

В технічній термодинаміці поняття термодинамічної системи містить у собі в загальному випадку джерело теплоти, об'єкти роботи та робочі тіла, гази та пару, які беруть участь у термодинамічних перетвореннях. Термодинамічна система може бути відкритою, якщо вона обмінюється речовиною з іншими системами, або закритою. В ізольованій системі відсутній обмін речовиною та енергією з іншими системами. Систему тільки теплоізольовану називають адіабатною.

Процеси термодинамічних перетворень у робочому тілі або в системі пов'язані зі зміною параметрів стану. Оборотною термодинамічний процес за енергетичних перетворень може проходити у взаємних протилежних напрямках без змін у навколишньому середовищі. Умови оборотності процесу - наявність внутрішньої та зовнішньої рівноваги. Внутрішня оборотність містить у собі рівноважність процесу як безперервний ряд рівноважних станів та відсутність тертя. Рівноважний стан, що характеризується однаковими значеннями параметрів, і внутрішньообернений процес робочого тіла зображають графічно в системі координат двох параметрів стану. Зовнішня оборотність - це рівність температур та тиску робочого тіла та навколишнього середовища. В разі відсутності внутрішньої або зовнішньої рівноваги процес є необоротним.

В термодинаміці роботу, тобто передачу енергії між тілами, яка пов'язана з макроскопічним переміщенням тіл, розглядають в кількох формах з врахуванням особливостей механічних процесів у системі. Найзагальнішим можна вважати поняття роботи зміни об'єму, або термодинамічної роботи. Це механічний ефект взаємодії робочого тіла з навколишнім середовищем, який пов'язаний із зміною об'єму  $V$ , коли на всю поверхню робочого тіла діє рівномірно розподілений тиск зовнішнього середовища, що дорівнює тиску робочого тіла  $p$ . Для оборотних процесів роботи  $L$  визначають за виразів

$$\delta L = p dV, \quad L = \int_{V_1}^{V_2} p dV,$$

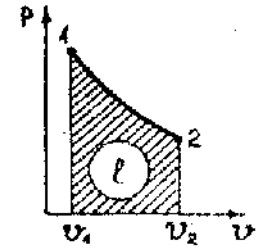
а питома робота  $l$ , тобто робота, віднесена до 1 кг робочого тіла, - через питоми об'єм  $v$ :

$$\delta l = p dv, \quad l = \int_{v_1}^{v_2} p dv.$$

Робота додатна в разі збільшення об'єму, якщо виконується робочим тілом, і дорівнює площі під графіком процесу в  $p, V$ -координатах.

Для необоротного процесу робота  $L_{\text{сф}}$  завжди менше за роботу  $L$  відповідного оборотного процесу. Наприклад, за наявності тертя

$$L_{\text{сф}} = L - L_{\text{тер}} = \int_{V_1}^{V_2} p dV - L_{\text{тер}}.$$



У відкритих системах розглядають наявну роботу, або роботу переміщення, тобто механічний ефект взаємодії робочого тіла з навколишнім середовищем в разі переміщення його в область іншого тиску. В оборотному процесі для тіла маси  $m$  наявну роботу визначають із виразів

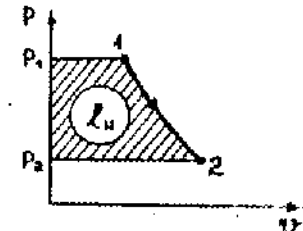
$$\delta L_H = -V dp, \quad L_H = - \int_{p_1}^{p_2} V dp, \quad l_H = - \frac{L_H}{m}.$$

$$\delta l_H = -v dp, \quad l_H = - \int_{p_1}^{p_2} v dp.$$

Наявна робота також додатна, коли виконується тілом, тобто в разі зменшення тиску.

Відмінність наявної роботи від роботи зміни тиску пов'язана з тим, що частина останньої в разі переміщення робочого тіла переходить у потенційну енергію тиску ( $pV$ ) системи робоче тіло - навколишнє середовище:

$$L = L_H + (p_2 V_2 - p_1 V_1), \\ L = L_H + L(pV).$$



Розглянемо простий випадок відкритої системи - стаціонарний потік робочого тіла, що рухається по каналу. Параметри тіла, в тому числі швидкість потоку  $W$ , взяті в середньому значенні за поперечним перерізом. У вхідному перерізі швидкість  $W_1$ , висота стану тіла  $Z_1$ , а на виході каналу - відповідно  $W_2$  і  $Z_2$ . У системі відбуваються такі механічні процеси. Потік може виконувати роботу над зовнішніми об'єктами, діючи на рухомі стінки каналу, лопатки турбін, перемішуючи тверді частинки. Цю роботу називають технічною ( $L_T, L_r$ ). В процесі руху в каналі відбуватиметься зміна кінетичної

енергії потоку  $\frac{m w^2}{2}$  та зовнішньої потенційної енергії  $mgz$ :

Рівняння балансу механічної енергії в системі за оборотного процесу течії може бути записано таким чином:

$$l = L_T + (p_2 v_2 - p_1 v_1) + m \left( \frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2} \right) + mg(z_2 - z_1),$$

$$l = l_T + \Delta(pv) + \Delta\left(\frac{w^2}{2}\right) + g\Delta z,$$

$$l_n = l - \Delta(pv) = l_T + \Delta\left(\frac{w^2}{2}\right) + g\Delta z$$

За наявності тертя  $l_{тер} = l - l_{тер}$ , тоді

$$l_n = l_T + \Delta(pv) + \Delta\left(\frac{w^2}{2}\right) + g\Delta z + l_{тер},$$

$$l_n = l_T + \Delta\left(\frac{w^2}{2}\right) + g\Delta z + l_{тер}.$$

Передача енергії між тілами у формі теплоти пов'язана з мікроскопічними процесами, співзітканням молекул та іншими механізмами теплопровідності, тепловим випромінюванням. Теплота  $Q$  в оборотному процесі може бути обчислена, якщо відома зміна ентропії  $S$  тіла:

$$\delta Q = T ds, \quad Q = \int_{S_1}^{S_2} T ds.$$

Питому теплоту  $q$  визначають через питому ентропію  $s$ :

$$\delta q = \frac{\delta Q}{m} = T ds, \quad q = \int_{S_1}^{S_2} T ds$$

Другий спосіб обчислення теплоти пов'язано з визначенням теплоємності. Відношення теплоти, яка надається тілу /системі/ в процесі, до зміни температури називають середньою теплоємністю тіла:

$$C_m = \frac{Q}{T_2 - T_1}$$

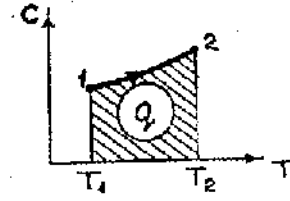
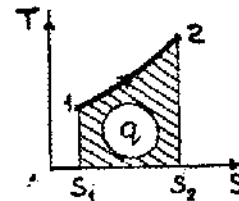
Нескінченно малій зміні температури відповідає справжня теплоємність:

$$C = \frac{\delta Q}{dt}$$

Теплоємність залежить від характеру процесу, стану /насамперед температури/, природи тіла та кількості речовини. Залежно від обраної кількісної одиниці відношення розділяють питому масову  $C$ , об'ємну  $C'$  та мольну  $\mu C$  теплоємності:

$$C = \frac{C}{m} = C' v_n = \frac{\mu C}{\mu}$$

Знаючи теплоємність тіла, теплоту оборотного процесу можна визначити таким чином:  $\delta q = \frac{\delta Q}{m} = C dt$ ,  $q = \int_{T_1}^{T_2} C dt$ . Теплота додатна, коли підводиться до тіла.



У необоротному процесі теплота  $q_{тер} = Q_{тер}$  завжди менша ніж у відповідному оборотному. За наявності тертя  $q_{тер} = q - q_{тер} = \int_{S_1}^{S_2} T ds - q_{тер}$ . Теплота та робота залежать від характеру процесу, тому диференціали теплоти  $\delta q$  та роботи  $\delta l$ ,  $\delta l_n$  не є повними, на відміну від диференціалів параметрів стану.

З першим законом термодинаміки пов'язане поняття енергії тіла /системи/, яка складається із зовнішньої та внутрішньої. Зовнішня енергія тіла у формі потенційної та кінетичної енергії дорівнює їх сумі. Зовнішня енергія через роботу може перетворюватися з однієї форми в іншу та у внутрішню енергію, а також передаватися зовнішнім об'єктам. Внутрішня енергія  $u$  тіла бере участь у термодинамічних перетвореннях через теплоту та роботу. Вона дорівнює сумі потенційної та кінетичної енергій часток тіла і визначається термодинамічними параметрами, тобто є функцією стану:

$$u = \frac{U}{m}; \quad u = f_1(T, v) = f_2(T, p), \quad \oint du = 0$$

Перший закон термодинаміки можна сформулювати таким чином. В якому завгодно термодинамічному процесі різниця теплоти та роботи не залежить від характеру процесу, визначається початковим та кінцевим станами і дорівнює зміні енергії системи /тіла/. Якщо мається на увазі робота над зовнішніми об'єктами, тобто технічна робота, то енергія - це сума внутрішньої та зовнішньої, кінетичної та потенційної енергій.

