

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧ-  
НИЙ ІНСТИТУТ

ПЕРШИЙ ТА ДРУГИЙ ЗАКОНИ ТЕРМОДИНАМІКИ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ  
З ДИСЦИПЛІНИ «ТЕПЛОТЕХНІКА»

Київ КПІ 2008

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧ-  
НИЙ ІНСТИТУТ

ПЕРШИЙ ТА ДРУГИЙ ЗАКОНИ ТЕРМОДИНАМІКИ  
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ З ДИСЦИПЛІНИ "ТЕПЛОТЕХНІКА"  
для студентів інженерно-технічних спеціальностей

Затверджено на засіданні  
кафедри загальної  
теплотехніки  
Протокол № 8 від 01.09.93

Київ КПІ 2008

Першій та другий закони термодинаміки: Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни "Теплотехніка" для студентів інженерно-технічних спеціальностей / Укл. В.І.Дешко. - К.: КПІ, - 2008. 56 с.

Укладач В.І. Дешко, доктор техн. наук  
Відповідальний редактор С.М. Константинов  
Рецензент Г.М.Васильченко

Вивчення першого та другого законів термодинаміки як основи термодинамічного аналізу передбачав не тільки засвоєння загальних положень цих законів, а й розгляд різноманітних галузей їх практичного застосування.

Мета методичних вказівок — використати самостійну роботу студентів для індивідуального вивчення на конкретних прикладах матеріалу першого та другого законів термодинаміки в рамках технічної термодинаміки, яка відноситься до теоретичних основ курсу "Теплотехніка".

В наведених прикладах класична термодинаміка рівноважних станів та оборотних процесів є основою аналізу. Зокрема, в разі визначення теплоти та роботи вона приводить до максимально можливих, граничних характеристик реальних процесів. Перший закон як принцип еквівалентності теплоти та роботи використовують в оборотних та необоротних процесах, в прикладах кругових процесів. Другий закон для оборотних процесів розглянуто в рамках циклів теплових машин. На основі принципу зростання ентропії ізольованої системи він поширений на необоротні процеси.

Методичні вказівки містять у собі теоретичні відомості, розв'язання типових прикладів, задач з варіантами вхідних даних, картки для самостійної роботи. Подібна структура дозволяє використовувати їх як за аудиторіях, так і позааудиторних форм самостійної роботи.

## **1. ТЕПЛОТА І РОБОТА. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ**

### **1.1. Теоретичні відомості**

Перший закон термодинаміки — частковий випадок закону збереження та перетворення енергії стосовно термодинамічних систем, в яких формами передачі енергії є теплота та робота.

В технічній термодинаміці поняття термодинамічної системи містить у собі в загальному випадку джерела теплоти, об'єкта 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 теплоізолювану називають адіабатною.

Процеси термодинамічних перетворень у робочому тілі або в системі пов'язані зі зміною параметрів стану. Оборотної 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  $\mathcal{V}$ , коли на всю поверхню робочого тіла діє рівномірно розподілений тиск зовнішнього середовища,

що дорівнює тиску робочого тіла  $P$ . Для оборотних процесів роботи  $L$  визначають з виразів:

$$\delta L = P \alpha v, \quad L = \int_{v_1}^{v_2} P \alpha v,$$

а питома робота  $\lambda$ , тобто робота, віднесена до 1 кг робочого тіла, через питомий об'єм  $v$ :  $v_2$

$$\delta \lambda = P \alpha v, \quad \lambda = \int_{v_1}^{v_2} P dv$$

Робота додатна в разі збільшення об'єму, якщо виконується робочим тілом, і дорівнює площі під графіком процесу в  $P, v$  — координатах.

