

## § 38. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ. АДІАБАТНИЙ ПРОЦЕС



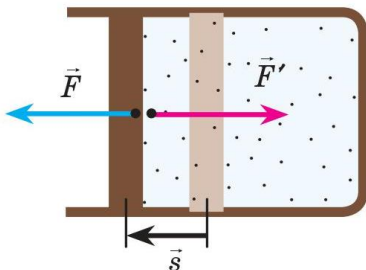
Один із фундаментальних законів природи — закон збереження та перетворення енергії. Уперше до відкриття цього закону дійшов німецький лікар і фізик *Юліус Роберт фон Маєр* (1814–1878). Як це не дивно, на відкриття вченого наштовхнули спостереження над зміною кольору крові в людей. Маєр помітив, що венозна кров у тих, хто живе в тропіках, світліша, ніж у жителів його країни, і кольором нагадує артеріальну. Він зробив висновок, що різниця в кольорі зумовлена кількістю споживання кисню, або «силою процесу згоряння», який відбувається в організмі. Незалежно від Маєра й зовсім інакше до закону збереження енергії дійшли англійський промисловець і вчений *Джеймс Прескотт Джоуль* (1818–1889) і німецький фізик, фізіолог і психолог *Герман Людвіг Фердинанд фон Гельмгольц* (1821–1894).

Закон збереження та перетворення енергії керує всіма явищами природи, невідомо жодного випадку, коли б цей закон не виконувався. Із цього параграфа ви дізнаєтесь про закон збереження та перетворення енергії в термодинаміці.

### 1 Перший закон термодинаміки

У термодинаміці розглядаються системи, механічна енергія яких при переході з одного термодинамічного стану в інший не змінюється. У такому разі, якщо зовнішні сили виконали роботу  $A'$  й одночасно системі передано певну кількість теплоти  $Q$ , то вся енергія йде на зміну внутрішньої енергії системи ( $\Delta U$ ). Закон збереження та перетворення енергії в такому випадку називають **першим законом (началом) термодинаміки**:

Зміна внутрішньої енергії системи ( $\Delta U$ ) при переході з одного термодинамічного стану в інший дорівнює сумі роботи  $A'$  зовнішніх сил і кількості теплоти  $Q$ , переданої системі або переданої системою навколишнім тілам у процесі теплообміну:



**Рис. 38.1.** Згідно з третім законом Ньютона сила  $\vec{F}$ , з якою газ тисне на поршень, дорівнює за модулем і протилежно напрямлена зовнішній силі  $\vec{F}'$ , з якою поршень тисне на газ; тому робота зовнішніх сил дорівнює роботі газу, узятій із протилежним знаком:  $A' = -A$

$$\Delta U = A' + Q$$

**Зверніть увагу!** Якщо система одержує певну кількість теплоти, то в наведеній формулі  $Q$  беруть зі знаком «+», якщо віддає, то зі знаком «-».

На практиці частіше розглядають не роботу зовнішніх сил  $A'$ , а роботу  $A$ , яку виконує дана система проти зовнішніх сил. З огляду на те що  $A' = -A$  (рис. 38.1), **перший закон (начало) термодинаміки** можна сформулювати так:

Кількість теплоти  $Q$ , передана системі, йде на зміну внутрішньої енергії системи ( $\Delta U$ ) та на виконання системою роботи  $A$  проти зовнішніх сил:

$$Q = \Delta U + A$$

Згідно з першим законом термодинаміки *неможливо створити вічний двигун першого*

роду — циклічний пристрій, який виконував би механічну роботу без споживання енергії ззовні (рис. 38.2, а) або виконував би роботу більшу, ніж споживана ним енергія (рис. 38.2, б).

## 2 Який вигляд має перший закон термодинаміки для ізопроцесів

Розглянемо, якого вигляду набуде перший закон термодинаміки у випадках, якщо ідеальному газу незмінної маси передавати деяку кількість теплоти таким чином, що один із макроскопічних параметрів газу ( $V$ ,  $p$  або  $T$ ) залишатиметься незмінним.