В еквівалентному формулюванні для простих систем фігурують робота зміни об'єму та внутрішня енергія:  $Q = L + \Delta U$ ,  $Q_{\text{ср}} = L_{\text{ср}} + \Delta U$ . Тоді математичний вираз першого закону термодинаміки для I кг робочого тіла записується так:

$$q = l + \Delta u,$$

$$\delta q = \delta l + du,$$

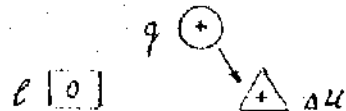
$$q_{\text{ср}} = l_{\text{ср}} + \Delta u.$$

Відповідно до цих виразів для конкретних процесів складають схеми енергобалансу, які враховують знаки доданків та напрям передачі.

Теплота  $> 0 - (+)$ ,  $< 0 - (-)$

Робота  $- [+]$   $[-]$ ,  $\Delta u, du$   $\triangle +$   $\triangle -$

Наприклад, якщо в процесі теплоту, яку підводять до тіла, використовують на збільшення внутрішньої енергії:



Для другої форми запису математичного виразу першого закону використовують питому ентальпію:

$$h = \frac{H}{m} = u + pv, \quad q = l_h + \Delta h,$$

$$\delta q = \delta l_h + dh.$$

Часткові випадки першого закону термодинаміки:

в ізобарному процесі ( $p = \text{const}$ ,  $\delta l_h = -vdp = 0$ )

$$\delta q = dh, \quad q = \Delta h, \quad Q = \Delta H;$$

в ізохорному процесі ( $v = \text{const}$ ,  $\delta l = pdv = 0$ )

$$\delta q = du, \quad q = \Delta u;$$

для адіабатного процесу ( $\delta q = 0$ )

$$l = -\Delta u, \quad l_h = -\Delta h.$$

Для ідеального газу потенційна енергія часток робочого тіла дорівнює нулю, внутрішня енергія дорівнює їх кінетичній енергії і тому залежить тільки від температури. Звідси в ізотермічному процесі з ідеальним газом ( $T = \text{const}$ ,  $du = 0$ )

$$dh = d(u + pv) = d(u + RT) = 0,$$

У замкненому круговому процесі /циклі/

$$\oint du = \oint dh = 0,$$

$$Q = L = L_h.$$

Для стаціонарного одновимірного потоку з врахуванням рівняння балансу механічної енергії

$$q = \Delta u + l_r + \Delta(pv) + \Delta\left(\frac{w^2}{2}\right) + g\Delta z,$$

$$\delta q = dh + \delta l_r + d\left(\frac{w^2}{2}\right) + gdz.$$

## 1.2. Контрольні запитання

1. Визначення роботи зміни об'єму  $l$ .
2. Визначення наявної роботи  $l_h$ .
3. Що таке потенційна енергія тиску?
4. Визначення технічної роботи  $l_r$ .
5. Зв'язок між  $l$  та  $l_h$ ;  $l_h$  та  $l_r$ .
6. Теплоємність та її використання для обчислення теплоти процесу.
7. Обчислення теплоти оборотного процесу та ентропії.
8. Умови оборотності процесу.

9. Визначення теплоти та роботи для внутрішньо необоротного процесу.

10. Обчислення теплоти в разі відсутності термічної рівноваги.

11. Обчислення роботи в разі відсутності механічної рівноваги.

12. Математична відмінність теплоти та роботи від зміни параметрів стану в процесі.

13. Філософське розуміння першого закону термодинаміки.

14. Формулювання першого закону термодинаміки.

15. Існування якого параметра обґрунтовується першим законом термодинаміки?

16. Вираз першого закону термодинаміки для кругових процесів.

17. Математичні вирази першого закону термодинаміки.

18. Часткові процеси в термодинаміці та в реальних об'єктах.

19. Прикладання першого закону термодинаміки до ізохорного /ізо-барного, ізотермічного, адіабатного/ процесу.

20. Перший закон термодинаміки для потоку /відкритої системи/.

21. Перший закон термодинаміки для необоротних процесів.

22. В які види може перетворюватись енергія через роботу?

23. В які види може перетворюватись енергія через теплоту?

24. Якщо процес складається з декількох частин, то як, знаючи їх характеристики, визначити ці характеристики, наприклад роботу, для всього процесу?

### 1.3. Розв'язування задач та прикладів

1. Газ при  $p = 1,6 \text{ МПа}$  та густині  $\rho = 3,0 \text{ кг/м}^3$  в разі охолодження в теплообміннику ізобарно стискується із зменшенням об'єму в 4 рази. Визначити роботу зміни об'єму та наявну роботу за рівноважного проходження процесу.

Дано:

$$p = \text{const}$$

$$p = 1,6 \text{ МПа}$$

$$\rho = 3,0 \text{ кг/м}^3$$

$$\frac{v_1}{v_2} = 4$$

$$\ell, \ell_n = ?$$

Розв'язання. Початковий об'єм

$$v_1 = \frac{1}{\rho_1} = 1/3,0 = 0,333 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Об'єм при завершенні процесу

$$v_2 = \frac{v_1}{4} = \frac{0,333}{4} = 0,0833 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Питома робота в ізобарному оберненому процесі

$$\ell = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p(v_2 - v_1) = 1,6(0,0833 - 0,333) = -0,400 \text{ МДж/кг}$$

Наявна робота ізобарного процесу  $\ell_n = - \int_{p_1}^{p_2} v dp = 0$ .

2. В процесі рівноважного охолодження газу в закритій посудині з відводом  $500 \text{ кДж/кг}$  теплоти при завершенні процесу досягнена температура  $t_2 = 27^\circ\text{C}$ . Визначити зміну ентропії газу в даному процесі та початкову температуру процесу  $T_1$ . Теплоємність процесу  $C = 1,2 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ .

Дано:

$$q = -500 \text{ кДж/кг}$$

$$t_2 = 27^\circ\text{C}$$

$$C = 1,2 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$$

$$\Delta S, T_1 = ?$$

Розв'язання. Зміна ентропії в оборотному процесі

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta q}{T} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c dT}{T} = c \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Початкова температура процесу

$$q = \int_{T_1}^{T_2} c dT = c(T_2 - T_1) = c(t_2 - t_1)$$

$$t_1 = t_2 - \frac{q}{c} = 27 + \frac{500}{1,2} = 443,7^\circ\text{C} = 716,8 \text{ K}$$

$$\Delta S = 1,2 \ln \frac{27 + 273}{443,7 + 273} = -0,97 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$$

3\*

II

3. При тязі в нерухоми каналі тиск газу зменшився в 6 разів, а густина - в 4 рази; при цьому швидкість потоку зростає від 50 до 950 м/с. Визначити роботу розширення та наявну роботу в цьому процесі, якщо  $p_1 = 25$  бар, а  $v_1 = 0,12$  м<sup>3</sup>/кг. Як зміняться при цьому калоричні параметри газу  $u$ ,  $h$ ,  $s$ , якщо процес проходить адіабатно?

Дано:

$$\begin{aligned} p_1/p_2 &= 6 \\ \rho_1/\rho_2 &= 4 \text{ або } v_2/v_1 = 4 \\ W_1 &= 50 \text{ м/с} \\ W_2 &= 950 \text{ м/с} \\ p_1 &= 25 \text{ бар} \\ v_1 &= 0,12 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad \Delta t = 0 \end{aligned}$$

$$\ell, \ell_n - ? \quad \Delta u, \Delta h, \Delta s \text{ при } q = 0 - ?$$

Розв'язання. За балансовим рівнянням робота

$$\ell = \ell_r + \Delta\left(\frac{W^2}{2}\right) + \Delta(pv), \quad (\Delta t = 0).$$

Для нерухоми каналу  $\ell_r = 0$ , а зміна кінетичної енергії  $K$

$$\Delta K = \frac{W_2^2 - W_1^2}{2} = \frac{950^2 - 50^2}{2} = 450 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}.$$

Зміна потенційної енергії тиску

$$\begin{aligned} \Delta(pv) &= p_2 v_2 - p_1 v_1 = p_1 v_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \frac{v_2}{v_1} - 1 \right) = \\ &= 25 \cdot 10^5 \cdot 0,2(1,6 \cdot 4 - 1) = -100 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}. \end{aligned}$$

Тоді  $\ell = \Delta K + \Delta(pv) = 450 - 100 = 350$  кДж/кг; наявна робота  $\ell_n = \Delta K = 450$  кДж/кг. Для калоричних параметрів при  $q = 0$  дістанемо  $\Delta u = -\ell = -350$  кДж/кг;  $\Delta h = -\ell_n = -450$  кДж/кг;

$$\Delta s = \int \frac{\delta q}{T} = 0, \text{ або } s_2 = s_1.$$

Отже,  $s = \text{const}$ , тобто рівноважний адіабатний процес є ізоентропним, який проходить за сталою ентропією.

4. В ізобарному процесі при  $p = 3$  бар об'єм газу зростає від 0,5 до 2,5 м<sup>3</sup>, а зміна внутрішньої енергії дорівнює 800 кДж. Визначити роботу газу, а також з'ясувати, чи виконуються в цьому процесі умови внутрішньої рівноваги. Обчислення виконати для двох випадків: а/  $Q_{\text{ср}} = 1200$  кДж; б/  $Q_{\text{ср}} = 600$  кДж. Побудувати схеми енергобалансу.