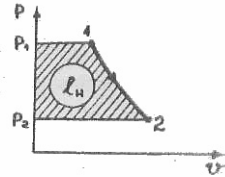
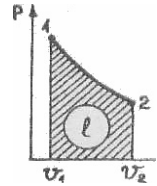
Для необоротного процесу робота  $L_{\text{еф}}$  завжди менше за роботу  $L$  відповідного оборотного процесу. Наприклад, за наявності тертя

$$\lambda_{\text{еф}} = \lambda - \lambda_{\text{мер}} = \int_{v_1}^{v_2} P dv - \lambda_{\text{мер}}$$

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

$$\delta L_n = -v dP, \quad L_n = - \int_{P_1}^{P_2} v dP, \quad \lambda_n = \frac{L_n}{m},$$

$$\delta \lambda_n = -v dP, \quad \lambda_n = \int_{P_1}^{P_2} -v dP.$$



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 ( $P, v$ ) системи робоче тіло — навколишнє середовище:

$$\lambda = \lambda_n + (P_2 v_2 - P_1 v_1),$$

$$L = L_n + \Delta(Pv).$$

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 на зовнішніми об'єктами, діючи на рухомі стінки каналу, лопатки турбін, переміщуючи тверді частинки. Цю роботу називають технічною ( $\lambda_T, L_T$ ). В процесі руху в каналі відбувати-

меться зміна кінетичної енергії потоку  $\frac{mW^2}{2}$  та зовнішньої потенційної енергії  $mgz$ .

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

$$L = L_T + (P_2 v_2 - P_1 v_1) + m\left(\frac{W_2^2}{2} - \frac{W_1^2}{2}\right) + mg(z_2 - z_1),$$

$$\lambda = \lambda_T + \Delta(Pv) + \Delta\left(\frac{W^2}{2}\right) + g\Delta z,$$

$$\lambda_n = \lambda - \Delta(Pv) = \lambda_1 + \Delta\left(\frac{W^2}{2}\right) + g\Delta z.$$

За наявності тертя  $\lambda_{ef} = \lambda - \lambda_{mer}$ , тоді

$$\lambda_n = \lambda_T + \Delta(Pv) + \Delta\left(\frac{W^2}{2}\right) + g\Delta z + \lambda_{mer},$$

$$\lambda_n = \lambda_T + \Delta\left(\frac{W^2}{2}\right) + g\Delta z + \lambda_{mer}.$$

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

$$\delta Q = Tds, \quad Q = \int_{s_1}^{s_2} Tds.$$

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

$$\delta q = \frac{\delta Q}{m} = Tds, \quad q = \int_{s_1}^{s_2} Tds.$$

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:

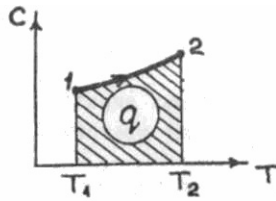
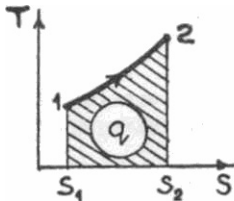
$$C = \frac{\delta Q}{dt}.$$

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

$$C = \frac{c}{m} = c' v_u = \frac{\mu c}{\mu}.$$

Знаючи теплоємність тіла, теплоту оборотного процесу можна визначити таким чином:  $\delta q = \frac{\delta Q}{m} = cdT, q = \int_{T_1}^{T_2} cdT$ .

Теплота додатна, коли підводиться до тіла.





У необоротному процесі теплота  $q_{ef}$ ,  $Q_{ef}$  завжди менша ніж у відповідному оборотному. За наявності тертя  $q_{ef} = q - q_{тер} = \int_{s_1}^{s_2} T ds - q_{тер}$ . Теплота та робота залежать від характеру процесу, тому диференціали теплоти  $\delta q$  та роботи  $\delta l, \delta l_u$  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 перетворюватись 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: 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:  $Q = L + \Delta U$ ,  $Q_{ef} = L_{ef} + \Delta U$ .

Тоді математичний вираз першого закону термодинаміки для I кг робочого тіла записують так:  $q = l + \Delta u$ ,

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

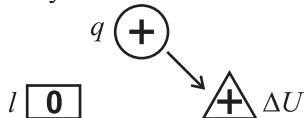
$$q_{ef} = l_{ef} + \Delta u.$$

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

$$\text{Теплота} > 0 - \text{⊕}, < 0 - \text{⊖}$$

Робота  $\boxed{+}$   $\boxed{-}$ ,  $\Delta U, \Delta u$   $\triangle +$   $\triangle -$

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:

$$h = \frac{H}{m} = u + Pv, \quad q = l_H + \Delta h, \quad \delta q = \delta l_H + dh.$$

Часткові випадки першого закону термодинаміки:

