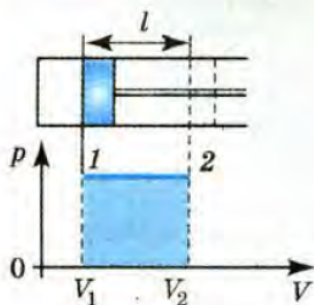


## Тема: Робота термодинамічного процесу

Якщо розглядати дію теплових двигунів, у яких внутрішня енергія перетворюється в механічну, то можна спостерігати, що це відбувається за рахунок розширення пари чи газу, тобто внаслідок цього розширення виконується робота.

Розглянемо умови, за яких газ може виконувати роботу. Вважаємо, що газ нагрівається ізобарно (при сталому тиску;  $p = \text{const}$ ) і певна його маса знаходиться в циліндрі з рухомим поршнем, який може без тертя переміщатися вздовж осі циліндра (мал. 228). Початкова температура  $T_1$  газу дорівнює температурі навколишнього середовища; поршень перебуває у спокої, якщо зсередини і ззовні на нього діє однаковий тиск, який дорівнює, наприклад, атмосферному. Внаслідок нагрівання газ розширюється. Енергія, яка підводиться у цьому випадку, витрачається частково на нагрівання газу, частково на виконання ним роботи.

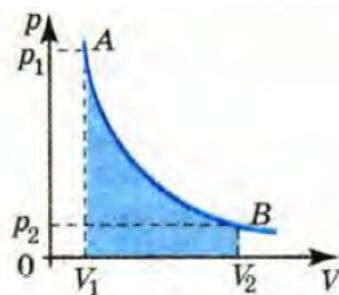


Мал. 228

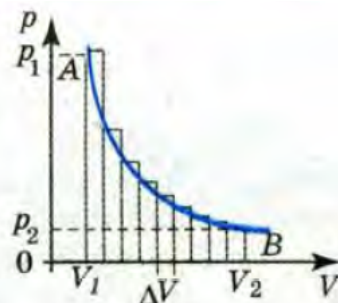
Внаслідок підвищення температури газу до  $T_2$ , збільшується об'єм, і поршень переміщається на відстань  $l$ . Отже, газ, розширюючись і переміщуючи поршень, виконує таким чином роботу проти зовнішніх сил. Оскільки тиск залишається сталим, то діюча на поршень сила дорівнює:  $F = pS$ , де  $S$  — площа поршня. Виконана газом робота  $A = pSl$ , де  $Sl$  — приріст об'єму газу  $V_2 - V_1$ .

Отже,

$$A = p(V_2 - V_1), \quad (5.9)$$



а



б

Мал. 229

тобто робота, виконана газом під час ізобарного розширення проти зовнішніх сил, дорівнює добутку тиску газу і приросту його об'єму.

Під час розширення газ виконує додатну роботу: передає енергію навколишнім тілам. Якщо газ стискається, то  $V_2 < V_1$ , і тому  $A < 0$ .

Скориставшись графічним зображенням ізобарного процесу (мал. 229), ми побачимо, що робота газу дорівнює площі прямокутника висотою  $p$  і основою  $V_2 - V_1$ . Якщо газ ізобарно стискається, то у цьому випадку роботу виконують над ним зовнішні сили, збільшуючи його потенціальну енергію.

Графічно ця робота виражається тією самою площею.

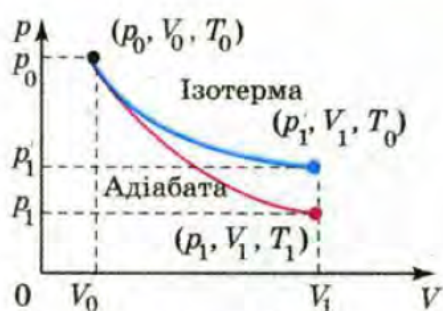
Якщо говорити про зміну об'єму газу, то в багатьох випадках треба уявляти і зміну його тиску. Роботу в таких випадках знаходять за допомогою графічного методу. Можна наочно математично підтвердити, що при будь-якому процесі виконана газом робота дорівнює площі, обмеженій графіком цього процесу в системі координат  $pV$ , віссю абсцис і двома ординатами.

Продемонструємо це, розглядаючи графік ізотермічного процесу ( $T = \text{const}$ ) у системі координат  $pV$ . Ізотерма має вигляд рівнобічної гіперболи  $AB$  (мал. 229, а).