Дано:

$$\begin{aligned} p &= \text{const} \\ p &= 3 \text{ бар} \\ v_1 &= 0,5 \text{ м}^3 \\ v_2 &= 2,5 \text{ м}^3 \\ \Delta u &= +800 \text{ кДж} \\ a/Q_{\text{ср}} &= +1200 \text{ кДж} \\ b/Q_{\text{ср}} &= +600 \text{ кДж} \end{aligned}$$

$$L_{\text{ср}}, L_{\text{гср}} - ?$$

Розв'язання. Робота рівноважного ізобарного процесу

$$L = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p(v_2 - v_1) = 3 \cdot 10^5 (2,5 - 0,5) = 600 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 600 \text{ кДж}.$$

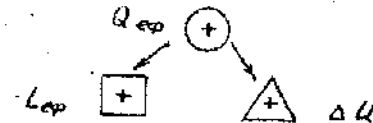
а/ Ефективна /корисна/ робота процесу

$$L_{\text{ср}} = Q_{\text{ср}} - \Delta u = 1200 - 800 = 400 \text{ кДж}.$$

Робота подолання опорів

$$L_{\text{гср}} = L - L_{\text{ср}} = 600 - 400 = 200 \text{ кДж}.$$

В даному випадку  $L > L_{\text{ср}}$ , тобто  $L_{\text{гср}} > 0$ , що підтверджує необоротний характер процесу:



Підведена теплота йде на виконання роботи та збільшення внутрішньої енергії газу.

б/ Ефективна /корисна/ робота процесу

$$L_{\text{ср}} = Q_{\text{ср}} - \Delta U = 600 - 800 = -200 \text{ кДж};$$

$$L_{\text{тер}} = L - L_{\text{ср}} = 600 + 200 = 800 \text{ кДж}.$$

Даний процес також проходить необоротно:



Підведена теплота та робота, яку виконано над тілом, йдуть на збільшення внутрішньої енергії.

Слід звернути увагу на те, що в цьому випадку, не зважаючи на розширення газу /  $u_2 > u_1$  /, ефективна робота процесу виявилася від'ємною, що пояснюється великими енерговтратами, для компенсації яких потрібні додаткові витрати зовні.

5. При енергетично ізолюванні течії /  $\delta q = 0$ ,  $\delta l_r = 0$  / швидкість газового потоку в умовах рівноважного процесу змінюється від 150 до 650 м/с. Визначити зміну ентальпії потоку. Як зміняться результати обчислення, якщо внаслідок енергетичних втрат кінцева швидкість зменшилась до 600 м/с?

Дано:

$$\delta q = 0, \quad \delta l_r = 0, \quad \Delta z = 0$$

$$w_1 = 150 \text{ м/с}$$

$$w_2 = 650 \text{ м/с}$$

$$w_2 = 600 \text{ м/с} / \delta q_{\text{ср}} = 0 /$$

$$\Delta h = ?$$

Розв'язання. При оборотній течії рівняння першого закону термодинаміки  $q = \Delta h + l_r + \Delta(\frac{w^2}{2}) + g \Delta z$ , за умовою  $q = l_r = \Delta z = 0$ .

$$\text{Дістанемо } \Delta h = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} = - \frac{650^2 - 150^2}{2} = -200 \text{ кДж/кг. За необс-}$$

$$\text{ротної течії } q_{\text{ср}} = \Delta h + l_{\text{ср}} = \Delta h + l - l_{\text{тер}} = \Delta h + l_r + \Delta(\frac{w^2}{2}) + g \Delta z,$$

$$q_{\text{ср}} = l_r = \Delta z = 0,$$

$$\Delta h = - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} = - \frac{600^2 - 150^2}{2} = -168,8 \text{ кДж/кг}.$$

Для обох випадків використовують одну й ту саму формулу, яка визначає еквівалентність між зростанням швидкісного напору та зменшенням ентальпії, проте числові значення цих величин виявляються різними.

#### 1.4. Домашнє завдання

Домашнє завдання оформлюють аналогічно прикладам /див. під-розд: 1.3/. Перед задачею записують її номер з варіантом /наприклад, 1-5/. Для зручності перевірки відповіді в одиницях СІ слід підкреслити та навести в кінці задачі. Значення вихідних даних для наведених задач вибирають з відповідних таблиць за останньою цифрою номера студента у списку академічності.

Задача 1. За заданого збільшення внутрішньої енергії та ентальпії газу в процесі визначити теплоту, термодинамічну та механічну роботу рівноважного процесу. Значення  $\Delta U$ ,  $\Delta H$  та характер процесу взяти з табл. 1.1. Побудувати та пояснити схеми енергобалансу.

Таблиця 1.1

| Остання цифра номера | $\Delta U$ , кДж | $\Delta H$ , кДж | Характер процесу   |
|----------------------|------------------|------------------|--------------------|
| 1                    | 800              | 1120             | $v = \text{const}$ |
| 2                    | 800              | 1120             | $p = \text{const}$ |
| 3                    | 800              | 1120             | $s = \text{const}$ |
| 4                    | 500              | 700              | $v = \text{const}$ |
| 5                    | 500              | 700              | $p = \text{const}$ |
| 6                    | 500              | 700              | $s = \text{const}$ |
| 7                    | 600              | 850              | $v = \text{const}$ |
| 8                    | 600              | 850              | $p = \text{const}$ |
| 9                    | 600              | 850              | $s = \text{const}$ |
| 0                    | 400              | 530              | $v = \text{const}$ |

Задача 2. За оберненої ізобарної течії газу, витрата якого  $m =$  кг/с, віддається технічна робота /потужність/  $N_t$ , Вт. Визначити початкову швидкість потоку, якщо кінцева  $w_2 =$  м/с.

Значення  $m$ ,  $N_T$ ,  $w_z$  взяті з табл. 1.2.

Таблиця 1.2

| Остання цифра номера | $m$ , кг/с | $N_T$ , кВт | $w_z$ , м/с |
|----------------------|------------|-------------|-------------|
| 1                    | 30         | 3500        | 100         |
| 2                    | 20         | 2400        | 100         |
| 3                    | 20         | 1500        | 100         |
| 4                    | 40         | 3200        | 0           |
| 5                    | 10         | 1750        | 100         |
| 6                    | 40         | 3000        | 100         |
| 7                    | 10         | 800         | 0           |
| 8                    | 20         | 875         | 50          |
| 9                    | 20         | 3500        | 100         |
| 0                    | 40         | 1750        | 50          |

Задача 3. В ізотермічному процесі зміни стану тіла при  $T =$  К зміна ентропії  $\Delta S =$  кДж/К, зростання ентальпії  $\Delta H =$  кДж. З'ясувати, чи виконуються в процесі умови внутрішньої оборотності, якщо зовнішня наведена робота  $L_{н,сф} =$  кДж.

Значення  $T$ ,  $\Delta S$ ,  $\Delta H$ ,  $L_{н,сф}$  взяті з табл. 1.3.

Таблиця 1.3

| Остання цифра номера | $T$ , К | $\Delta S$ , кДж/К | $\Delta H$ , кДж | $L_{н,сф}$ , кДж |
|----------------------|---------|--------------------|------------------|------------------|
| 1                    | 500     | 2                  | 400              | 600              |
| 2                    | 400     | 2                  | 400              | 500              |
| 3                    | 500     | 2                  | 300              | 500              |
| 4                    | 400     | 3                  | 400              | 600              |
| 5                    | 300     | 3                  | 400              | 600              |
| 6                    | 500     | 4                  | 800              | 1200             |
| 7                    | 400     | 4                  | 800              | 1200             |
| 8                    | 500     | 4                  | 600              | 1000             |
| 9                    | 400     | 5                  | 800              | 1200             |
| 0                    | 300     | 4                  | 500              | 700              |

Задача 4. Круговий процес /цикл/ складається з трьох процесів:  $ab$ ,  $bc$  та  $ca$ ; сумарна теплота циклу дорівнює 500 кДж. Доповнити у табл. 1.4 величини, які відсутні в рядку, який відповідає останній цифрі номера студента у списку академгрупи.

Таблиця 1.4

| Остання цифра номера | $Q$ , кДж |      |      | $L$ , кДж |      |      | $\Delta U$ , кДж |      |      |
|----------------------|-----------|------|------|-----------|------|------|------------------|------|------|
|                      | $ab$      | $bc$ | $ca$ | $ab$      | $bc$ | $ca$ | $ab$             | $bc$ | $ca$ |
| 1                    | 200       |      |      |           | 700  |      | 200              | 0    |      |
| 2                    |           | -200 |      |           |      | -100 |                  | -200 | 0    |
| 3                    | 700       |      |      | 200       | 500  |      |                  | -500 |      |
| 4                    |           | 0    |      |           | 300  | -600 |                  |      | 300  |
| 5                    | 0         |      |      |           | 700  |      | 200              | 0    |      |
| 6                    |           | 700  |      |           |      | -200 |                  | 0    | -200 |
| 7                    | 800       |      |      |           | 0    |      | 200              | -200 |      |
| 8                    |           | 0    |      |           | 500  | -200 |                  |      | 0    |
| 9                    | 800       |      |      | 800       | 300  |      |                  | -300 |      |
| 0                    |           | 700  |      |           | 700  | 0    |                  |      | -200 |

Задача 5. Випробовуючи двигун потужності  $N =$  кВт, використовують галію. Двигун працює на подолання сил тертя. 20% теплоти розсіюється в навколишньому середовищі, решта відводиться водою, яка охолоджує галій. Визначити витрату води  $m$ , кг/год, якщо її температура  $t_1 =$  °С,  $t_2 =$  °С, теплоємність  $C =$  = 4,19 кДж/(кг·К). Значення  $N$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  взяті з табл. 1.5.