в ізобарному процесі ( $P = \text{const}$ ,  $\delta l_H = -v dp = 0$ )

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

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

$$\delta q = du, \quad q = \Delta U,$$

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

$$\lambda = -\Delta U, \quad \lambda_H = -\Delta h.$$

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 ( $T = \text{const}$ ,  $du = 0$ ).

$$dh = d(U + Pv) = d(U + R_T) = 0.$$

У замкненому круговому процесі /циклі/

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

$$Q = L = L_H.$$

Для стаціонарного одновимірного потоку з врахуванням рівняння балансу механічної енергії:

$$q = \Delta U + l_T + \Delta(Pv) + \Delta\left(\frac{W^2}{2}\right) + g\Delta z,$$

$$\delta q = dh + \delta l_T + d\left(\frac{W^2}{2}\right) + g dz.$$

## 1.2. Контрольні запитання

1. Визначення роботи зміни об'єму  $\lambda$
2. Визначення наявної роботи  $\lambda_H$ .
3. Що таке потенційна енергія тиску?
4. Визначення технічної роботи  $\lambda_T$ .
5. Зв'язок між  $\lambda$  та  $\lambda_H$ ;  $\lambda_H$  та  $\lambda_T$ .
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 обґрунтовують 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 /ізобарного, ізотермічного, адіабатного/ процесу.
20. Перший закон термодинаміки для потоку /відкритої системи/.

21. Перший закон термодинаміки для необоротних процесів.
22. В які вади 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  $P = 1,6$  МПа та густині  $\rho = 3,0$  кг/м<sup>3</sup> 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:

$$P = \text{const};$$

$$P = 1,6 \text{ МПа};$$

$$\rho = 3,0 \text{ кг/м}^3;$$

$$\frac{v_1}{v_4} = 4.$$

---


$$\lambda, \lambda_H - ?$$

Розв'язання. Початковий об'єм

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

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

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

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

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

Дано:

$$Q = -500 \text{ кДж/кг};$$

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

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

$$\Delta s, T_1 - ?$$

Розв'язання. Зміна ентропії в оборотному процесі

$$\Delta s = \int_1^2 \frac{\delta q}{T} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{cdT}{T} = c \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

Початкова температура процесу

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

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

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

3. При течії в нерухомому каналі тиск газу зменшився в 6 разів, а густина — в 4 рази; при цьому швидкість потоку зростав від 50 до 950 м/с. Визначити роботу розширення та наявну роботу в цьому процесі, якщо  $P_1 = 25 \text{ бар}$ , а  $v_1 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Як зміняться при цьому калоричні параметри газу  $u, h, s$  якщо процес проходить адіабатно?

Дано:

$$p_1/p_2 = 6;$$

$$\rho_1/\rho_2 = 4 \text{ або } v_2/v_1 = 4;$$

$$\begin{aligned}
W_1 &= 50 \text{ м/с;} \\
W_2 &= 950 \text{ м/с;} \\
p_1 &= 25 \text{ бар;} \\
v_1 &= 0.12 \text{ м}^3/\text{кг;} \\
\Delta z &= 0
\end{aligned}$$

$$\lambda, \lambda_H - ? \quad \Delta U, \Delta h, \Delta s - ? \quad \text{при } q = 0$$

Розв'язання. За балансовим рівнянням робота

$$\lambda = \lambda_T + \Delta\left(\frac{W^2}{2}\right) + \Delta(Pv), (\Delta z = 0).$$

Для нерухомого каналу  $\lambda_T = 0$ , а зміна кінетичної енергії К

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

Зміна потенційної енергії тиску

$$\begin{aligned}
\Delta(Pv) &= P_2 v_2 - P_1 v_1 = P_1 v_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{v_2}{v_1} - 1 \right) = 25 \cdot 10^5 \cdot 0,2(1,6 \cdot 4 - 1) = \\
&= -100 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг.}
\end{aligned}$$