- **Ізохорний процес** (рис. 38.3). У ході цього процесу об'єм газу не змінюється ( $\Delta V = 0$ ) і газ роботу не виконує ( $A = 0$ ), тому рівняння першого закону термодинаміки має вигляд:

$$Q = \Delta U.$$

*При ізохорному процесі вся передана газу кількість теплоти витрачається на збільшення внутрішньої енергії газу.*

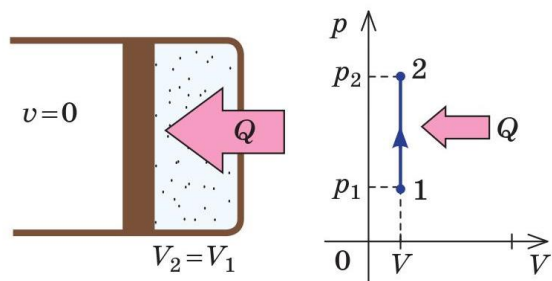
Якщо газ ідеальний одноатомний, то кількість теплоти, передана газу, дорівнює:

$$Q = \Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T = \frac{3}{2} V \Delta p.$$

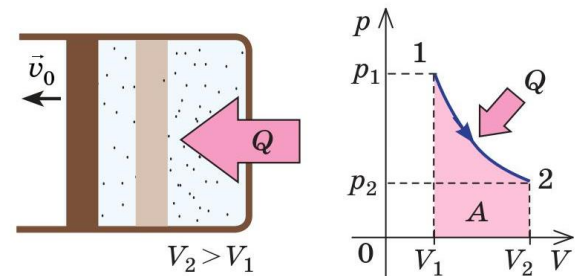
- **Ізотермічний процес** (рис. 38.4). У ході цього процесу температура, а отже, і внутрішня енергія газу не змінюються ( $\Delta U = 0$ ), тому рівняння першого закону термодинаміки має вигляд:

$$Q = A.$$

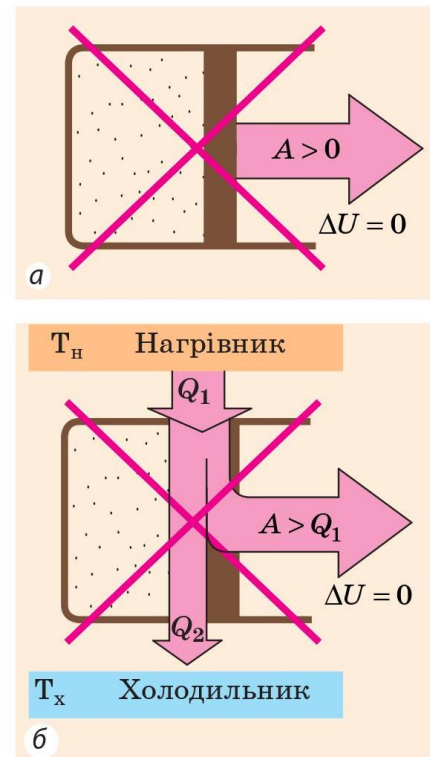
*При ізотермічному процесі вся передана газу кількість теплоти йде на виконання механічної роботи.*



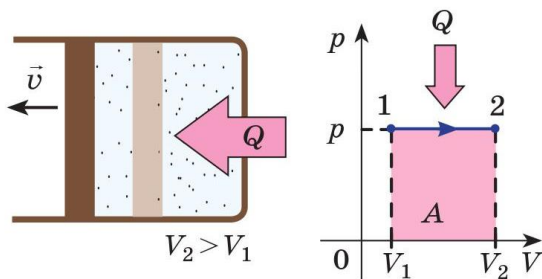
**Рис. 38.3.** Ізохорне нагрівання газу:  $m = \text{const}$ ;  $V = \text{const}$ ;  $Q = \Delta U$



**Рис. 38.4.** Ізотермічне розширення газу:  $m = \text{const}$ ;  $T = \text{const}$ ;  $Q = A$



**Рис. 38.2.** Циклічні процеси, які неможливі з точки зору першого закону термодинаміки



**Рис. 38.5.** Ізобарне розширення газу:  
 $m = \text{const}$ ;  $p = \text{const}$ ;  $Q = \Delta U + A$

• **Ізобарний процес (рис. 38.5).** У ході цього процесу виконується робота і змінюється внутрішня енергія газу, тому рівняння першого закону термодинаміки має вигляд:

$$Q = \Delta U + A.$$

При ізобарному процесі передана газу кількість теплоти йде і на збільшення внутрішньої енергії газу, і на виконання механічної роботи.

