

Лекція №4.

ДРУГИЙ ПОЧАТОК ТЕРМОДИНАМІКИ

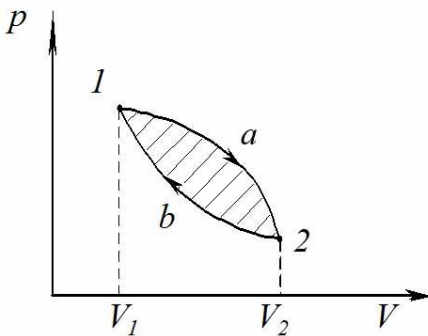
Перший закон термодинаміки стверджує, що сума всіх енергій, що беруть участь в процесі зміни стану системи, залишається постійною. Так, механічна енергія може бути повністю перетворена в теплову. Дорога назад - перетворення теплоти в механічну роботу - обмежує другий початок термодинаміки.

ЦИКЛІЧНІ ПРОЦЕСИ

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. 1).



Мал. 1

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.

Чисельно 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.

Цикл Карно

Будь-яка теплова машина повинна мати три складові частини (мал. 2):

- 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:

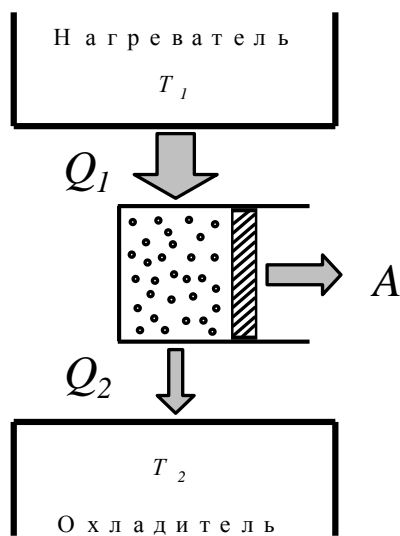
$$A = Q_1 - Q_2. \quad (1)$$

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. 2

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 .

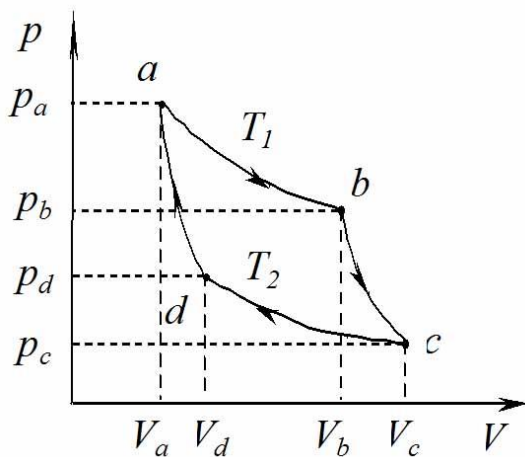


Рис. 3

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

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

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 адіабатного 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

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

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 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. 4). Машина в

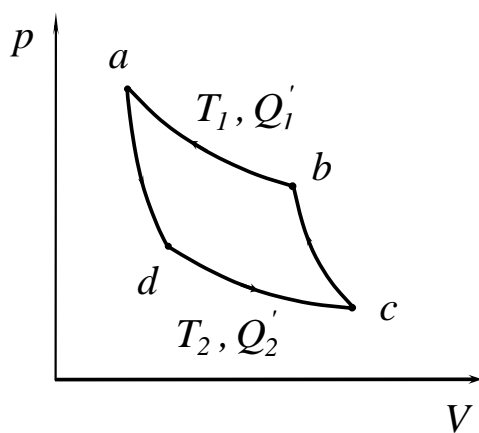


Рис. 4

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 точк *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 морозильної камери.