Тоді  $\lambda = \Delta K + \Delta(Pv) = 450 - 100 = 350 \text{ кДж/кг}$ ; наявна робота  $\lambda_H = = \Delta K = 450 \text{ кДж/кг}$ . Для калоричних параметрів при  $q = 0$  дістанемо  $\Delta u = -\lambda = -350 \text{ кДж/кг}$ ;  $\Delta h = -\lambda_H = -450 \text{ кДж/кг}$ ;

$$\Delta S = \int_{T_1}^{T_2} \frac{\delta q}{T} = 0 \text{ або } S_2 = S_1$$

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

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

Дано:

$$P = \text{const};$$

$$P = 3 \text{ бар};$$

$$v_1 = 0.5 \text{ м}^3;$$

$$v_2 = 2.5 \text{ м}^3;$$

$$\Delta U = +800 \text{ кДж};$$

$$\text{а) } Q_{\text{эф}} = +1200 \text{ кДж};$$

$$\text{б) } Q_{\text{эф}} = +600 \text{ кДж}.$$

---

$$L_{\text{эф}}, L_{\text{мер}} \text{ — ?}$$

Розв'язання. Робота рівноважного ізобарного процесу

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

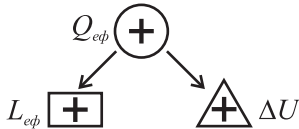
а) Ефективна /корисна/ робота процесу

$$L_{\text{эф}} = Q_{\text{эф}} - \Delta U = 1200 - 600 = 400 \text{ кДж}.$$

Робота подолання опорів

$$L_{\text{мер}} = L - L_{\text{эф}} = 600 - 400 = 200 \text{ кДж}.$$

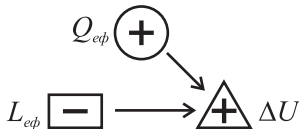
В даному випадку  $L > L_{\text{эф}}$ , тобто  $L_{\text{мер}} > 0$ , що підтверджує необоротний характер процесу:



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

$$\text{б) } L_{\text{эф}} = Q_{\text{эф}} - \Delta U = 600 - 800 = -200 \text{ кДж},$$

$$L_{\text{мер}} = L + L_{\text{эф}} = 600 + 200 = 800 \text{ кДж}.$$



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  $v_2 > v_1$ , ефективна робота процесу виявилася від'ємною, що пояснюється великими енерговтратами, для компенсації яких потрібні додаткові витрати зовні.

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

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

$$\text{Дістанемо } \Delta h = \frac{W_2^2 - W_1^2}{2} = \frac{650^2 - 150^2}{2} = -200 \text{ кДж/кг.}$$

За необоротної течії

$$q_{ef} = \Delta U + \lambda_{ef} = \Delta U + \lambda - \lambda_{мер} = \Delta h + \lambda_T + \Delta\left(\frac{W^2}{2}\right) + g\Delta z,$$

$$q_{ef} = \lambda_T = \Delta z = 0,$$

$$\Delta h = -\frac{W_2^2 - W_1^2}{2} = -\frac{600^2 - 150^2}{2} = -168,8 \text{ кДж/кг.}$$

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. підрозд. 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 академгрупи.

##### Задача 1



За заданого збільшення внутрішньої енергії та ентальпії газу в процесі визначити теплоту, термодинамічну та наявну 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  $m = \text{кг/с}$ , віддається технічна робота /потужність/  $N_T$ , Вт. Визначити початкову швидкість потоку, якщо кінцева  $W_2$ , м/с.

Значення  $m$ ,  $N_T$ ,  $W_2$  взяти з табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Остання цифра номера	$m$ , кг/с	$N_T$ , кВт	$W_2$ , м/с
1	30	3600	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  $T, K$ , зміна ентропії  $\Delta S$ , кДж/К, зростання ентальпії  $\Delta H$ , кДж. З'ясувати, чи виконуються в процесі умови внутрішньої оборотності, якщо зовнішня наявна робота  $L_{H,ef}$ , кДж.

Значення  $T, \Delta S, \Delta H, L_{H,ef}$  взяти з табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Остання цифра номера	$T, K$	$\Delta S, \text{кДж/К}$	$\Delta H, \text{кДж}$	$L_{H,ef}, \text{кДж}$
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	6	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 студент у списку академгрупи.