Якщо газ ідеальний одноатомний, то робота газу дорівнює  $A = p\Delta V$ , а зміна його внутрішньої енергії  $\Delta U = \frac{3}{2}p\Delta V$ . Кількість теплоти, передана газу, дорівнює:  $Q = \Delta U + A = \frac{3}{2}p\Delta V + p\Delta V = \frac{5}{2}p\Delta V$ , або  $Q = \frac{5}{2} \frac{m}{M} R\Delta T$ .

### 3 Які особливості має адіабатний процес

**Адіабатний процес** — це процес, який відбувається без теплообміну з навколишнім середовищем.

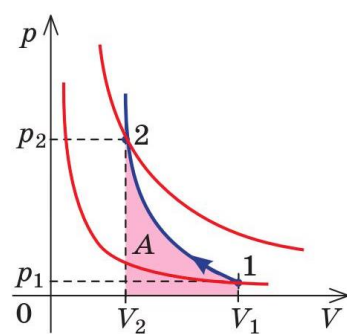
При адіабатному процесі кількість теплоти  $Q$ , передана системі, дорівнює нулю, тому перший закон термодинаміки має вигляд:

$$\Delta U + A = 0, \text{ або } A = -\Delta U.$$

У ході адіабатного розширення газ виконує додатну роботу за рахунок зменшення внутрішньої енергії, при цьому температура газу зменшується.

**?** Доведіть, що в ході адіабатного стиснення внутрішня енергія і температура газу збільшуються.

Оскільки  $p = nkT$ , у разі адіабатного стиснення тиск газу зростає набагато швидше, ніж у разі ізотермічного, адже одночасно зі збільшенням концентрації молекул газу збільшується і його температура (рис. 38.6). Аналогічно в разі адіабатного розширення тиск падає швидше, ніж у разі ізотермічного, адже одночасно зменшуються і концентрація, і температура газу.



**Рис. 38.6.** Змінення тиску газу в ході адіабатного процесу. Синім кольором показано адіабату, червоним — ізотерми

У реальних умовах процес, близький до адіабатного, можна здійснити, якщо газ міститиметься всередині деякої оболонки з дуже хорошими термоізоляційними властивостями. Адіабатними можна вважати й процеси, які відбуваються дуже швидко, тому що в такому випадку газ не встигає обмінятися теплотою з навколишнім середовищем (наприклад, розширення і стиснення повітря в ході поширення звукових хвиль; розширення газу під час вибуху).

Збільшення температури внаслідок різкого стиснення повітря використовується в дизельному двигуні, в якому відсутня система запалювання пальної суміші (див. § 39).

## Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** У результаті ізобарного розширення неон виконав роботу 56 Дж. Яку кількість теплоти передано газу? Якою є зміна його внутрішньої енергії? За якого тиску відбувався процес, якщо об'єм газу збільшився на 2,0 л?

$$A = 56 \text{ Дж}$$

$$\Delta V = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$Q = ?$$

$$\Delta U = ?$$

$$p = ?$$

*Аналіз фізичної проблеми, розв'язання.* Для ізобарного процесу робота газу дорівнює:  $A = p\Delta V$ . Звідси  $p = \frac{A}{\Delta V}$ .

Зміна внутрішньої енергії ідеального одноатомного газу дорівнює:  $\Delta U = \frac{3}{2}p\Delta V = \frac{3}{2}A$ .

Згідно з першим законом термодинаміки:  $Q = \Delta U + A \Rightarrow Q = \frac{3}{2}A + A = \frac{5}{2}A$ .

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканих величин:

$$[p] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па}; \quad p = \frac{56}{2,0 \cdot 10^{-3}} = 28 \cdot 10^3 \text{ (Па)};$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot 56 \text{ Дж} = 84 \text{ Дж}; \quad Q = \frac{5}{2} \cdot 56 \text{ Дж} = 140 \text{ Дж}.$$

*Відповідь:*  $Q = 140 \text{ Дж}$ ;  $\Delta U = 84 \text{ Дж}$ ;  $p = 28 \text{ кПа}$ .



