

## Лекція 5

**Термодинамічний аналіз ізохорного, ізобарного, ізотермічного, адіабатного і політропного процесів. Другий закон термодинаміки. Основні визначення і аналітичний вираз другого закону термодинаміки. Прямий і обернений цикли Карно.**

### Ізохорний термодинамічний процес (при сталому об'ємі)

1. Зміна стану робочого тіла без зміни його об'єму—ізохорний процес.
2. Умова перебігу процесу:  $v = \text{const}; dv = 0$ .
3. Рівняння процесу:  $\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$ ,  $P_1 T_2 = P_2 T_1$ .
4. Графічне зображення процесу в PV і TS-координатах (рис. 5.1.).

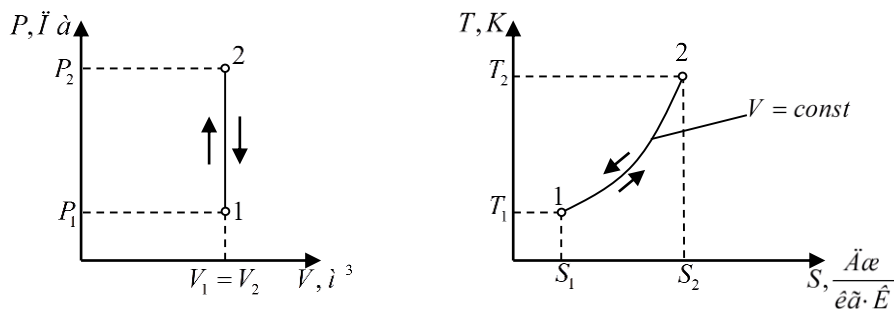


Рис. 5.1. Ізохорний процес в в PV і TS-координатах

5. Зміну внутрішньої енергії робочого тіла в ізохорному процесі підраховують за формулою

$$\delta u = c_v dT = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT = c_v (T_2 - T_1).$$

6. Зовнішня корисна робота, яка виконувалась би робочим тілом в ізохорному процесі рівна нулю

$$\delta l = p dV = 0,$$

а робота, підведена із зовні, підраховується з рівняння

$$\delta l_0 = -Vdp = -\int_{p_1}^{p_2} Vdp = -V(p_2 - p_1) = V(p_1 - p_2).$$

7. Зміна ентальпії в цьому процесі не підраховується.
8. Кількість підведеної або відведеної теплоти в цьому процесі йде лише на зміну внутрішньої енергії робочого тіла і підраховується

$$\delta q = \delta u = c_v dT = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT = c_v (T_2 - T_1).$$

9. Аналітичний вираз першого закону термодинаміки для даного процесу матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \delta q &= \delta u = c_v dT, \\ \delta q &= ds \cdot T. \end{aligned}$$

10. Вся теплота, що підводиться до системи в цьому процесі, витрачається лише на зміну внутрішньої енергії робочого тіла

$$\varphi = \frac{\delta u}{\delta q} = 1.$$

### Аналіз ізобарного термодинамічного процесу

1. Процес зміни стану робочого тіла без зміни його тиску називають ізобарним термодинамічним процесом.
2. Умови перебігу процесу  $p = const; dp = 0$ .
3. Рівняння процесу

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad V_1 T_2 = V_2 T_1.$$

4. Ізобарний процес в PV і TS-координатах (рис.5.2.).
5. Зміну внутрішньої енергії підраховують за загальною формулою

$$\delta u = c_v dT = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT = c_v (T_2 - T_1).$$