Таблиця 1.4

Остання цифра	$Q, \text{кДж}$			$L, \text{кДж}$			$\Delta U, \text{кДж}$		
	$ab$	$bc$	$ca$	$ab$	$bc$	$ca$	$ab$	$bc$	$ca$

фра номера						
1	200		700		200	0
2	-200			-100		0
3	700	200	500			-500
4	0		300	-600		300
5	0		700		200	0
6	700			-200		0
7	800		0		200	-200
8	0		500	-200		0
9	800	800	300			-300
0	700		700	0		-200

### Задача 5

Випробовуючи двигун потужністю  $N$ , кВт, використовують гальмо. Двигун працює на подолання сил тертя, 20% теплоти розсіюється в навколишньому середовищі, решта відводиться водою, яка охолоджує гальмо. Визначити витрату води  $m_1$ , кг/год, якщо її температура  $t_1 = \dots^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = \dots^\circ\text{C}$ , теплоємність  $C = 4,19$  кДж/(кг·К). Значення  $N, t_1, t_2$  взяти з табл. 1.5.

Таблиця 1.5

Остання циф- ра номера	$N$ , кВт	$t_1$ , °C	$t_2$ , °C
1	2	3	4
1	50	80	10
2	100	70	15
3	70	80	15
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<sub>2</sub> від температури у процесі  $v = \text{const}$  визначають співвідношенням  $\mu c_v = 20,223 + 0,00539t$ , 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/(к·К). Теплові втрати в оточуюче середовище — 10%.

4. Газ N<sub>2</sub> 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  $P = 0,1/ v / P$  — 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 а 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  $v_2 = 1,6$  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), якщо початкова  $t_1 = 15$  °С. Втрати теплоти у навколишнє середовище можна знехтувати.

4. Для умов задачі 1 визначити зміну внутрішньої енергії 6 кг газу у процесі, якщо до газу підводиться 3240 кДж теплоти. Побудувати схему енергобалансу.

5. Цикл, в якому до робочого тіла підводиться 7,165 ккал теплоти, складається з процесів 1a2 і 2b1, робота у процесі 1a2  $L_{1a2} = -70$  кДж, а у

процесі 2в1 зміна внутрішньої енергії дорівнює 50 кДж. Визначити  $Q_{1a2}$ ,  $\Delta U_{1a2}$ ,  $L_{2b1}$ ,  $Q_{2b1}$  /кДж/. Знайти роботу адіабатного процесу 1с2.

### **Варіант № 4**

1. Газ масою 0,75 кг з параметрами  $P_1 = 1$  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 /кДж/ в разі оборотного протікання процесу.

2. Залежність мольної теплоємності газу  $N_2$  від температури у процесі  $v = \text{const}$  визначається співвідношенням  $\mu c_v = 20,223 + 0,00539t$ , кДж/(кмоль·К). Визначити теплоту (кДж/кг) і середню теплоємність процесу (кДж/(кг·К)) при охолодженні газу у закритому балоні від температури  $t_1 = 800$  до  $t_2 = 200$  °С.

3. У посудину, яка містить 5 кг води при температурі 10 °С, поміщено електронагрівник, потужність якого 0,6 кВт. Визначити, за який час /хв/ вода нагріється до температури 80 °С, теплоємність води 4,19 кДж/(кг·К). Теплові втрати у навколишнє середовище – 15%.

4. Газ  $N_2$  масою 2,5 кг змінює свій стан у процесі 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  $Q_{12} = -300$  кДж,  $L_{12} = -90$  кДж. У процесі 23 при  $v = \text{const}$  внутрішня енергія збільшується на 285 кДж. Знайти роботу циклу і процесу 31, який протікає адіабатно.

### **Варіант № 5**

1. У циліндрі з поршнем необхідно дослідити процес з газом, в якому зв'язок між параметрами визначають співвідношенням  $P = 0,13/v$  ( $P$  — МПа,  $v$  — м<sup>3</sup>/кг. Якою має бути робота (кДж/кг) зміни об'єму в разі оборотного протікання процесу від  $P_1 = 1$  до  $P_2 = 0,2$  МПа?

2. У посудині, місткості якої 300 л, знаходиться азот під тиском  $P_1 = 8$  Па і температурою  $t_1 = 400$  °С. Яку кількість теплоти /кДж/ необхідно пі-

двести, щоб температура газу /процес  $v = \text{const}$  / знизилась до  $t_2 = 100$  °С? Вважатимемо газ ідеальним з теплоємністю  $C_v = 0,75$  кДж/(кг·К).