Таблиця 1.5

| Остання цифра номера | $N$ , кВт | $t_1$ , °С | $t_2$ , °С |
|----------------------|-----------|------------|------------|
| 1                    | 2         | 3          | 4          |
| 1                    | 50        | 80         | 10         |
| 2                    | 100       | 70         | 15         |
| 3                    | 70        | 80         | 15         |
| 5                    | -         | 4-5748     |            |

Закінчення табл. 1.5

| 1 | 2   | 3  | 4  |
|---|-----|----|----|
| 4 | 65  | 85 | 15 |
| 5 | 120 | 80 | 10 |
| 6 | 80  | 85 | 5  |
| 7 | 55  | 80 | 15 |
| 8 | 75  | 60 | 10 |
| 9 | 90  | 50 | 15 |
| 0 | 60  | 70 | 10 |

### 1.5. Картки для самостійної роботи

#### Варіант № 1.

1. Газ масою  $m = 0,5$  кг з параметрами  $p_1 = 0,5$  МПа,  $v_1 = 0,1$  м<sup>3</sup>/кг знаходиться у циліндрі з поршнем. У результаті процесу, рівняння якого  $p v^{1,2} = \text{const}$ , газ переходить у стан, який характеризується параметром  $v_2 = 0,3$  м<sup>3</sup>/кг. Визначити роботу при оборотному протіканні процесу /кДж/.

2. Залежність теплоємності газу  $N_2$  від температури у процесі  $v = \text{const}$  визначають співвідношенням  $\mu C_v = 20,223 + 0,00539 t$ , кДж/(кмоль·К). Визначити теплоту (кДж/кг) і середню теплоємність процесу (кДж/(кг·К)) при охолодженні газу у закритому балоні від температури  $t_1 = 600$  до  $t_2 = 150$  °С.

3. У посудину, яка містить 10 кг води при температурі 20 °С, поміщено електронагрівник, потужність якого 1,5 кВт. Визначити, за який час /хв/ вода нагріється до температури 100 °С, теплоємність води 4,19 кДж/(кг·К). Теплові втрати в оточуюче середовище – 10%.

4. Газ  $N_2$  масою 1,5 кг змінює свій стан під час процесу відповідно до умови задачі 2. Визначити роботу і зміну внутрішньої енергії газу /кДж/. Побудувати схему енергобалансу.

5. Цикл складається з процесів 12, 23, 31. У процесі 12  $Q_{12} = 100$  кДж,  $\Delta U_{12} = 70$  кДж. У процесі 23 при  $v = \text{const}$  внутрішня енергія зменшується на 95 кДж. Визначити роботу циклу і процесу 31, який протікає адіабатно.

#### Варіант № 2.

1. У циліндрі з поршнем необхідно дослідити процес з газом, в якому зв'язок між параметрами визначають співвідношенням  $p = 0,1/v$  /Р – МПа,  $v$  – м<sup>3</sup>/кг/. Якою має бути робота зміни об'єму (кДж/кг) при оборотному протіканні процесу від  $v = 0,2$  до  $v_2 = 1$  м<sup>3</sup>/кг?

2. У посудині, місткості якої 200 л, знаходиться азот під тиском  $p_1 = 5$  МПа і температурою  $t_1 = 30$  °С. Яку кількість теплоти /кДж/ необхідно підвести, щоб температура газу /процес  $v = \text{const}$ / підвищилась до  $t_2 = 300$  °С? Вважаємо газ ідеальним з теплоємністю  $C_v = 0,75$  кДж/(кг·К).

3. При знаходженні потужності двигуна гальмуванням вода, яка охолоджує гальма, нагрівається на 30 К. Витрати води  $m = 1700$  кг/год. Знайти потужність двигуна /кВт/, якщо 20% теплоти тертя розсіюється у навколишнє середовище.

4. Для умов задачі 1 знайти теплоту процесу /кДж/ з 0,3 кг газу, якщо внутрішня енергія газу під час процесу стала. Побудувати схему енергобалансу.

5. Цикл складається з чотирьох процесів: 12, 23, 34, 41. Характер процесів 12, 34 –  $v = \text{const}$ . У процесах 23, 41 теплообмін відсутній.  $Q_{12} = 7,165$  ккал,  $Q_{34} = -11,942$  ккал,  $L_{23} = -90$  кДж. Визначити  $L_{41}$  і зміну внутрішньої енергії в кожному процесі /кДж/.

#### Варіант № 3.

1. Газ при  $p_1 = 0,1$  МПа,  $v_1 = 0,8$  м<sup>3</sup>/кг оборотно переходить у стан з  $v_2 = 1,6$  м<sup>3</sup>/кг у процесі, який описується рівнянням  $p/v = \text{const}$ . Знайти роботу зміни об'єму (кДж/кг).

2. Повітря у кількості 5 м<sup>3</sup> під тиском  $p_1 = 0,1$  МПа і при температурі  $t_1 = -10$  °С нагрівається у теплообміннику у процесі  $p = \text{const}$  до  $t_2 = 50$  °С. Знайти кількість підведеної до повітря теплоти /кДж/, якщо вважати газ ідеальним з теплоємністю  $C_p = 1$  кДж/(кг·К).

3. Автомобіль масою 1,5 т, маючи швидкість 40 км/г, зупиняється під дією гальм. Маса гальм 15 кг, теплоємність матеріалу гальмівних частин 0,46 кДж/(кг·К). Обчислити кінцеву температуру гальм  $t_2$  (°С).



3. Автомобіль, маса якого 1,3 т, рухаючись зі швидкістю 90 км/год, зупиняється під дією гальм. Маса гальм 20 кг, теплосмність матеріалу гальмівних частин 0,46 кДж/(кг·К). Обчислити кінцеву температуру гальм  $t_2$ , °C, якщо початкова  $t_1 = 18$  °C. Втра-ти теплоти у навколишнє середовище 10%.

4. Для умов задачі 1 визначити зміну внутрішньої енергії 9 кг газу у процесі, якщо до газу підводиться 2168 кДж теплоти. Побуду-вати схему енергобалансу.

5. Цикл, в якому до робочого тіла підводиться 31,048 ккал теп-лоти, складається з процесу 1a2, в якому робота дорівнює 160 кДж і процесу 2a1, в якому внутрішня енергія збільшується на 90 кДж. Знай-ти  $Q_{1a2}$ ,  $\Delta U_{1a2}$ ,  $t_{2a1}$ ,  $Q_{2a1}$ , /кДж/. Чому дорівнюватиме ро-бота адіабатного процесу 1c2?

#### Варіант № 10.

1. Газ масою 0,3 кг з параметрами  $p_1 = 0,2$  МПа,  $v_1 = 0,4$  м<sup>3</sup>/кг знаходиться у циліндрі з поршнем. У результаті процесу, рівняння яко-го  $p v^{1,4} = \text{const}$ , газ переходить у стан, який характеризують па-раметром  $p_2 = 0,8$  МПа. Визначити роботу /кДж/ при оборотному проті-канні процесу.

2. Залежність мольної теплосмності газу  $O_2$  від температури під час процесу  $v = \text{const}$  визначають співвідношенням  $\mu_{cv} = 21,266 + 0,00697 t$  (кДж/(моль·К)). Знайти теплоту /кДж/ і середню теплосмність процесу /кДж/(кг·К) під час нагрівання газу у закритому балоні від температури  $t_1 = 0$  до  $t_2 = 300$  °C.

3. У посудину, яка містить 2,5 кг води при температурі 20 °C, поміщено електронагрівник потужністю 0,6 кВт. Визначити, за скільки хвилин вода нагріється до температури 100 °C, теплосмність води 4,19 кДж/(кг·К). Втра-ти теплоти у навколишнє середовище 20%.

4. Газ  $O_2$  масою 3,5 кг змінює свій стан під час процесу від-повідно до умов задачі 2. Визначити роботу і зміну внутрішньої енер-гії газу /кДж/. Побудувати схему енергобалансу.

5. Цикл складається з процесів 12, 23, 31. У процесі 12  $\Delta U_{12} = 210$  кДж,  $Q_{12} = 300$  кДж. У процесі 23 при  $v = \text{const}$  внутріш-

ня енергія зменшується на 285 кДж. Визначити роботу циклу і проце-су 31, який протікає адіабатно.

#### Варіант № 11.

1. Газ при  $p_1 = 1000$  кПа і густині  $\rho_1 = 1$  кг/м<sup>3</sup> змінює свій об'єм у 5 разів під час процесу  $p = \text{const}$  при охолодженні у про-точному теплообміннику. Визначити роботу оборотного процесу /кДж/.

2. У оборотному ізотермічному процесі при  $t = 227$  °C ентропія 2 кг газу збільшується на 0,46 кДж/(кг·К). Визначити теплоту процесу.

3. У циліндрі з поршнем під час процесу  $p v = \text{const}$  об'єм газу  $v_1 = 3$  м<sup>3</sup> при  $p_1 = 10$  бар збільшується у 4 рази. Експеримен-тально визначено, що робота процесу дорівнює 2300 кДж. Чи дотриму-ється під час процесу умова оборотності? Визначити роботу /кДж/ в ра-зі оборотного протікання процесу.

4. Внутрішня енергія робочого тіла зменшилась на 50 кДж, ента-льпія – на 70 кДж. Визначити теплоту /кДж/ і малу роботу /кДж/ за ізохорної зміни стану.

