

Лекція №

ДРУГИЙ ПОЧАТОК ТЕРМОДИНАМІКИ

Перший закон термодинаміки стверджує, що сума всіх енергій, що беруть участь в процесі зміни стану системи, залишається постійною. Так, механічна енергія може бути повністю перетворена в теплову. Дорога назад - перетворення теплоти в механічну роботу - обмежує другий початок термодинаміки. Наведемо кілька формулювань другого початку термодинаміки, що є еквівалентними один одному:

- 1 Вічний двигун другого роду неможливий.
2. Якщо два тіла з різними температурами привести в тепловий контакт, то тепло буде переходити від більш гарячого тіла більш холодному.
- 3 Ніяка теплова машина періодичної дії не може мати ККД, що перевищує $(T_1 - T_2) / T_1$, де T_1 – верхня, T_2 – нижня температура циклу.

Зворотні, незворотні і кругові процеси

Термодинамічна система знаходиться в стані термодинамічної рівноваги, якщо температура і тиск мають постійні значення в будь-якому місці зайнятого нею об'єму. При незмінних зовнішніх умовах значення всіх її термодинамічних параметрів залишаються незмінними як завгодно довго. Такий стан називається *рівноважним*.

Процес називається *оборотним*, якщо він може протікати в про-ратному напрямку, причому так, що система проходить ті ж проміжні стану, що і при прямому процесі, але в зворотній послідовності.

Прикладами оборотних процесів в ідеальному газі служать *ізотермічний* і *Адіабатний* процеси.

Найчастіше, однак, ми маємо справу з процесами незворотними, які самі по собі протікають тільки в одному напрямку. Якщо, наприклад, привести в зіткнення два тіла з різними температурами, то більш нагріте тіло буде віддавати тепло менш нагрітого тіла до тих пір, поки їх температури зрівняються. *Зворотний* процес - перехід тепла від менш нагрітого тіла до більш нагрітого - ніколи не відбувається.

Незворотнім є процес розширення газу в порожнечу. Якщо в посудині (мал. 2), ліва частина якого заповнена газом, а права - порожня, прибрати перегородку, то газ займе весь об'єм посудини, і тиск всюди стане однаковим. Процес вирівнювання концентрацій, дифузія, тертя, пластична деформація, передача тепла через випромінювання - приклади незворотних процесів.

ЦИКЛІЧНІ ПРОЦЕСИ

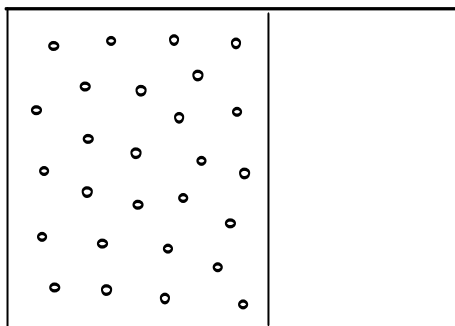
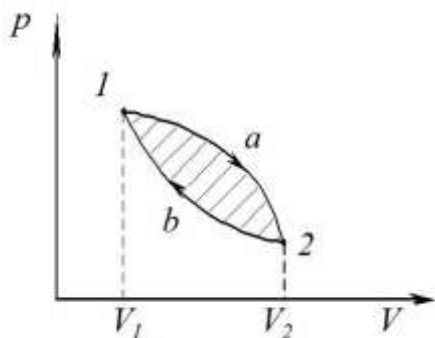


Рис. 2



Мал. 3

Розглянемо ще один вид теплових процесів, що мають важливе значення для обговорюваного тут питання про перетворення теплової енергії в механічну роботу. Це *циклічні процеси*, або *цикли*.

Циклічним називається процес, при якому термодинамічна система проходить ряд різних проміжних станів і повертається до свого початкового стану.

На Vp -діаграмі циклічний процес зображується замкнутою кривою (мал. 3).

Роботу, що здійснюється системою за один цикл, геометрично можна уявити площею, яка охоплюється цією кривою.