6. Зовнішню корисну роботу підраховують за загальною формулою, а робота, що підводиться із зовні на привід, дорівнює нулю

$$\delta l = pdV = \int_{V_1}^{V_2} pdV = p(V_2 - V_1),$$

$$\delta l_0 = -Vdp = 0.$$

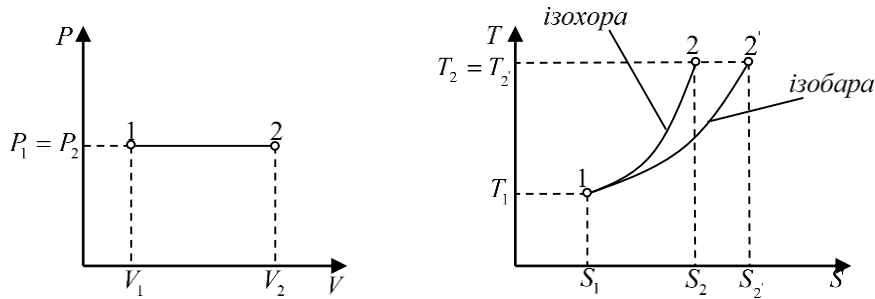


Рис. 5.2. Ізобарний процес в в PV і TS-координатах

7. Зміну ентальпії підраховують за загальною формулою

$$\delta h = c_p dT = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT = c_p (T_2 - T_1).$$

8. Кількість підведеної або відведеної теплоти в цьому процесі рівна зміні ентальпії

$$\delta q = \delta h = c_p dT = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT = c_p (T_2 - T_1).$$

9. Аналітичний вираз першого закону термодинаміки має вигляд

$$\delta q = \delta u + \delta l = c_v dT + pdV,$$

$$\delta q = \delta h = c_p dT,$$

$$\delta q = ds \cdot T.$$

10. Доля теплоти, яка йде на зміну внутрішньої енергії

$$\varphi = \frac{\delta u}{\delta q} = \frac{c_v dT}{c_p dT} = \frac{1}{k},$$

де  $k$  – показник адіабати,

$$\psi = \frac{\delta l}{\delta q} = 1 - \frac{1}{k}.$$

**Ізотермічний термодинамічний процес**

1. Процес зміни стану робочого тіла без зміни його температури називається ізотермічним процесом. Такий процес може виникнути в циліндрі машини, якщо теплота, що підводиться, витрачається на зміну внутрішньої енергії, а не на переміщення поршня, таким чином, щоб температура робочого тіла лишалась сталою.
2. Умови перебігу процесу  $T = const, dT = 0$ .
3. Рівняння процесу  $P_1V_1 = P_2V_2, PV(T) = const$ .
4. Зображення процесу в PV і TS-координатах (рис.5.3.).

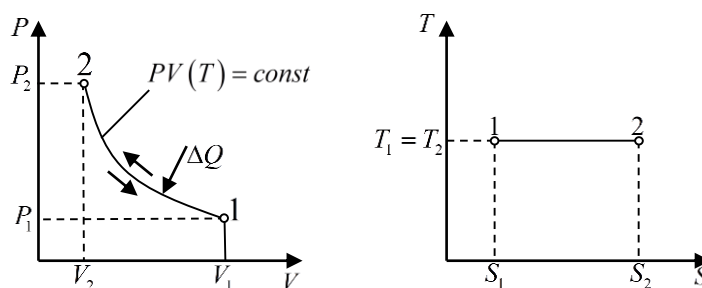


Рис. 5.3. Ізотермічний процес в в PV і TS-координатах

5. Зміна внутрішньої енергії в ізотермічному процесі дорівнює нулю

$$\delta u = c_v dT = 0.$$

6. Зовнішню корисну роботу і роботу затрачену із зовні підраховують за наступними загальними формулами

$$\delta l = p dV = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1),$$

$$\delta l_0 = -V dp = - \int_{p_1}^{p_2} V dp = -V(p_2 - p_1) = V(p_1 - p_2).$$

7. Зміна ентальпії дорівнює нулю

$$\delta h = c_p dT = 0.$$

8. Кількість підведеної теплоти в процесі не витрачається на зміну температури робочого тіла, тому через теплоємність рівна нулю

$$\delta q = c_x dT = 0.$$

9. Аналітичний вираз першого закону термодинаміки матиме вигляд

$$\begin{aligned}\delta q &= \delta l = pdV, \\ \delta q &= -\delta l_0 = -Vdp, \\ \delta q &= ds \cdot T.\end{aligned}$$

10. Розподіл між видами енергій у даному процесі є наступним.