5. Круговий процес /цикл/ складається з трьох процесів: ab, bc, ca; сумарна робота циклу дорівнює 150 кДж.  $Q_{ab} = 23,80$  ккал,  $\Delta U_{ab} = -100$  кДж,  $L_{bc} = Q_{bc} = 200$  кДж. Знайти  $L_{ab}$ ,  $\Delta U_{bc}$ ,  $L_{ca}$ ,  $Q_{ca}$ ,  $\Delta U_{ca}$  /кДж/.

#### Варіант № 12.

1. Визначити роботу /кДж/ ізобарного розширення газу від  $v_1 = 2$  до  $v_2 = 6$  м<sup>3</sup>, якщо  $p_{\text{зад}} = 4$  бар,  $p_{\text{атм}} = 760$  мм рт.ст. Чо-му дорівнює зміна потенціальної енергії тиску газу у цьому процесі?

2. При ізобарному оборотному протіканні газу технічна робота, яка віддається зовнішнім об'єктам, дорівнює 120 кДж/кг. Знайти кін-цеву швидкість потоку /м/с, якщо початкова  $w_1 = 500$  м/с.

3. Під час ізотермічного процесу  $T = 300$  К відводиться 600 кДж теплоти, при цьому ентропія системи зменшується на 2 кДж/К. Чи дотримується під час процесу умова оборотності? Визначити тепло-ту /кДж/ в разі оборотного протікання процесу.

4-5748

4. У адіабатному процесі стискування у компресорі внутрішня енергія робочого тіла збільшилась на 500 МДж, а ентальпія - на 700 МДж. Визначити теплоту, роботу зміни об'єму і наявну роботу процесу /МДж/.

5. Круговий процес /цикл/ складається з процесів 1a2 і 2a1. Сумарна теплота цилу  $Q = -30$  кДж,  $L_{1a2} = 70$  кДж,  $\Delta U_{1a2} = 30$  кДж. Знайти  $Q_{1a2}$ ,  $L_{2a1}$ ,  $Q_{2a1}$  /кДж/.

#### Варіант № 13.

1. У оборотному процесі потенціальна енергія тиску робочого тіла змінюється від 100 до 200 кДж. Наявна робота дорівнює 1000 кДж. Визначити роботу зміни об'єму /кДж/.

2. У рівноважному процесі зміна стану газу у закритому балоні /теплоємність газу  $C_v = 0,8$  кДж/(кг·К)/ з відведенням 80 кДж/кг теплоти початкова температура  $T_1 = 600$  К. Визначити температуру у кінці процесу.

3. В ізобарному процесі нагрівання газу зміна внутрішньої енергії газу дорівнює 200 кДж, при цьому від нагрівника до газу підводиться 1000 кДж теплоти. Визначити роботу газу /кДж/. Чи дотримуються під час процесу умови оборотності, якщо  $p = 0,5$  МПа,  $U_1 = 0,5$  м<sup>3</sup>,  $U_2 = 2,5$  м<sup>3</sup>? Визначити роботу /кДж/ при оборотному протіканні процесу.

4. До газу, який знаходиться у циліндрі під рухомих поршнем / $p = const$ /, зовні підводиться 1000 кДж теплоти. При цьому виконується питома робота 100 кДж/кг. Визначити зміну внутрішньої енергії /кДж/, якщо кількість газу 7 кг.

5. Газ зі стану 1 переходить у стан 2 шляхом 1a2. При цьому до газу підводиться 100 кДж теплоти і над газом виконується робота, яка дорівнює 400 кДж. Якими будуть робота і знак зміни об'єму у деякому процесі 2a1, в якому відводиться 300 кДж теплоти?

#### Варіант № 14.

1. У циліндрі з поршнем у оборотному процесі  $pV = const$  газ об'ємом  $U_1 = 5$  м<sup>3</sup> при  $p_1 = 100$  кПа розширюється у 10 разів. Визначити роботу процесу /кДж/.

2. Визначити теплоту процесу /кДж/, теплоємність якого визначать виразом  $C = 1,2 + 2 \cdot 10^{-4} T$  (кДж/(кг·К)) в разі зміни температури 2 кг робочого тіла у процесі від 400 до 600 К.

3. При ізотермічному процесі / $T = 400$  К/ зміна стану системи робота дорівнює 1500 кДж. Зміна внутрішньої енергії системи 500 кДж. Знайти теплоту процесу /кДж/. Чи виконуються під час процесу умови оборотності, якщо ентальпія системи збільшилась на 5 кДж/кг? Яким би було значення теплоти, якщо процес протікав оборотно?

4. Під час ізобарного процесу нагрівання у камері згорання внутрішня енергія робочого тіла збільшилась на 200 кДж, ентальпія - на 300 кДж. Визначити теплоту і роботу процесу.

5. Круговий процес /цикл/ складається з процесів 1a2 і 2a1, сумарна робота цилу 100 кДж,  $L_{1a2} = 200$  кДж,  $Q_{1a2} = 300$  кДж. Знайти  $\Delta U_{1a2}$ ,  $L_{2a1}$ ,  $Q_{2a1}$ ,  $\Delta U_{2a1}$  /кДж/.

#### Варіант № 15.

1. Газ при  $p = 2000$  кПа і густині  $\rho_1 = 2$  кг/м<sup>3</sup> ізобарно стискується, зменшуючи об'єм у 5 разів. Визначити роботу оборотного процесу (кДж/кг).

2. Під час оборотного ізотермічного процесу при  $t = 727$  °С ентальпія 4 кг газу збільшується на 0,75 кДж/(кг·К). Визначити теплоту процесу /кДж/.

3. Під час процесу  $pV = const$  об'єм  $U_1 = 1$  м<sup>3</sup> газу при  $p_1 = 1$  бар збільшується у 4 рази. Робота процесу дорівнює 138,6 кДж. Чи дотримуються під час процесу умови оборотності? Визначити роботу /кДж/ в разі оборотного протікання процесу.

4. Внутрішня енергія робочого тіла під час охолодження у закритій посудині / $U = const$ / зменшилась на 70 кДж, ентальпія - на 100 кДж. Визначити теплоту і наявну роботу /кДж/.

5. Круговий процес /цикл/ складається з трьох процесів: ab, bc, ca, сумарна робота цилу дорівнює 50 кДж,  $Q_{ab} = -23,88$  ккал,  $\Delta U_{ab} = -100$  кДж,  $Q_{bc} = 100$  кДж,  $L_{bc} = 200$  кДж. Знайти  $L_{ab}$ ,  $\Delta U_{bc}$ ,  $L_{ca}$ ,  $Q_{ca}$ ,  $\Delta U_{ca}$  /кДж/.

7\*

Варіант № 16.

1. Визначити роботу /кДж/ оборотного процесу ізобарного розширення газу від  $V_1 = 1 \text{ м}^3$  до  $V_2 = 3 \text{ м}^3$ , якщо  $p_{\text{зад}} = 9 \text{ бар}$ ,  $p_{\text{атм}} = 750 \text{ мм рт.ст.}$ . Яка частина цієї роботи буде наявною, зовнішньою корисною роботою газу?

2. При ізобарному оборотному протіканні газу технічна робота, яка віддається зовнішнім об'єктам, дорівнює  $105 \text{ кДж/кг}$ . Визначити кінцеву швидкість потоку (м/с), якщо початкова  $W_1 = 500 \text{ м/с}$ . За рахунок якої енергії газ виконує технічну роботу під час процесу?

3. У ізотермічному процесі  $T = 500 \text{ К}$  відводиться  $2500 \text{ кДж}$  теплоти, при цьому ентропія системи зменшується на  $4 \text{ кДж/К}$ . Чи дотримуватися під час процесу умови оборотності? Визначити теплоту /кДж/ при оборотному протіканні процесу.

4. У адіабатному процесі у компресорі внутрішня енергія робочого тіла збільшилась на  $100 \text{ кДж}$ , а ентальпія - на  $120 \text{ кДж}$ . Визначити теплоту, роботу зміни об'єму і наявну роботу процесу.

5. Цикл складається з процесів 1a2 і 2b1. Сумарна теплота циклу дорівнює  $100 \text{ кДж}$ ,  $Q_{1a2} = -500 \text{ кДж}$ ,  $\Delta U_{1a2} = 100 \text{ кДж}$ . Знайти  $Q_{1a2}$ ,  $Q_{2b1}$ ,  $\Delta U_{2b1}$ ,  $Q_{2b1}$ .

Варіант № 17.

1. У оборотному процесі потенціальна енергія тиску змінилась від  $300$  до  $200 \text{ кДж}$ . Наявна робота дорівнює  $600 \text{ кДж}$ . Визначити роботу зміни об'єму /кДж/.

2. У рівноважному ізохорному процесі зміна стану газу /теплоємність  $C_v = 1,0 \text{ кДж/(кг·К)}$ / з відведенням  $150 \text{ кДж/кг}$  теплоти, початкова температура  $T_1 = 500 \text{ К}$ . Знайти температуру  $T_2$  у кінці процесу.

3. У ізобарному процесі зміна внутрішньої енергії газу дорівнює  $100 \text{ кДж}$ , при цьому від навколишнього середовища підводиться  $500 \text{ кДж}$  теплоти. Визначити роботу газу /кДж/. Чи дотримуватися під час процесу умови оборотності, якщо  $p = 0,2 \text{ МПа}$ ,  $V_1 = 0,5 \text{ м}^3$ ,  $V_2 = 2,5 \text{ м}^3$ . Знайти роботу при оборотному протіканні процесу.