Робота, що здійснюється під час переходу системи зі стану 1 в стан 2 по "верхньому" шляху, позитивна і чисельно дорівнює площі фігури $1a2V_2V_11$.

Робота, що здійснюється при зворотному переході зі стану 2 в стан 1 по "нижньому" шляху, негативна.

Численно вона дорівнює площі фігури $2V_2V_11b2$. Досконала за цикл робота дорівнює різниці площ цих фігур, тобто площі, обмеженої кривою, що зображає цикл. Ця робота позитивна, якщо цикл протікає у напрямку ходу годинникової стрілки, і негативна, якщо він відбувається в зворотному напрямку.

Принцип роботи теплової машини

Тепловою машиною називається пристрій, що перетворює теплову енергію в механічну роботу. З'ясуємо умови, при яких можливо таке перетворення. В системі тіл, що знаходяться в тепловій рівновазі, без зовнішнього втручання жодних процесів відбуватися не може. Не можна виконати і роботу, оскільки вона пов'язана з спрямованим рухом макроскопічних тіл, а тепловий рух молекул хаотично і не має ніякого переважного напрямку в просторі. Для отримання механічної роботи, очевидно, треба мати два тіла з *різними температурами* і вдатися до допомоги третього тіла, яке і буде цю роботу здійснюва-

ти. Наприклад, можна взяти ідеальний газ, укладений в циліндрі с рухомим поршнем, стінки якого мають гарну теплопровідність.

Нехай спочатку газ в циліндрі має температуру навколишнього повітря, а тиск газу дорівнює атмосферному. Якщо циліндр привести в контакт з тілом, нагрітим до більш високої температури, то газ всередині циліндра розшириться, поглинувши у цього тіла деяку кількість теплоти і зробивши механічну роботу. Щоб повернути поршень у вихідне положення і підготувати систему до повторного виконання роботи, потрібно охолодити газ, привівши циліндр в контакт з більш холодним тілом, наприклад, з тим же навколишнім повітрям. При зворотному ході поршня, що супроводжує охолодження газу, відбувається робота зворотного знака. Оскільки робота розширення перевершує роботу стиснення, тому що температура нагрітого тіла вище температури холодного, таке пристрій здатний перетворювати теплоту в механічну роботу.

Цикл Карно

Зі сказаного в попередньому параграфі слід, що будь-яка теплова машина повинна мати три складові частини (мал. 4):

- 1) нагрівач – “гаряче” тіло з температурою T_1 ;
- 2) робоче тіло, в якості якого можна взяти ідеальний газ в циліндрі з поршнем;
- 3) охолоджувач - тіло, що має температуру T_2 , нижчу, ніж у нагрівача.

Це машина періодичної дії. За один період (цикл) газ в циліндрі спочатку розшириться, зробивши деяку роботу A і отримавши при цьому від нагрівача кількість теплоти Q_1 , потім знову стиснеться, віддавши частину тепла Q_2 охолоджувачу. Якщо обидві величини Q_1 і Q_2 вважати позитивними, то, згідно із законом збереження енергії:

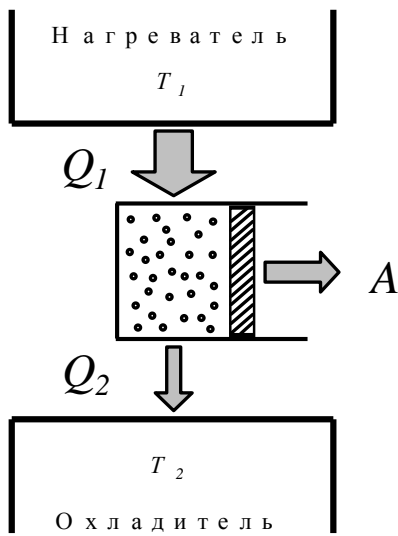
$$A = Q_1 - Q_2. \quad (1)$$

Коефіцієнт корисної дії (ККД) теплової машини дорівнює відношенню роботи A , яку здійснюють нею за один цикл, до кількості теплоти Q_1 , отриманої робочим тілом за один цикл від нагрівача:

$$\eta = \frac{A}{Q_1}. \quad (2)$$

При цьому байдуже, який процес відбувається з робочим тілом - оборотний або необоротний.

