 Як обчислити роботу газу

Обчислимо роботу, яку виконує сила тиску газу при зміні його об'єму від V_1 до V_2 . За означенням роботи: $A = F s \cos \alpha$.

Якщо газ розширюється ізобарно, то сила, яка діє з боку газу на поршень, є незмінною: $F = pS$ (p — тиск газу; S — площа поршня); модуль переміщення поршня $s = l_2 - l_1$ (рис. 37.2, а); $\alpha = 0$.

Таким чином, *робота газу в результаті його ізобарного розширення дорівнює:*

$$A = F s \cos \alpha = pS(l_2 - l_1) = p(V_2 - V_1) = p\Delta V.$$

? Доведіть, що у випадку *ізобарного стиснення* (рис. 37.2, б) *робота газу є від'ємною* й обчислюється за формулою $A = p\Delta V$, причому $\Delta V < 0$.

Роботі газу в разі ізобарного розширення (або стиснення) можна дати просте геометричне тлумачення: *робота газу чисельно дорівнює площі прямокутника під графіком залежності $p(V)$* (рис. 37.3).

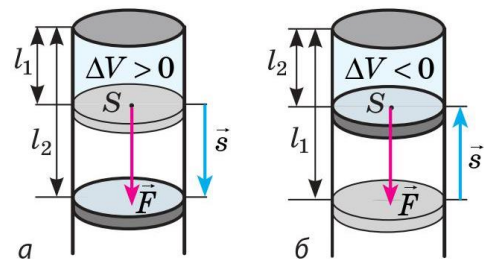


Рис. 37.2. До виведення формули роботи газу: а — газ розширюється; б — газ стискається. \vec{F} — сила тиску газу; \vec{s} — переміщення поршня

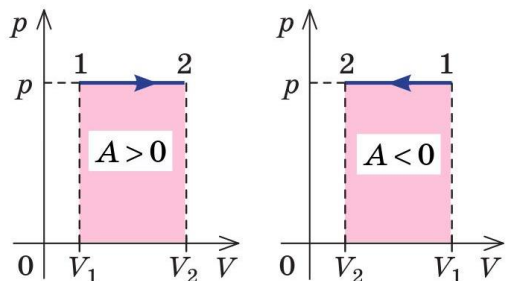


Рис. 37.3. Геометричний зміст роботи при ізобарному процесі

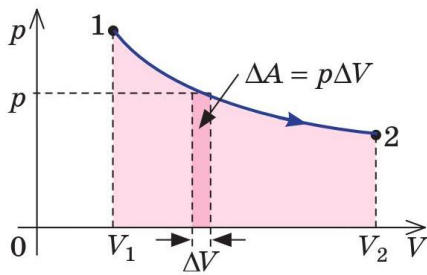


Рис. 37.4. Геометричний зміст роботи при довільному процесі: робота газу чисельно дорівнює площі криволінійної трапеції під графіком залежності $p(V)$

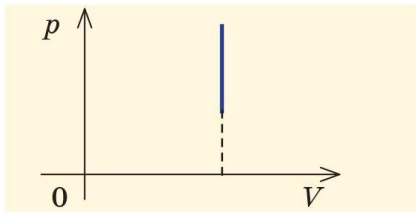


Рис. 37.5. При ізохорному процесі газ роботу не виконує

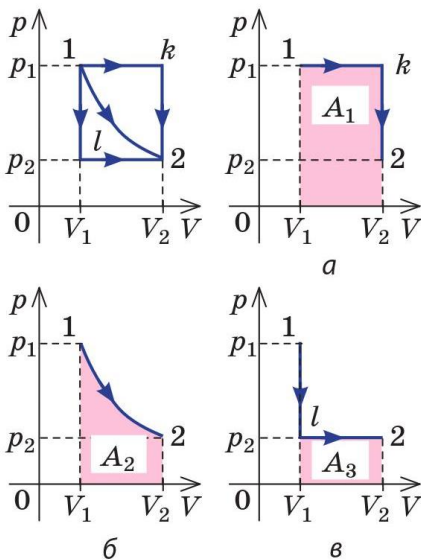


Рис. 37.6. Три шляхи переходу газу зі стану 1 у стан 2: а — газ ізобарно розширюється (ділянка 1к), потім ізохорно охолоджується (ділянка к2); б — газ ізотермічно розширюється; в — газ ізохорно охолоджується (ділянка 1л), потім ізобарно розширюється (ділянка л2). Площі фігур під графіками показують: $A_1 > A_2 > A_3$

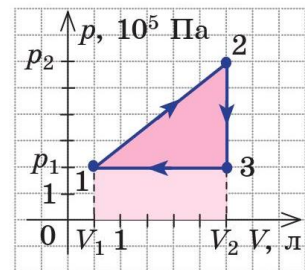
Нехай деякий газ *довільно* переходить зі стану 1 у стан 2 (рис. 37.4). Якщо зміна об'єму газу (ΔV) досить мала, то тиск газу можна вважати незмінним. Тоді робота газу чисельно дорівнюватиме площі виділеної на рисунку смужки. Повна робота при змінюванні об'єму від V_1 до V_2 дорівнюватиме сумі площ усіх смужок, тобто *площі криволінійної трапеції під графіком залежності $p(V)$* .