4. До газу, який знаходиться у циліндрі під рухомим поршнем /  $p = \text{const}$  / зовні підводиться  $500 \text{ кДж}$  теплоти. При цьому виконується питома робота  $200 \text{ кДж/кг}$ . Визначити зміну внутрішньої енергії /кДж/, якщо маса газу  $2 \text{ кг}$ .

5. Газ зі стану 1 переходить у стан 2 шляхом 1a2. При цьому до газу підводиться  $50 \text{ кДж}$  теплоти і над газом виконується  $200 \text{ кДж}$  роботи. Якими будуть робота /кДж/ і знак зміни об'єму у деякому процесі 2b1, в якому відводиться  $100 \text{ кДж}$  теплоти?

Варіант № 18.

1. У оборотному процесі /  $pV = \text{const}$  / газ об'ємом  $V_1 = 2 \text{ м}^3$  при  $p_1 = 200 \text{ кПа}$  розширюється у 5 разів. Визначити роботу процесу /кДж/.

2. Визначити теплоту процесу /кДж/, теплоємність якого виражається виразом  $C = 1,2 + 2 \cdot 10^{-4} T$ , кДж/(кг·К), в разі зміни температури  $4 \text{ кг}$  робочого тіла у процесі від  $450$  до  $550 \text{ К}$ .

3. При ізотермічному процесі /  $T = 300 \text{ К}$ / зміни стану системи у результаті вимірювань отримано, що робота дорівнює  $1000 \text{ кДж}$ . Зміна внутрішньої енергії системи  $300 \text{ кДж}$ . Визначити теплоту процесу /кДж/. Чи виконуються під час процесу умови оборотності, якщо ентропія системи збільшилась на  $5 \text{ кДж/К}$ ? Яким було б значення теплоти /кДж/, якщо процес протікав оборотно?

4. У ізобарному процесі внутрішня енергія робочого тіла збільшилась на  $300 \text{ кДж}$ , ентальпія - на  $600 \text{ кДж}$ . Визначити теплоту і роботу процесу.

5. Круговий процес /цикл/ складається з процесів 1a2 і 2b1, сумарна робота циклу  $L = -100 \text{ кДж}$ ,  $Q_{1a2} = -300 \text{ кДж}$ ,  $Q_{1a2} = -400 \text{ кДж}$ . Знайти  $\Delta U_{1a2}$ ,  $Q_{2b1}$ ,  $Q_{2b1}$ ,  $\Delta U_{2b1}$  /кДж/.

Варіант № 19.

1. Газ при  $p = 1000 \text{ кПа}$  і густині  $\rho_1 = 2 \text{ кг/м}^3$  ізобарно стискується, зменшуючи об'єм у 5 разів. Визначити роботу оборотного процесу (кДж/кг).

Варіант № 21.

2. У оборотному ізотермічному процесі при температурі  $T = 300^\circ\text{C}$  ентропія 12 кг газу збільшується на  $0,5 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ . Визначити теплоту процесу /кДж/.

3. У процесі  $pV = \text{const}$  об'єм  $V_1 = 1 \text{ м}^3$  газу при  $p_1 = 2 \text{ бар}$  збільшився у 4 рази. Робота процесу дорівнює 500 кДж. Чи дотримуються під час процесу умови оборотності? Визначити роботу /кДж/ в разі оборотного протікання процесу.

4. Внутрішня енергія робочого тіла зменшилась на 100 кДж, ентальпія – на 130 кДж. Визначити теплоту /кДж/ і наявну роботу в разі ізохорної зміни стану.

5. Круговий процес /цикл/ складається з трьох процесів:  $ab$ ,  $bc$ ,  $ca$ ; сумарна робота циклу дорівнює 200 кДж;  $Q_{ab} = 23,83 \text{ ккал}$ ;  $\Delta U_{ab} = -100 \text{ кДж}$ ;  $Q_{bc} = 250 \text{ кДж}$ ;  $L_{ca} = 200 \text{ кДж}$ . Знайти  $L_{ab}$ ,  $Q_{bc}$ ,  $L_{ca}$ ,  $Q_{ca}$ ,  $\Delta U_{ca}$  /кДж/.

Варіант № 20.

1. Визначити роботу /кДж/ ізобарного розширення газу від  $V_1 = 3 \text{ м}^3$  до  $V_2 = 8 \text{ м}^3$ , якщо  $p_{\text{зад}} = 3 \text{ бар}$ ,  $p_{\text{атм}} = 750 \text{ мм рт.ст.}$

2. При ізобарному оборотному протіканні газу технічна робота, яка віддається зовнішнім об'єктам, дорівнює 60 кДж/кг. Знайти кінцеву швидкість потоку (м/с), якщо початкова  $W_1 = 500 \text{ м/с}$ .

3. В ізотермічному процесі  $T = 1000 \text{ К}$  відводиться 700 кДж теплоти, при цьому ентропія системи зменшується на  $0,5 \text{ кДж/К}$ . Чи дотримуються під час процесу умови оборотності? Визначити теплоту в разі оборотного протікання процесу /кДж/.

4. У адіабатному процесі внутрішня енергія робочого тіла збільшується на 200 кДж, а ентальпія – на 250 кДж. Визначити /кДж/ теплоту, роботу зміни об'єму і наявну роботу процесу.

5. Круговий процес /цикл/ складається з процесів  $1a2$  і  $2a1$ . Сумарна теплота циклу дорівнює 50 кДж;  $L_{1a2} = 100 \text{ кДж}$ ;  $\Delta U_{1a2} = -20 \text{ кДж}$ . Знайти  $Q_{1a2}$ ,  $L_{2a1}$ ,  $\Delta U_{2a1}$ ,  $Q_{2a1}$  /кДж/.

1. У оборотному процесі потенціальна енергія тиску змінюється від 250 до 200 кДж. Наявна робота  $L_n = -700 \text{ кДж}$ . Визначити роботу зміни об'єму /кДж/.

2. У рівноважному ізохорному процесі зміна стану газу /теплоємність  $C_V = 0,9 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ / з відведенням 90 кДж/кг теплоти, початкова температура  $T_1 = 400 \text{ К}$ . Визначити температуру  $T_2$  у кінці процесу.

3. В ізобарному процесі зміна внутрішньої енергії газу дорівнює 100 кДж, при цьому від навколишнього середовища підводиться 400 кДж теплоти. Визначити /кДж/ роботу газу. Чи дотримуються під час процесу умови оборотності, якщо  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ ,  $V_1 = 0,5 \text{ м}^3$ ,  $V_2 = 2,5 \text{ м}^3$ . Визначити роботу в разі оборотного протікання процесу.

4. До газу, який знаходиться у циліндрі під рухомих поршнем / $p = \text{const}$ /, зовні підводиться 700 кДж теплоти. При цьому виконується питома робота 250 кДж/кг. Визначити зміну внутрішньої енергії /кДж/, якщо кількість газу 2 кг.

5. Газ із стану 1 переходить у стан 2 шляхом  $1a2$ . При цьому до газу підводиться 200 кДж теплоти і над ним виконується робота, яка дорівнює 300 кДж. Якими будуть робота і знак зміни об'єму в деякому процесі  $2a1$ , під час якого відводиться 300 кДж теплоти?

Варіант № 22.

1. У оборотному процесі  $pV = \text{const}$  газ об'ємом  $V_1 = 1 \text{ м}^3$  при  $p_1 = 300 \text{ кПа}$  розширюється у 3 рази. Визначити роботу процесу /кДж/.

2. Визначити теплоту процесу /кДж/, теплоємність якого визначається виразом  $C = 1,2 + 2 \cdot 10^{-4} T$ , кДж/(кг·К), в разі зміни температури 10 кг робочого тіла у процесі від 300 до 700 К.

3. При ізотермічному процесі  $T = 500 \text{ К}$  зміна стану системи робота дорівнює 2000 кДж. Зміна внутрішньої енергії системи 700 кДж. Визначити теплоту процесу /кДж/. Чи виконуються під час процесу умо-

ви оборотності, якщо ентропія системи збільшилась на 5 кДж/К? Яким було б значення теплоти /кДж/, якщо процес протікав оборотно?

4. У ізобарному процесі внутрішня енергія робочого тіла збільшилась на 400 кДж, ентальпія – на 700 кДж. Визначити теплоту і роботу процесу.

5. Круговий процес /цикл/ складається з процесів 1a2 і 2b1, сумарна робота циклу 200 кДж;  $L_{1a2} = 300$  кДж;  $Q_{1a2} = 400$  кДж. Знайти  $\Delta U_{1a2}$ ,  $L_{2b1}$ ,  $Q_{2b1}$ ,  $\Delta U_{2b1}$  /кДж/.

#### Варіант № 23.

1. Газ при тиску  $P = 1000$  кПа і густині  $\rho_1 = 1$  кг/м<sup>3</sup> у процесі  $p = \text{const}$  стискується із зменшенням об'єму у 5 разів. Визначити роботу оборотного процесу (кДж/кг).

2. У ізотермічному процесі при  $t = 227$  °С ентропія 2 кг робочого тіла збільшується на 0,46 кДж/(кг·К). Визначити теплоту /кДж/ в разі оборотного протікання процесу.