3. При знаходженні потужності двигуна гальмуванням вода, яка охолоджує гальма, нагрілась на 35 К. Витрати води  $t = 1500$  кг/г. Знайти потужність двигуна /кВт/, якщо 25% теплоти тертя розсіюється в оточуюче середовище.

4. Для умов задачі 1 визначити теплоту процесу з 0,2 кг газу, якщо внутрішня енергія газу у процесі постійна. 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  $Q_{12} = 10,748$  ккал,  $Q_{34} = -17,913$  ккал,  $L_{41} = 105$  кДж. Визначити  $L_{23}$  і зміну внутрішньої енергії у кожному процесі /кДж/.

### **Варіант № 6**

1. Газ при  $P_1 = 0,3$  МПа,  $v_1 = 0,75$  м<sup>3</sup>/кг оберотно переходить у стан з  $P_2 = 0,2$  МПа у процесі, який описується рівнянням  $p/v = \text{const}$ . Визначити роботу зміни об'єму (кДж/кг).

2. Повітря у кількості 7 м<sup>3</sup> за тиску  $P_1 = 0,2$  МПа і температури  $t_1 = -30$  °С нагрівається у теплообміннику у процесі  $P = \text{const}$  до  $t_2 = 0$ . Визначити кількість підведеної до повітря теплоти /кДж/, якщо повітря вважати ідеальним газом з теплоємністю  $C_p = 1$  кДж/(кг·К).

3. Автомобіль масою 1,2 т, який рухається зі швидкістю 60 км/год, зупиняється під дією гальм. Маса гальм 17 кг, теплоємність матеріалу гальмівних частин 0,46 кДж/(кг·К). Обчислити кінцеву температуру гальм  $t_2$  /°С/, якщо початкова  $t_1 = 20$  °С. Втрати теплоти у навколишнє середовище –5%.

4. Для умов задачі I визначити зміну внутрішньої енергії 4 кг газу у процесі, якщо від газу відводиться 1510 кДж теплоти. Побудувати схему енергобалансу.

5. Цикл, в якому до робочого тіла підводиться 4,777 ккал теплоти, складається з процесу 1a2, в якому робота  $L_{1a2} = -100$  кДж, і процесу 2b1, в якому внутрішня енергія зменшується на 70 кДж. Визначити

$Q_{1a2}, \Delta U_{1a2}, L_{2b1}, Q_{2b1}$  /кДж/. Чому дорівнюватиме робота адіабатного процесу 1с2?

### **Варіант № 7**

1. Газ масою 0,2 кг з параметрами  $P_1 = 0,2$  МПа,  $v_1 = 0,5$  м<sup>3</sup>/кг знаходиться у циліндрі з поршнем. У результаті процесу, рівняння якого  $Pv^{1,4} = \text{const}$ , газ переходить у стан, який характеризується параметром  $P_2 = 0,8$  МПа. Визначити роботу при оборотному процесі /кДж/.

2. Залежність мольної теплоємності газу O<sub>2</sub> від температури у процесі  $v = \text{const}$  визначають співвідношенням  $\mu_v = 21,265 + 0,00697t$  кДж/(кмоль·К). Визначити теплоту (кДж/кг) і середню теплоємність процесу (кДж/(кг·К)) при нагріванні газу у закритому балоні від температури  $t_1 = 20$  °С до  $t_2 = 500$  °С.

3. У посудину, яка містить 20 кг води за температури 15 °С, поміщено електронагрівник, потужність якого 2 кВт. Знайти час, за який вода нагріється до температури 100 °С, теплоємність води 4,19 кДж/(кг·К). Втрати теплоти у навколишнє середовище — 10%.

4. Газ O<sub>2</sub> масою 2 кг змінює свій стан у процесі 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  $L_{12} = -30$  кДж,  $\Delta U_{12} = -70$  кДж. У процесі 23 при  $v = \text{const}$  внутрішня енергія збільшується на 95 кДж. Визначити роботу циклу і процесу 31, який протікає адіабатно.

### **Варіант № 8**

1. У циліндрі з поршнем необхідно дослідити процес з газом, в якому зв'язок між параметрами визначається співвідношенням  $P = 0,1/v / P$  — МПа,  $v$  — м<sup>3</sup>/кг. Якою повинна бути робота зміни об'єму (кДж/кг) при оборотному протіканні процесу від  $P_1 = 0,2$  до  $P_2 = 0,6$  МПа?