### Підбиваємо підсумки

- Закон збереження енергії, записаний для теплових процесів, називають першим законом (началом) термодинаміки: кількість теплоти, передана системі, йде на зміну внутрішньої енергії системи та на виконання системою роботи проти зовнішніх сил:  $Q = \Delta U + A$ .

- ♦ При ізохорному процесі газ не виконує роботу ( $A = 0$ ), тому вся теплота, передана газу, йде на збільшення його внутрішньої енергії:  $Q = \Delta U$ .

- ♦ При ізотермічному процесі внутрішня енергія газу не змінюється ( $\Delta U = 0$ ), тому вся теплота, передана газу, йде на виконання газом роботи:  $Q = A$ .

- ♦ При ізобарному процесі теплота, передана газу, йде як на збільшення внутрішньої енергії газу, так і на виконання газом роботи:  $Q = \Delta U + A$ .

- ♦ При адіабатному процесі газ не одержує теплоти ( $Q = 0$ ), тому збільшення його внутрішньої енергії відбувається за рахунок виконання над газом роботи (адіабатне стиснення):  $\Delta U = A'$ . Якщо ж газ сам виконує роботу (адіабатне розширення), то його внутрішня енергія зменшується:  $A = -\Delta U$ .



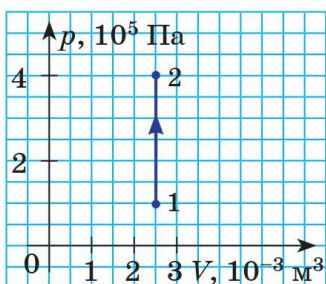
### Контрольні запитання

1. Сформулюйте закон збереження та перетворення енергії. Які спостереження підштовхнули Ю. Маєра до відкриття цього закону?
2. Сформулюйте перший закон термодинаміки.
3. Як буде записаний перший закон термодинаміки для ізохорного процесу? для ізотермічного процесу? для ізобарного процесу?
4. Який процес називають адіабатним?
5. Запишіть перший закон термодинаміки для адіабатного розширення газу; для адіабатного стиснення газу.
6. Чому при адіабатному стисненні тиск газу збільшується набагато швидше, ніж при ізотермічному?

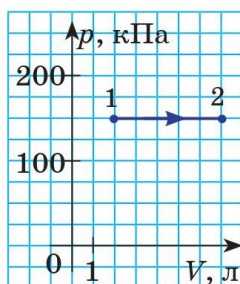


### Вправа № 38

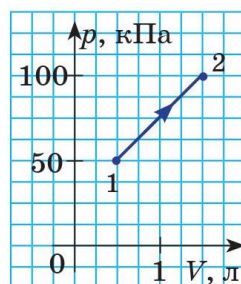
1. При ізохорному охолодженні повітря передало довкіллю 15 Дж теплоти. На скільки змінилася внутрішня енергія повітря? Яку роботу воно виконало?
2. У ході ізобарного стиснення гелій віддав довкіллю 6 Дж теплоти. На скільки змінилася внутрішня енергія газу? Яку роботу виконав газ?
3. Газ розширюється від об'єму  $V_1$  до об'єму  $V_2$  в одному випадку ізотермічно, в другому — ізобарно, в третьому — адіабатно. У якому випадку газ виконує більшу роботу? газу передається більша кількість теплоти? внутрішня енергія газу зростає на більше значення?
4. На рис. *a—г* наведено графіки процесів, що відбуваються з ідеальним одноатомним газом. Яку кількість теплоти передано газу в кожному випадку?
5. Температура кисню масою 3,2 кг при ізобарному розширенні збільшилася на 10 °С. Яку роботу виконав газ? На скільки змінилася внутрішня енергія газу? Питома теплоємність кисню за незмінного тиску дорівнює 913 Дж/(кг·К).
6. Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, яке відношення має перший закон термодинаміки до утворення хмар.



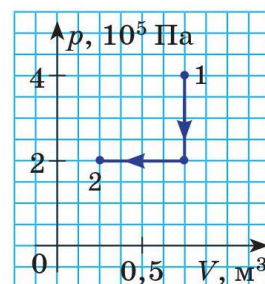
*a*



*б*



*в*



*г*