Доля теплоти, що йде на зміну внутрішньої енергії дорівнює нулю

$$\varphi = \frac{\delta u}{\delta q} = 0.$$

Доля теплоти на використання зовнішньої корисної роботи рівна одиниці

$$\psi = \frac{\delta l}{\delta q} = 1.$$

Оскільки вся підведена теплота в цьому процесі йде на виконання зовнішньої корисної роботи,—реальні робочі процеси теплових машин необхідно наближати до ідеальних ізотермічних.

### Адіабатний ізотермічний процес

1. Адіабатний термодинамічний процес—зміна стану робочого тіла без його теплообміну з оточуючим середовищем. Обмін енергії з оточуючим середовищем відбувається лише у формі роботи.
2. Умови перебігу процесу  $q = const$ ,  $\delta q = 0$ ,  $s = const$ ,  $ds = 0$ .
3. Рівняння процесу

$$P_1 V_1^k = P_2 V_2^k, \quad PV^k = const,$$

де  $k$  – показник адіабати.

4. Графічне зображення процесу в  $PV$  і  $TS$ -координатах (рис. 5.4.).

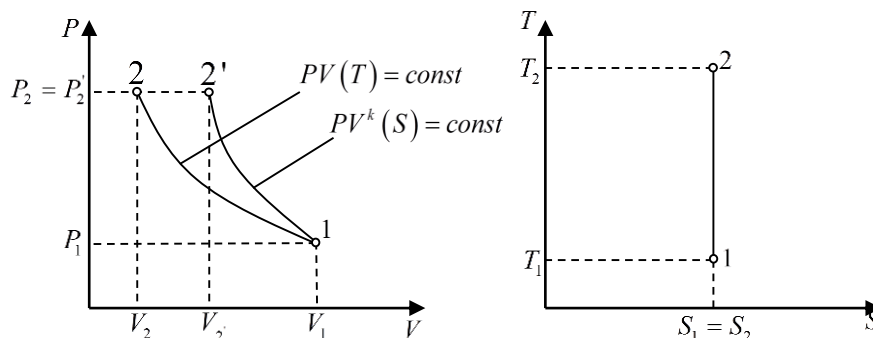


Рис. 5.4. Адіабатний процес в в  $PV$  і  $TS$ -координатах

5. Зміну внутрішньої енергії в адіабатному процесі підраховують за наступною формулою

$$\delta u = c_v dT = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT = c_v (T_2 - T_1).$$

6. Зовнішню корисну роботу і роботу затрачену із зовні підраховують за наступними формулами

$$\begin{aligned}\delta l &= p dV = p(V_2 - V_1), \\ \delta l_0 &= -V dp = V(p_1 - p_2).\end{aligned}$$

7. Кількість підведеної або відведеної теплоти рівна нулю

$$\delta q = c_x dT = 0.$$

8. Зміна ентальпії в процесі підраховується по загальній формулі

$$\delta h = c_p dT = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT = c_p (T_2 - T_1).$$

9. Аналітичний вираз першого закону термодинаміки матиме вигляд

$$\begin{aligned}\delta u &= -\delta l, \quad c_v dT = -p dV, \\ \delta l_0 &= \delta h, \quad c_p dT = V dp.\end{aligned}$$

10. Розподіл між видами енергій в адіабатному процесі відбувається лише між внутрішньою енергією та роботою  $\delta q \square \delta l$ .

### Політропний термодинамічний процес

1. Процес зміни стану робочого тіла при сталій теплоємності називають політропним. Цей процес є узагальнюючим процесом для попередніх чотирьох і при конкретних умовах може бути або ізобарним, або ізохорним, або ізотермічним, або адіабатним.
2. Умови перебігу процесу  $c = c_x = const$ .
3. Рівняння політропного процесу

$$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n; p V^n = const,$$

де  $n$  – показник політропі

$$n = \frac{c_x - c_p}{c_x - c_v},$$

де  $c_x$  – теплоємність робочого тіла в даному політропному процесі,

Дж/(кг·К);

$c_p, c_v$  – відповідно ізобарна і ізохорна теплоємності даного робочого тіла

Дж/(кг·К).

4. Графік зображення політропного процесу лежить в межах між лініями сталих температури, тиску, об'єму та ентропії (рис.5.5.).