З'ясувати, при яких умовах ККД теплової машини буде максимальним.



Мал. 4

Машину, що має при даних зовнішніх умовах найбільше значення коефіцієнта корисної дії, називають ідеальною. Аналіз показує, що для цього потрібно:

- 1) позбутися тертя між циліндром і поршнем;
- 2) усунути процеси безпосередньої передачі тепла від нагрівача охолоджувача і при роботі машини використовувати тільки зворотні процеси.

Такими процесами є ізотермічний і Адіабатний. Цикл Карно - який чинять робочим тілом (ідеальним газом) круговий процес, що включає в себе дві ізотерми і дві адіабати.

В якості вихідного візьмемо стан, позначене на Vp -діаграмі точкою a (мал. 5), коли робоче тіло знаходиться під тиском p_a і займає об'єм V_a , а його температура дорівнює температурі нагрівача T_1 .

Не порушуючи контакту робочого тіла з нагрівачем, розширимо його ізотермічно до об'єму V_b . Рівняння цього процесу:

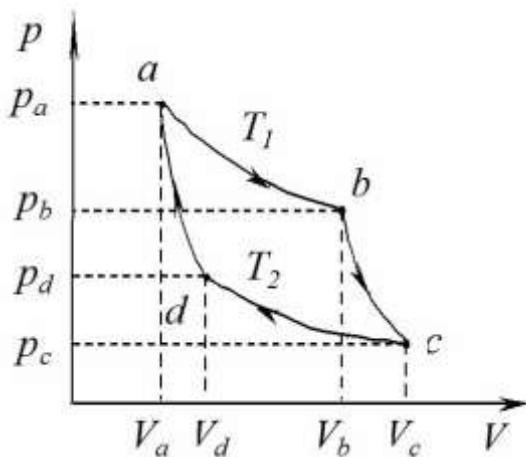


Рис. 5

$$p_a V_a = p_b V_b, \quad (3)$$

а кількість теплоти, запозичене робочим тілом від нагрівача визначається виразом:

$$Q_1 = A_{ab} = \nu RT_1 \ln \frac{V_b}{V_a}. \quad (4)$$

Теплоізолюємо робоче тіло і розширимо адіабатно так, щоб його температура знизилася до температури охолоджувача T_2 . Рівняння цього процесу:

$$p_b V_b^\gamma = p_c V_c^\gamma. \quad (5)$$

Наведемо тепер робоче тіло в тепловий контакт з охолоджувачем і стиснемо ізотермічно до об'єму V_d , такого, щоб точка d на Vp -діаграмі належала адіабаті, що проходить через точку a .

Рівняння цього процесу:

$$p_c V_c = p_d V_d. \quad (6)$$

Кількість теплоти, віддане робочим тілом охолоджувача при ізотермічному стисканні, негативно і по модулю складає

$$Q_2 = |A_{cd}| = \nu RT_2 \ln \frac{V_c}{V_d}. \quad (7)$$

Повернемо тепер робоче тіло в початковий стан (в точку a на Vp -діаграмі) шляхом адиабатного стиснення, описуваного рівнянням

$$p_d V_d^\gamma = p_a V_a^\gamma. \quad (8)$$

Температура робочого тіла в цьому процесі підвищиться до температури нагрівача T_1 . За повний цикл воно здійснює роботу, рівну різниці отриманої від нагрівача теплоти Q_1 і теплоти Q_2 , відданої охолоджувача: $A = Q_1 - Q_2$. ККД циклу знайдемо, підставивши в формулу (2) вирази (1), (4) і (7):

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{\ln(V_c/V_d)}{\ln(V_b/V_a)}. \quad (9)$$

Покажемо, що ставлення логарифмів дорівнює одиниці. Для цього перемножимо рівняння (3), (5), (6) і (8):

$$p_a p_b p_c p_d V_a V_b^\gamma V_c V_d^\gamma = p_b p_c p_d p_a V_b V_c^\gamma V_d V_a^\gamma,$$