3. У процесі  $pV = \text{const}$  об'єм  $V_1 = 3$  м<sup>3</sup> газу при  $P_1 = 10$  бар збільшується у 4 рази. Корисний механічний ефект процесу, який пов'язаний зі збільшенням об'єму, дорівнює 2300 кДж. Чи дотримуються під час процесу умови оборотності? Визначити роботу /кДж/ в разі оборотного протікання процесу.

4. Внутрішня енергія газу зменшилась на 50 кДж, ентальпія – на 70 кДж. Визначити теплоту і наявну роботу /кДж/ за ізохорної зміни стану.

5. Круговий процес /цикл/ складається з трьох процесів: ab, bc, ca, сумарна робота циклу дорівнює 150 кДж;  $Q_{ab} = 23,88$  ккал,  $\Delta U_{ab} = -100$  кДж;  $Q_{bc} = 200$  кДж;  $L_{bc} = 200$  кДж. Знайти  $L_{ab}$ ,  $\Delta U_{bc}$ ,  $L_{ca}$ ,  $Q_{ca}$ ,  $\Delta U_{ca}$  /кДж/.

#### Варіант № 24.

1. Визначити роботу /кДж/ розширення газу у процесі  $p = \text{const}$  від  $V_1 = 2$  м<sup>3</sup> до  $V_2 = 6$  м<sup>3</sup>, якщо  $p_{\text{нагд}} = 4$  бар;  $P_{\text{атм}} = 760$  мм рт.ст.

2. При ізобарному оборотному протіканні газу технічна робота, яка віддається зовнішнім об'єктам, дорівнює 120 кДж/кг. Визначити кінцеву швидкість потоку /м/с/, якщо початкова  $W_1 = 500$  м/с.

3. В разі зміни стану тіла в ізотермічному процесі  $T = 300$  К відводиться 600 кДж теплоти, при цьому ентропія тіла зменшується на 2 кДж/К. Чи дотримуються під час процесу умови оборотності? Визначити теплоту під час оборотного протікання процесу.

4. В адіабатному процесі внутрішня енергія газу збільшилась на 500 кДж, а ентальпія – на 700 кДж. Визначити теплоту, роботу зміни об'єму і наявну роботу процесу /кДж/.

5. Круговий процес /цикл/ здійснюється у результаті виконання робочим тілом двох процесів: 1a2 і 2b1. Сумарна теплота циклу  $Q = -30$  кДж;  $L_{1a2} = 70$  кДж;  $\Delta U_{1a2} = 30$  кДж. Знайти  $Q_{1a2}$ ,  $L_{2b1}$ ,  $\Delta U_{2b1}$ ,  $Q_{2b1}$  /кДж/.

#### Варіант № 25.

1. У оборотному процесі зміни стану робочого тіла, потенціальна енергія тиску змінювалась від 100 до 200 кДж. Наявна робота дорівнює 1000 кДж. Визначити роботу зміни об'єму /кДж/.

2. У рівноважному ізохорному процесі зміни стану 1 кг газу /теплоємність  $C_V = 0,8$  кДж/(кг·К)/ з відведенням 60 кДж/кг теплоти початкова температура  $T_1 = 600$  К. Визначити температуру  $T_2$  в кінці процесу.

3. В ізобарному процесі зміна внутрішньої енергії газу дорівнює 200 кДж, при цьому від оточуючого середовища підводиться 1000 кДж теплоти. Визначити /кДж/ роботу газу. Чи дотримуються під час процесу умови оборотності, якщо  $P = 0,5$  МПа,  $V_1 = 0,5$  м<sup>3</sup>,  $V_2 = 2,5$  м<sup>3</sup>. Визначити роботу /кДж/ під час оборотного протікання процесу.

4. До газу, який знаходиться у циліндрі під зільним поршнем, у рівноважному процесі зовні підводиться 1000 кДж теплоти. При цьому газом виконується гістома робота 100 кДж/кг. Визначити зміну внутрішньої енергії /кДж/, якщо маса газу 7 кг.

5. Робоче тіло зі стану 1 переходить у стан 2 шляхом 1a2. При цьому до робочого тіла підводиться 100 кДж теплоти і над ним виконує-

ться робота, яка дорівнює 400 кДж. Якими будуть робота /кДж/ і знак зміни об'єму в даному процесі 2в1, під час якого відводиться 300 кДж теплоти?

## 2. ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

### 2.1. Теоретичні відомості

Оборотні процеси, якими користується класична термодинаміка, у природі не зустрічаються і їх треба розглядати як граничний випадок необоротних процесів. Другий закон термодинаміки, як дослідний факт, у найбільш загальному вигляді формулюється у вигляді принципу: всі природні процеси необоротні.

В історії розвитку термодинаміки цей загальний принцип знаходив вираження у часткових формулюваннях. Для технічних застосувань важливі положення другого закону, які відносять до процесів перетворення енергії.

Не кожна енергія може бути повністю перетворена в іншу форму енергії.

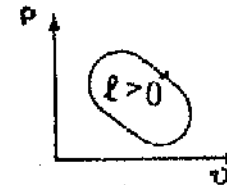
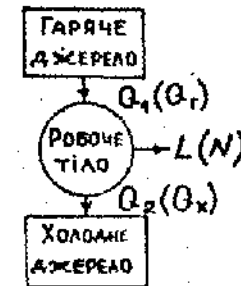
Навіть під час оборотних процесів внутрішню енергію і теплоту не можна повністю перетворювати у роботу. За Планком: неможливо побудувати періодично діючу машину, що виконує роботу за наявності одного /охолоджуючого/ джерела теплоти.

Формулювання Клаузіуса: передача теплоти від холоднішого тіла до теплішого неможлива, якщо одночасно не відбудеться пов'язана з цим інша зміна.

Відповідно до цих положень найпростіші схеми теплових машин, в яких здійснюються взаємні перетворення теплоти і роботи, містять у собі два джерела теплоти з різними температурами /верхній гарячий з  $T_1$  і нижній холодний з  $T_2$ / і робоче тіло.

У теплових двигунах, які слугують для перетворення теплоти в роботу, робоче тіло виконує прямий цикл, який в  $p, V$ -координатах сприймаємо за годинникову стрілку.

Теплота гарячого джерела  $Q_1$ , наприклад за рахунок згоряння органічного палива, підводиться до робочого тіла. У циклічному процесі робоче тіло виконує роботу  $L$ , яка віддається зовнішнім об'єктам. Частина циклу відбувається в разі відведення теплоти  $Q_2$  від

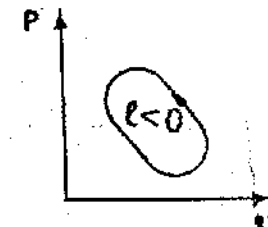
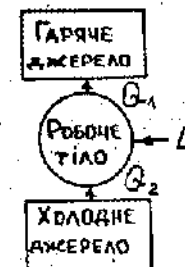


робочого тіла до холодного джерела, наприклад оточуючого середовища. Залежно від того, що розглядається, або робоче тіло, джерело теплоти або об'єкт роботи, знаки теплоти і роботи будуть різними. Баручи  $L$  і  $Q$  за абсолютною величиною, рівняння першого закону для теплової машини запишемо у вигляді  $Q_1 - Q_2 = L$  для 1 кг робочого тіла  $q_1 = l + q_2$  або, якщо віднести до одиниці часу, для потужності  $N$  і теплового потоку  $Q$ :  $Q_1 = N + Q_2$ .

Термодинамічну ефективність теплового двигуна визначають термічним ККД  $\eta_t$  як відношення корисного ефекту до затрат:

$$\eta_t = \frac{L}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{L}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N}{Q_1} < 1$$

До теплових машин, які працюють за зворотними циклами, відносять холодильні установки і теплові насоси.



Теплота  $Q_2$  від холодного джерела підводиться до робочого тіла. Робота затрачена на підвищення внутрішньої енергії і температури робочого тіла. Цим забезпечують умови для передачі теплоти  $Q_1 = Q_2 + L$  від робочого тіла до верхнього гарячого джерела. Таким чином, ці машини слугують для передачі теплоти від тіл з меншою температурою до тіл з більшою температурою за рахунок затрат роботи зовні.

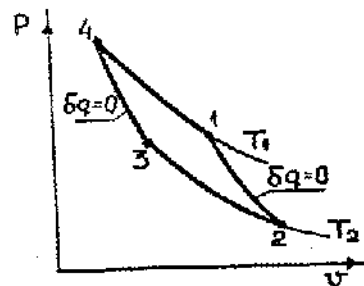
Холодильні установки і теплові насоси візняються рівнем температур джерел і корисним ефектом. У холодильній установці верхнім джерелом є оточуюче середовище. Корисний ефект – теплота  $Q_2$ , яка відводиться від об'єкта з температурою, меншою ніж температура оточуючого середовища. Термодинамічну ефективність холодильної установки визначають холодильним коефіцієнтом

$$\epsilon = \frac{Q_2}{L} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{q_2}{q_1} = \frac{Q_2}{N}$$

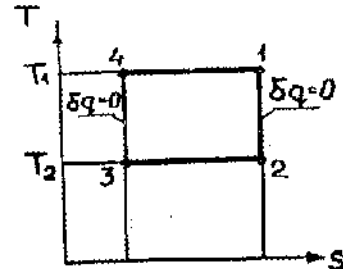
У тепловому насосі теплота  $Q_2$  навколишнього середовища передається гарячому джерелу з більш високою температурою. Корисний ефект – теплоту  $Q_1$  – використовують, наприклад, для опалення. Ефективність характеризується коефіцієнтом опалювання:

$$\varphi = \frac{Q_1}{L} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \frac{q_1}{q_1 - q_2} = \frac{q_1}{q_1} = \frac{Q_1}{N} > 1$$

Найпростішим термодинамічним циклом є цикл Карно, який складається з двох ізотермічних і двох адіабатних оборотних процесів. Температура робочого тіла і джерел під час підведення і відведення теплоти однакові:  $T_1 = T_F$ ,  $T_2 = T_X$ .