Очевидно, що при *ізохорному процесі* ($V = \text{const}$) площа фігури під графіком залежності $p(V)$ дорівнює нулю (рис. 37.5), — газ роботу не виконує ($A = 0$).

Робота газу залежить від того, яким шляхом відбувався перехід газу з початкового стану в кінцевий (рис. 37.6).

3 Учимся розв'язувати задачі

Задача. На рисунку графічно зображено циклічний процес, здійснений ідеальним газом. Визначте роботу, яку виконав газ за цикл.



Аналіз фізичної проблеми, розв'язання. Повна робота за цикл дорівнює сумі робіт, виконаних у ході кожного процесу циклу. Згідно з геометричним змістом роботи робота газу в ході процесу 1–2 чисельно дорівнює площі прямокутної трапеції, основи якої дорівнюють p_1 і p_2 , а висота — $(V_2 - V_1)$; об'єм газу збільшується, тому ця робота додатна. Робота газу в ході процесу 2–3 дорівнює нулю, оскільки цей процес ізохорний. Робота газу в ході процесу 3–1 чисельно дорівнює площі прямокутника зі сторонами p_1 і $(V_1 - V_2)$; об'єм газу зменшується, тому ця робота від'ємна. Отже, для визначення роботи за весь цикл потрібно від площі трапеції відняти площу прямокутника. Тобто, як видно з рисунка, робота за цикл чисельно дорівнює площі прямокутного трикутника 1–2–3:

$$A = \frac{(p_2 - p_1) \cdot (V_2 - V_1)}{2}.$$

Необхідні значення величин знайдемо з графіка:

$$p_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad p_2 = 6 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$V_1 = 0,5 \text{ л} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3; \quad V_2 = 3 \text{ л} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[A] = \text{Па} \cdot \text{м}^3 = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^3 = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж};$$

$$A = \frac{(6 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^5) \cdot (3 \cdot 10^{-3} - 0,5 \cdot 10^{-3})}{2} = 5 \cdot 10^2 \text{ (Дж)}.$$

Відповідь: $A = 0,5 \text{ кДж}$.



Підбиваємо підсумки

- У разі відсутності теплообміну з довкіллям, якщо над газом виконується додатна робота, то внутрішня енергія газу збільшується; якщо газ сам виконує роботу, його внутрішня енергія зменшується.

- Робота газу чисельно дорівнює площі фігури під графіком залежності $p(V)$. Якщо об'єм газу збільшується, то газ виконує додатну роботу. Якщо об'єм газу зменшується, то робота газу від'ємна. При ізобарному процесі роботу газу можна визначити за формулою $A = p\Delta V$, при ізохорному процесі робота газу дорівнює нулю: $A = 0$.



Контрольні запитання

1. Яким є геометричний зміст роботи? 2. Виведіть формулу для розрахунку роботи під час ізобарного процесу. 3. Чому дорівнює робота під час ізохорного процесу? 4. Чи залежить виконана робота від способу переведення тіла з одного стану в інший? Обґрунтуйте свою відповідь.



Вправа № 37

1. Наведіть приклади зміни внутрішньої енергії твердих тіл, рідин і газів у результаті виконання роботи. Зазначте, яку роботу — додатну чи від'ємну — вони при цьому виконують.
2. Кисень масою 320 г нагрівають ізобарно від -20 до 27 °С. Визначте роботу газу під час цього процесу.
3. У циліндрі під поршнем міститься 2 моль деякого газу. Яку роботу виконає цей газ у ході ізобарного нагрівання від 273 до 473 К?
4. Ідеальний газ здійснив циклічні процеси, графічно зображені на рис. 1. Визначте роботу, яку виконав газ у ході кожного циклу.
5. На рис. 2 подано графіки двох замкнених процесів, здійснених тим самим газом. У ході якого з цих процесів газ виконав більшу роботу?

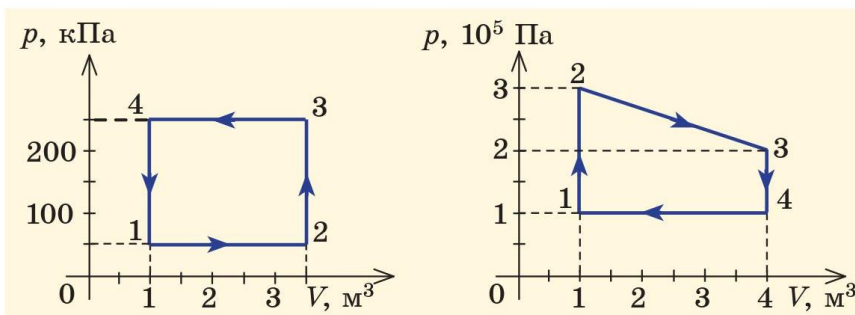


Рис. 1

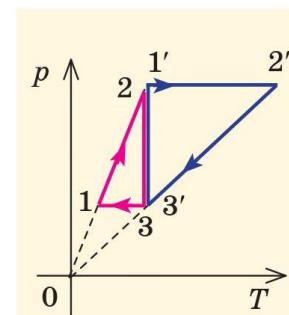


Рис. 2