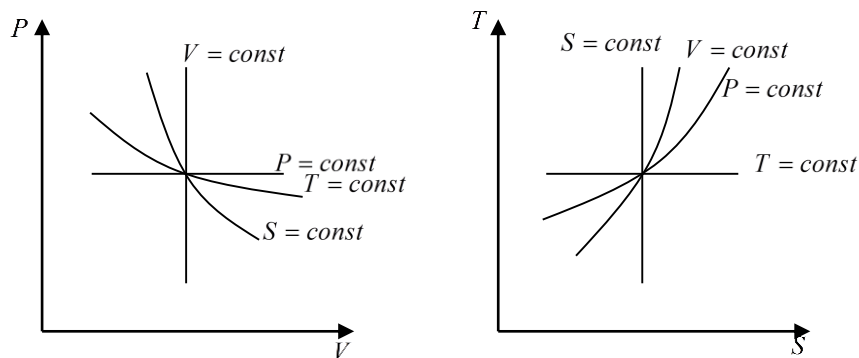


Рис. 5.5. Політропний процес в в PV і TS-координатах

5. Зміну внутрішньої енергії в політропному процесі підраховують за загальною формулою

$$\delta u = c_v dT = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT = c_v (T_2 - T_1).$$

6. Зовнішню корисну роботу і роботу підведену із зовні підраховують за формулою

$$\delta l = p dV = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1),$$

$$\delta l_0 = -V dp = -V(p_2 - p_1) = V(p_1 - p_2).$$

7. Зміну ентальпії підраховують за формулою

$$\delta h = c_p dT = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT = c_p (T_2 - T_1).$$

8. Кількість підведеної або відведеної теплоти підраховують за формулою

$$\delta q = c_x dT = \int_{T_1}^{T_2} c_x dT = c_x (T_2 - T_1),$$

$$c_x = \text{const.}$$

9. Аналітичний вираз першого закону термодинаміки має такий загальний вигляд:

$$\delta q = \delta u + \delta l = c_v dT,$$

$$\delta q = \delta h - \delta l_0 = c_p dT - V dp,$$

$$\delta q = ds \cdot T = c_x \cdot dT.$$

10. Розподіл між видами енергій в політ роному процесі є наступним.

Доля теплоти, що йде на зміну внутрішньої енергії

$$\varphi = \frac{\delta u}{\delta q} = \frac{c_v dT}{c_x dT} = \frac{n-1}{n-k}.$$

Доля теплоти, що йде на виконання зовнішньої корисної роботи

$$\psi = \frac{\delta l}{\delta q} = \frac{c_p dT}{c_x dT} = \frac{1-k}{n-k}.$$

### Другий закон термодинаміки

Якщо предметом дослідження першим законом термодинаміки є термодинамічний процес, то предметом дослідження другим законом термодинаміки є термодинамічний цикл.

Перший закон термодинаміки встановлює кількісні співвідношення між теплотою, внутрішньою енергією та роботою, то другий — напрямком перебігу циклу або якісний розподіл між видами енергій. Другий закон як і перший має ряд визначень.

1. Довільно, сама собою теплота не передається від тіл з вищою температурою до тіл з нижчою, тобто передача теплоти здійснюється до досягнення рівності температур.
2. Перетворення теплоти в корисну роботу в теплових машинах відбувається лише при переході теплоти від нагрітого тіла до холодного.



3. Неможлива робота вічного двигуна другого роду, в якому вся теплота від верхнього джерела теплоти перетворювалась би в зовнішню корисну роботу, частина теплоти обов'язково передається нижньому джерелу теплоти.
4. Неможливий цикл, для якого теплота самостійно переходила б від холодних до нагрітих тіл (термотрансформатори). Для здійснення цього циклу необхідно затратити або підвести енергію із зовні.

Отже, в результаті здійснення прямого циклу отримується зовнішня корисна робота. Цикл протікає і зображається за годинниковою стрілкою. Цикл для здійснення якого необхідно затратити роботу із ззовні—називається оберненим, зображається і протікає проти годинникової стрілки. За прямим циклом працюють усі теплові машини, за оберненим—термотрансформатори (холодильні машини, теплові насоси) і компресори.