36



Основні властивості цього циклу формулюють у вигляді теореми Карно. Перша теорема Карно: ефективність циклу Карно не залежить від властивостей робочого тіла і визначається температурами гарячого і холодного джерел теплоти. Вираз другого закону термодинаміки для циклу Карно

$$\frac{q_1}{T_1} = \frac{q_2}{T_2}$$

Звідси дістаємо такі співвідношення для оцінки ефективності машин на основі прямого і зворотного циклів Карно:

тепловий двигун  $\eta_{TK} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$  ;

холодильна установка  $\epsilon_K = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$  ;

тепловий насос  $\varphi_K = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$ .

Оцінку граничної ефективності в разі побудови довільного циклу дає друга теорема Карно: у наявному інтервалі температур між максимальною температурою підведення і мінімальною температурою відведення теплоти найбільша термодинамічна ефективність належить циклу Карно.

Значення циклу Карно полягає і в тому, що ефективність довільного циклу можна визначити за допомогою еквівалентного йому циклу Карно за середніми термодинамічними температурами підведення і відведення теплоти. Другий закон для циклу Карно дозволяє установити загальні властивості кругових процесів зі змінною температурою підведення і відведення теплоти.

Математичний вираз другого закону термодинаміки для циклів носить назву інтеграла Клаузіуса, який для оборотних процесів має вигляд

$$\oint \frac{\delta q}{T} = 0$$

37

Звідси може бути введено поняття ентропії тіла як функції стану:

$$\oint \frac{\delta q}{T} = \oint ds = 0; \quad ds = \left( \frac{\delta q}{T} \right)_{\text{обор}}$$

Інтеграл Клаузіуса для необоротних циклів

$$\oint \frac{\delta q}{T} < 0, \quad \oint ds = 0$$

де  $T$  - температура джерел теплоти, яка може відрізнятися від температури робочого тіла.

Такий самий зміст температури у загальному вигляді математичного виразу другого закону  $ds \geq \frac{\delta q}{T}$ , для довільного розімкненого процесу 12:

$$\Delta S_{12} \geq \int_1^2 \frac{\delta q}{T}$$

Таким чином, зміна ентропії порівняно зі наведеною тепловою

$\int \frac{\delta q}{T}$  буде мірою необоротності процесу.

У теплоізоляційній системі  $\Delta S_c \geq 0$  це означає, що ентропія стала, якщо процеси оборотні, і збільшується під час необоротних процесів у системі.

Ступінь досконалості процесів у системі з точки зору другого закону термодинаміки можна оцінювати за зміною ентропії або за втратами ексергії. Під ексергією розуміють енергію, яка за участі навколишнього середовища може бути повністю перетворена в іншу форму. До необмежено перетворюваних форм відносять механічну /кінетичну і потенціальну/ і електричну енергію, а також роботу. Перетворення теплоти і внутрішньої енергії в ексергію обмежено другим законом. Ексергію  $E$  теплоти  $Q$  теплового джерела з температурою  $T$  визначають як максимально можливу роботу за умови, що нижнім джерелом буде навколишнє середовище з температурою  $T_H$ :

$$E = Q \eta_{\pm K} = Q \left( 1 - \frac{T_H}{T} \right)$$

Втрати ексергії  $\Delta E$  за рахунок необоротності процесу в ізоляційній системі оцінюють за допомогою рівняння Голі - Стодоли:

$$\Delta E = T_H \Delta S_c$$

## 2.2. Контрольні запитання

1. Назвати історично складені формулювання другого закону термодинаміки, що належать Клаузіусу, Томпсону /Кельвіну/, Планку.
2. Яке з формулювань другого закону може вважатися найбільш загальним?
3. Що називають вічним двигуном другого роду?
4. Розкрити зміст другого закону для оборотних і необоротних процесів.
5. Статистичний, імовірнісний зміст другого закону /формулювання Больцмана/.
6. Філософський зміст другого закону, межі його застосування.
7. Найпростіша схема та оцінка ефективності теплового двигуна /холодильні машини, теплового насоса/.
8. Що називають циклом Карно?
9. Перша теорема Карно.
10. Оцінка ефективності машин, що працюють за циклом Карно.
11. Що таке наявний інтервал температур?
12. Середня термодинамічна температура, еквівалентний цикл Карно.
13. Друга теорема Карно.
14. Математичний вираз другого закону термодинаміки для циклів /інтервал Клаузіуса/.
15. Існування якого параметра обґрунтовує другий закон термодинаміки. Який зміст цього обґрунтування?
16. Математичний вираз другого закону термодинаміки.
17. Фізичний зміст ентропії.
18. Зміна ентропії теплоізоляційної системи.
19. Як встановити характер /оборотність/ процесів у циклі за допомогою інтеграла Клаузіуса, зміни ентропії, еквівалентного циклу Карно?





$$\Delta E = T_H \Delta S_C = 300 \cdot 0,40 = 120 \text{ кДж}$$

Схему процесів в  $T, S$ -діаграмі показано на малюнку.

3. Як змінюються результати обчислення для задачі 2, якщо в процесі зміни стану тіла в тому самому інтервалі температур маємо внутрішню необоротність внаслідок тертя, причому температура тертя становить 20% зовнішнього теплового потоку до тіла?

Дано:

$$T_A = 600 \text{ К}$$

$$T_B = 473 \text{ К}$$

$$T_C = 593 \text{ К}$$

$$C_B = 5 \text{ кДж/К}$$

$$Q_{тер} = 0,2 Q_{эф}$$

$$T_H = 27^\circ \text{C}$$

$$\Delta S_C, \Delta E - ?$$

Розв'язання. Температури  $T_{1A}, T_{2B}$  тіла в процесі, що розглядають, залишилися такими самими, і в тілі виділяється теплота тертя  $Q_{тер}$ , тому зовнішній тепловий потік від джерела  $Q_{эф} = Q_A$  повинен зменшитися:  $Q = C_B(T_{2B} - T_{1B}) = Q_{эф} + Q_{тер}$ . Підставимо в це рівняння  $Q_{тер} = 0,2 Q_{эф}$ , тоді  $Q = 1,2 Q_{эф}$ , звідси

$$Q_{эф} = \frac{Q}{1,2} = \frac{600}{1,2} = 500 \text{ кДж},$$

$$\text{тому } Q_A = Q_A = -Q_{эф} = -500 \text{ кДж}.$$

Знайдемо зміну ентропії джерела і системи:

$$\Delta S_A = \frac{Q_A}{T_A} = \frac{-500}{600} = -0,833 \text{ кДж/К}.$$

Зміна ентропії тіла залишилась попередньою:  $\Delta S_B = 1,15 \text{ кДж/К}$ , тоді  $\Delta S_C = \Delta S_A + \Delta S_B = -0,833 + 1,15 = 0,317 \text{ кДж/К}$ . Втрати ексергії:  $\Delta E = T_H \Delta S_C = 300 \cdot 0,317 = 95,1 \text{ кДж}$ .

Таким чином, наявність додаткової внутрішньої необоротності /в цілому - зростання необоротності/ призвела до збільшення зміни ентропії і втрат ексергії.

4. В циклі теплового двигуна між джерелами з температурами 300 і 27 °C тепловий потік від гарячого джерела дорівнює 250 кВт, ККД - 0,32. Знайти корисну потужність двигуна, тепловий потік холодного джерела, з'ясувати умови оборотності процесів в установці.

Дано:

$$T_H = 300 + 273 = 573 \text{ К}$$

$$T_C = 27 + 273 = 300 \text{ К}$$

$$Q_1 = 250 \text{ кВт}$$

$$\eta_t = 0,32$$

$$N, Q_2 - ?$$

Розв'язання. Знайдемо корисну потужність:

$$\eta_t = N / Q_1, \quad N = \eta_t Q_1 = 250 \cdot 0,32 = 80 \text{ кВт}.$$

Тепловий потік холодного джерела

$$Q_2 = Q_1 - N = 250 - 80 = 170 \text{ кВт}.$$

Умови оборотності процесів в установці можна з'ясувати кількома методами.

1. Оборотний цикл при сталих температурах джерел - це цикл Карно. Його ККД

$$\eta_{тк} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{300}{573} = 0,48$$

більший за ККД розглядуваного циклу.

2. Знайдемо інтеграл Клаузіуса для даного циклу:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_1}{T_H} - \frac{Q_2}{T_C} = \frac{250}{573} - \frac{170}{300} = -0,13 \text{ кВт/К} < 0.$$

3. Зміна ентропії системи

$$\Delta S_C = \Delta S_H + \Delta S_C + \Delta S_{р.г} = \frac{Q_2}{T_H} - \frac{Q_1}{T_C} = \frac{170}{573} - \frac{250}{300} = -0,13 \text{ кВт/К} < 0.$$

Отже, всі три методи доводять те, що даний цикл - необоротний.