2. У посудині, місткість якої 250 л, знаходиться азот при тиску  $P_1 = 10$  МПа і температурі  $t_1 = 20$  °С. Яку кількість теплоти /кДж/ необхідно підвести, щоб температура газу /процес  $v = \text{const}$ / збільшилась до  $t_2 = 250$  °С? Вважатимемо, що газ ідеальний з теплоємністю  $C_v = 0,75$  кДж/(кг·К).



3. В разі знаходження потужності двигуна гальмуванням вода, яка охолоджує гальма, нагрівається до 40 К. Витрати води  $m = 1200$  кг/год. Визначити потужність двигуна /кВт/, якщо 22% теплоти тертя розсіюється у навколишнє середовище.

4. Для умов задачі 1 визначити теплоту процесу /кДж/ з 0,25 кг газу, якщо внутрішня енергія газу під час процесу стала. Побудувати схему енерго-балансу.

5. Цикл складається з чотирьох процесів: 12, 23, 34, 41. Характер процесів 12, 34 —  $v = \text{const}$ . У процесах 23, 41 — теплообмін відсутній.  $Q_{12} = 214,95$  ккал,  $Q_{34} = -71,65$  ккал,  $L_{23} = 1200$  кДж. Знайти  $L_{41}$  і зміну внутрішньої енергії у кожному процесі /кДж/.

### Варіант № 9

1. Газ при  $P_1 = 0,3$  МПа,  $v_1 = 0,25$  м<sup>3</sup>/кг оборотно переходить у стан з  $P_2 = 0,45$  МПа у процесі, який описують рівнянням  $P/v = \text{const}$ . Визначити роботу зміни об'єму (кДж/кг).

2. Повітря у кількості 9 м під тиском  $P_2 = 0,1$  МПа і температурі  $t_1 = 20$  °С нагрівається у теплообміннику під час процесу  $P = \text{const}$  до  $t_2 = 200$  °С. Визначити кількість підведеної до повітря теплоти /кДж/, якщо повітря вважатимемо ідеальним газом з теплоємністю  $C_v = 1$  кДж/(кг·К).

3. Автомобіль, маса якого 1,3 т, рухаючись зі швидкістю 90 км/год, зупиняється під дією гальм. Маса гальм 20 кг, теплоємність матеріалу гальмівних частин 0,46 кДж/(кг·К). Обчислити кінцеву температуру гальм  $t_2$  /°С/, якщо початкова  $t_1 = 18$  °С. Втрати 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. Побудувати схему енергобалансу.

5. Цикл, в якому до робочого тіла підводиться 31,048 ккал теплоти, складається з процесу 1a2, в якому робота дорівнює 160 кДж і процесу 2b1, в якому внутрішня енергія збільшується на 90 кДж. Знайти  $Q_{1a2}, \Delta U_{1a2}, t_{2b1}, Q_{2b1}$  /кДж/. Чому дорівнюватиме робота адіабатного процесу 1b2?

### 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 якого  $Pv^{1,4} = \text{const}$  переходить у стан, який характеризують параметром  $P_2 = 0,8$  МПа. Визначити роботу /кДж/ при оборотному протіканні процесу.

2. Залежність мольної теплоємності газу  $O_2$  від температури під час процесу  $v = \text{const}$  визначають співвідношенням  $\mu c_v = 21,266 + 0,00697 \cdot t$  (Дж/(кмоль·К)). Знайти теплоту (кДж/кг) і середню теплоємність процесу (кДж/(кг·К)) під час нагрівання газу у закритому балоні від температури  $t_1 = 0$  до  $t_2 = 300$  °С.

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

4. Газ  $O_2$  масою 3,5 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  $\Delta U_{12} = 210$  кДж,  $Q_{12} = 300$  кДж. У процесі 23 при  $v = \text{const}$  внутрішня енергія зменшується на 285 кДж. Визначити роботу циклу і процесу 31, який протікає адіабатно.

### **Варіант № 11**

1. Газ при  $P_1 = 1000$  кПа і густині  $\rho_1 = 1$  кг/м<sup>3</sup> зменшує свій об'єм у 5 разів під час процесу  $P = \text{const}$  при охолодженні у про точному теплообміннику. Визначити роботу оборотного процесу (кДж/кг).