Ми припустили, що робота газу, який розширюється ізотермічно, дорівнює площі фігури, обмеженої графіком залежності  $p$  від  $V$ , віссю  $V$  і ординатами, що відповідають тискам  $p_1$  і  $p_2$  у початковому і кінцевому стані газу. Це твердження можна легко довести, якщо розбити площу криволінійної фігури, обмеженої гіперболою, вертикальними лініями на ряд вузьких ділянок (мал. 229, б). За дуже малої зміни об'єму  $V$  можна припустити, що тиск на кожній окремій ділянці сталий, або, інакше кажучи, він змінюється під час процесу стрибками при переході від однієї ділянки до

другої. Тому робота розширення газу на  $\Delta V$  зобразиться площею вузького прямокутника. Робота розширення газу на  $V_2 - V_1$  дорівнюватиме приблизно площі одержаної «східчастої» фігури, яку можна обчислити, додаючи площі окремих прямокутних ділянок. Природно, що знайдена в такий спосіб площа буде трохи більшою за площу, обмежену гіперболою, але якщо поділити графік на більшу кількість вузьких ділянок, то спадання кривої тиску меншими стрибками наближатиметься до дійсного безперервного спадання кривої тиску. Отже, у граничному випадку (коли ширина ділянки  $\Delta V$  прямує до нуля) графік ізотермічного процесу визначатиме роботу розширення газу.

При ізохорному процесі об'єм газу є сталий  $V = \text{const}$ ,  $\Delta V = 0$ , змінюються його тиск і температура. Оскільки об'єм газу не змінюється, то газ не



Мал. 230

виконує ніякої роботи проти зовнішніх сил:  $A = 0$ , тобто в процесі ізохорного нагрівання вся надана газу теплота повністю витрачається на збільшення його внутрішньої енергії:  $Q = \Delta U$ .

Термодинаміка вивчає ще один процес, який широко застосовується на практиці, зокрема в теплових двигунах. Це так званий адіабатний процес.

**Адіабатний процес** — це термодинамічний процес зміни параметрів газу, що відбувається в теплоізовованій системі, тобто за відсутності теплообміну з навколишніми тілами.

Оскільки в такому разі  $Q = 0$ , то згідно з першим законом термодинаміки вся виконана зовнішніми силами робота витрачається на зміну внутрішньої енергії системи:  $A = \Delta U$ .

Звичайно, за реальних умов досягти такого результату практично неможливо, оскільки не існує ідеальних ізоляторів тепла. Проте наблизитися до цієї умови можна кількома способами. Наприклад, створити оболонки з низькою теплопровідністю (за принципом термоса) або здійснити процес настільки швидко, щоб теплообмін між системою і навколишніми тілами був надто малим і ним можна було знехтувати.

Наприклад, швидке стискання газу викликає зростання внутрішньої енергії, що дорівнює значенню виконаної роботи  $A$ , і газ нагрівається. На цьому явищі, зокрема, побудовано самозаймання паливної суміші у дизельних двигунах. І навпаки, якщо газ сам виконує роботу внаслідок стрімкого розширення, то його внутрішня енергія зменшується і температура газу знижується. Ця властивість адіабатного процесу покладена в основу зрідження газу. Прикладом адіабатного процесу є також вибух, плавлення запобіжника під час короткого замикання тощо.

Графічно на координатній площині  $pV$  адіабатний процес зображується кривою, яка називається **адіабатою** (мал. 230). Вона спадає стрімкіше, ніж ізотерма, оскільки при адіабатному процесі зміна тиску відбувається за рахунок одночасного збільшення об'єму і зменшення температури. Цей висновок підтверджує також формула  $p = nkT$ , адже збільшення об'єму газу обумовлює зменшення концентрації молекул газу, і тому спадання кривої тиску залежить від двох параметрів — температури газу  $T$  і концентрації молекул  $n$ , які зумовлюють його.

Таким чином, унаслідок адіабатного розширення газу відбувається зміна його стану, що характеризується зменшенням внутрішньої енергії; під час адіабатного стискання газу його внутрішня енергія зростає.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. У яких ізопроцесах виконується механічна робота?
2. Який процес називається адіабатним? Яка умова його перебігу?
3. Який процес можна вважати адіабатним у реальних умовах?
4. Як називається крива, що відображає адіабатний процес? Схарактеризуйте її властивості.