На основі другого закону термодинаміки формулюється термодинамічний аналіз циклів машин, тобто ефективність перетворення теплоти в роботу. Основною частиною аналізу є поняття термічного коефіцієнта корисної дії і холодильного коефіцієнта. Аналітичним виразом другого закону термодинаміки є:

$$\oint \frac{dq}{T} \leq 0,$$

де знак „=” для ідеальних циклів, а знак „<” для реальних. Цей інтеграл в термодинаміці відомий як інтеграл Клаузіуса.

### **Термічний ККД та холодний коефіцієнт**

Термічний ККД—вказує на ефективність перетворення підведеної теплоти в зовнішню корисну роботу

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_u}{q_1},$$

де  $q_1$  – кількість підведеної теплоти до термодинамічної системи від верхнього джерела теплоти, Дж/кг;  $q_2$  – кількість відведеної теплоти від термодинамічної

системи до нижнього джерела теплоти, Дж/кг;  $l_u$  – питома зовнішня корисна робота виконана машиною за цикл, Дж/кг.  $\eta_t < 1$ .

Термічний ККД зручно підраховувати за допомогою фігур в TS-координатах (рис.5.6.).

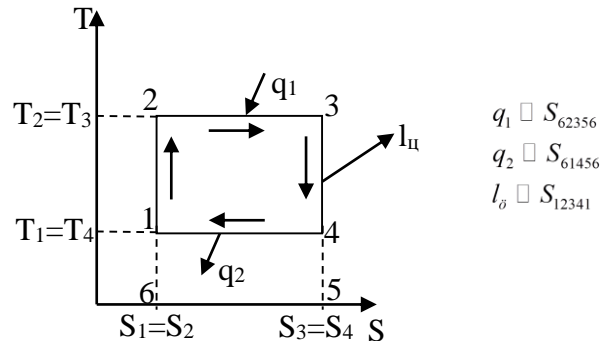


Рис. 5.6. Прямий термодинамічний процес в в PV і TS-координатах

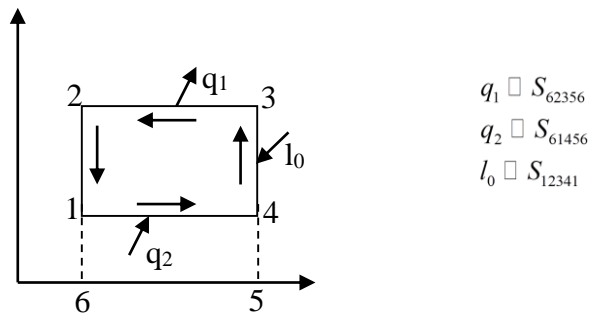
Якщо в TS-координатах в масштабі побудувати конкретний цикл теплової машини, то числові значення площ фігур дорівнюватимуть числовим значенням підведеної і відведеної теплот і теплоті, що перетворюється в зовнішню корисну роботу. Існують загальні методи підвищення термічного ККД, що полягають в збільшенні  $q_1$  без зміни  $q_2$ , в зменшенні  $q_2$  без зміни  $q_1$ , в одночасному збільшенні  $q_1$  і зменшенні  $q_2$ .

Холодний коефіцієнт (ХК)—вказує на ефективність даної холодильної машини і дорівнює відношенню підведеної теплоти від нижнього джерела теплоти (холодильна потужність) до роботи підведеної із зовні для здійснення циклу

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l_0} = \frac{q_2}{q_1 - q_2},$$

де  $q_1$  – кількість теплоти, що відводиться від машини до верхнього джерела теплоти, Дж/кг;  $q_2$  – кількість теплоти, що підводиться до машини від нижнього джерела теплоти Дж/кг;  $l_0$  – питома робота затрачена із зовні для здійснення машиною циклу, Дж/кг. Холодильний коефіцієнт  $\varepsilon$  може бути меншим від одиниці, більшим від одиниці або рівним їй.

Цикл холодильної машини—обернений цикл, який зображається проти



годинникової стрілки (рис. 5.7.).