звідки випливає, що

$$\left(\frac{V_b}{V_a}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_c}{V_d}\right)^{\gamma-1}.$$

Логарифмуючи і скорочуючи $(\gamma - 1)$, отримаємо

$$\ln \frac{V_b}{V_a} = \ln \frac{V_c}{V_d}.$$

Тоді вираз (9) набирає вигляду

$$\eta_{\text{ид}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (10)$$

З цієї формули випливає, що ККД ідеальної теплової машини менше одиниці, тобто вона не може повністю перетворити теплову енергію в механічну роботу - частина тепла повинна бути віддана охолоджувача. Теоретичний коефіцієнт корисної дії теплової машини, що виражається формулою (10), не залежить від особливостей її пристрою, способу дії і природи газу, використуваного як робоче тіло. Суттєве виключення всіх необоротних процесів, і тоді вирішальними є температура нагрівача T_1 , при якій робоче тіло відбирає у нього кількість теплоти Q_1 , і температура охолоджувача T_2 , при якій йому передається кількість теплоти Q_2 .

Теоретичний цикл, побудований Карно, показує, що для збільшення ККД теплової машини потрібно знижувати температуру охолоджувача і підвищувати температуру нагрівача. Оскільки охолоджувачем в реальних умовах зазвичай є навколишнє повітря, перший шлях неможливий. Другий шлях пов'язаний з труднощами створення матеріалів для виготовлення деталей двигунів, здатних працювати при високих температурах.

Крім двигунів внутрішнього згорання, що використовуються на автотранспорті, тепловозах, дизельелектрохід (кораблях), до теплових відносяться також турбореактивні двигуни літаків і ракетні двигуни.

Цикл Карно може відбуватися і в зворотному напрямку (рис. 6). Машина в

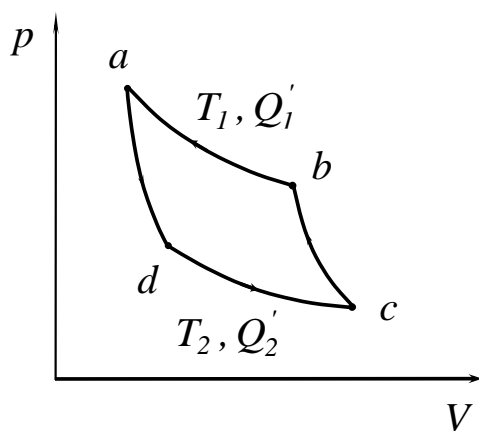


Рис. 6

цьому випадку працює як тепловий насос, що перекачує тепло від холодного тіла до гарячого. Робоче тіло (ідеальний газ) перекладається з точки *a* на *Vp*-діаграмі, зображеної на рис. 6, в точку *d* шляхом адиабатного розширення, потім розширюється ізотермічні, відбираючи тепло від "холодного" тіла, потім адиабатно стискається, переходячи в точку *b*, і, нарешті, стискається ізотермічні, віддаючи тепло "гарячого" тілу. Так працюють побутові холодильники, кондиціонери і теплові насоси.

Відношення кількості теплоти Q_2' , відібраного у холодного тіла, до виконаної при цьому механічної роботи A називається коефіцієнтом перетворення холодильника:

$$\frac{Q_2'}{A} = \frac{Q_2'}{Q_1' - Q_2'} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} . \quad (11)$$

Це відношення зазвичай більше одиниці. У домашньому холодильнику температура T_2 холодного резервуара (морозильної камери) приблизно становить 250 К. Гарячим резервуаром служить кімнатне повітря, температура якого $T_1 \approx 300$ К. Формула (11) дає таке значення коефіцієнта перетворення холодильника:

$$\frac{Q_2'}{A} = \frac{250}{300 - 250} = 5 .$$

На кожен джоуль електроенергії, витраченої на роботу компресора, доводиться 5 Дж тепла, забраного у холодильної камери.