Рис. 5.7. Оборнений термодинамічний процес в в PV і TS-координатах

Термічний ККД і ХК характеризують ефективність теплових машин та термотрансформаторів.

### Цикл Карно. Теорема Карно.

У 1824 році французький інженер С.Карно вперше запропонував термодинамічний цикл ідеальної теплової машини, який неможливо здійснити в будь-якій реальній машині і який складається з двох ізотерм і двох адіабат (рис.5.8).

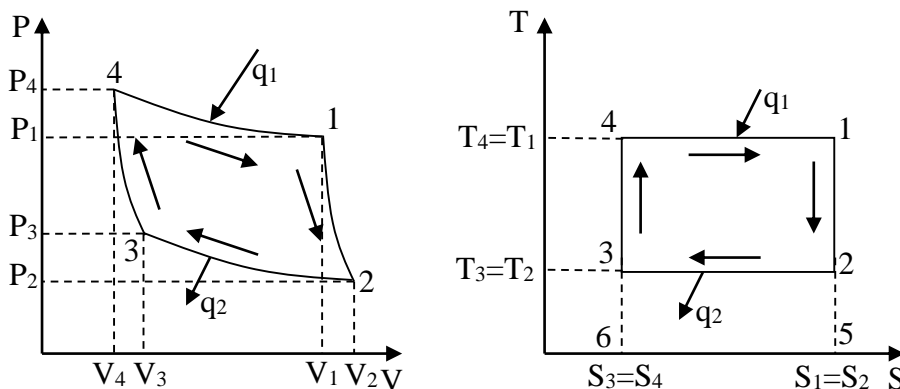


Рис.5.8. Зображення циклу Карно в PV і TS-координатах.

Ділянка 1-2—адіабатний процес розширення робочого тіла (робочий процес);  
 2-3—ізотермічний відвід теплоти  $q_2$  від системи до нижнього джерела теплоти;  
 3-4—адіабатний стиск робочого тіла;  
 4-1—ізотермічний підвід  $q_1$  від верхнього джерела теплоти до термодинамічної системи.

Термічний ККД може бути підрахований за наступними рівняннями

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{S_{63256}}{S_{64156}}.$$

Якщо врахувати рівняння ізотермічних процесів 4-1; 2-3, то вираз для термічного ККД цикла Карно буде мати вигляд

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

$T_2$  – абсолютна температура теплоприймача або нижнього джерела теплоти, К;

$T_1$  – абсолютна температура тепловіддачника або верхнього джерела теплоти, К.

З попереднього рівняння і розглянутого циклу можна зробити такі висновки:

1. Термічний ККД ідеального цикла Карно залежить лише від значень абсолютних температур  $T_2$  і  $T_1$ .  $\eta_t$  – зростає із збільшенням  $T_1$  і зменшенням  $T_2$ .
2.  $\eta_t < 1$ . Уся теплота  $q_1$  не може бути повністю перетворена в роботу.
3. Якщо  $T_1 = T_2$ , то  $\eta_t = 0$ , отже якщо всі тіла системи мають однакову температуру, то неможливе перетворення теплоти в роботу.
4. Теорема Карно. Термічний ККД не залежить від конструкції двигуна і фізичних властивостей робочого тіла, а залежить лише від значень  $T_1$  і  $T_2$ .

Важливість ідеального циклу Карно полягає в тому, що для усіх циклів реальних теплових машин він вказує на верхню межу перетворення теплоти в роботу при заданому діапазоні температур  $T_1$  і  $T_2$ . Для холодильних машин, для порівняння, використовують обернений цикл Карно, який протікає проти годинникової стрілки, а процеси співпадають з прямим циклом Карно. Холодний коефіцієнт оберненого цикла Карно підраховують за формулою

$$\varepsilon_k = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

Ексерсія (технічна роботоздатність) — це максимальна робота, що здійснює робоче тіло, якщо в якості нижнього джерела теплоти приймають оточуюче середовище із своєю температурою.

Ексерсія підраховується за формулою із першого закону термодинаміки

$$\delta q = \delta h - \delta l_0 = c_p dT - V dp.$$