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

3. У циліндрі з поршнем під час процесу  $Pv = \text{const}$  об'єм газу  $v_1 = 3$  м<sup>3</sup> при  $P_1 = 10$  бар збільшується у 4 рази. Експериментально визначено, що робота процесу дорівнює 2300 кДж. Чи дотримуються під час процесу умови оборотності? Визначити роботу /кДж/ в разі оборотного протікання процесу.

4. Внутрішня енергія робочого тіла зменшилась на 50 кДж, ентальпія — на 70 кДж. Визначити теплоту /кДж/ 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,  $L_{bc} = Q_{bc} = 200$  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  $P_{над} = 4$  бар,  $P_{АТМ} = 750$  мм рт.ст. Чому 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 кінцеву 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 дотримуються під час процесу умови оборотності? Визначити теплоту /кДж/ в разі оборотного протікання процесу.

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  $2b1$ . 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 № 13**

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

2. У рівноважному процесі зміни стану газу у закритому балоні теплоємність газу ( $C_v = 0,8$  кДж/ кг·К) з відведенням 60 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  $P = 0,5 \text{ МПа}$ ,  $v_1 = 0,5 \text{ м}^3$ ,  $v_2 = 2,5 \text{ м}^3$ ?  
Визначити роботу /кДж/ при оборотному протіканні процесу.

4. До газу, який знаходиться у циліндрі під рухомих поршнем / $P = \text{const}$ /, 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 1а2. 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 2в1, в якому відводиться 300 кДж теплоти?

#### **Варіант № 14**

1. У циліндрі з поршнем у оборотному процесі  $Pv = \text{const}$  газ об'ємом  $v_1 = 5 \text{ м}^3$  при  $P_1 = 100 \text{ кПа}$  розширюється у 10 разів. Визначити роботу процесу /кДж/.

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

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

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 1а2 і 2в1, сумарна робота циклу 100 кДж,  $L_{1а2} = 200 \text{ кДж}$ ,  $Q_{1а2} = 300 \text{ кДж}$ . Знати  $\Delta U_{1а2}, L_{2в1}, Q_{2в1}, \Delta U_{2в1}$  /кДж/.

#### **Варіант № 15**

1. Газ при  $P = 2000 \text{ кПа}$  і густині  $\rho_1 = 2 \text{ кг/м}^3$  ізобарно стискується, зменшуючи об'єм у 5 разів. Визначити роботу оборотного процесу (кДж/кг).

2. Під час оборотного ізотермічного процесу при  $t = 727\text{ }^\circ\text{C}$  ентропія 4 кг газу збільшується на  $0,75\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ . Визначити теплоту процесу /кДж/.

3. Під час процесу  $Pv = \text{const}$  об'єм  $v_1 = 1\text{ м}^3$  газу при  $P_1 = 1\text{ бар}$  збільшується у 4 рази. Робота процесу дорівнює  $138,6\text{ кДж}$ . 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  $/v = \text{const}/$  зменшилась на  $70\text{ кДж}$ , ентальпія — на  $100\text{ кДж}$ . Визначити теплоту і наявну роботу /кДж/.

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

### **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  $P_{\text{над}} = 9\text{ бар}$ ,  $P_{\text{атм}} = 750\text{ мм рт.ст.}$ . Яка частина цієї роботи буде наявною, зовнішньою корисною роботою газу?

2. При ізобарному оборотному протіканні газу технічна робота, яка віддається зовнішнім об'єктам, дорівнює  $105\text{ кДж}/\text{кг}$ . 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  $4\text{ кДж}/\text{K}$ . Чи дотримуються під час процесу умови оборотності? Визначити теплоту /кДж/ при оборотному протіканні процесу.

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

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

### **Варіант № 17**

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

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

3. У ізобарному процесі зміна внутрішньої енергії газу дорівнює 100 кДж, при цьому від навколишнього середовища підводиться 500 кДж теплоти. Визначити роботу газу /кДж/. Чи дотримуються під час процесу умови оборотності, якщо  $P = 0,2$  Па,  $v_1 = 0,5$  м<sup>3</sup>,  $v_2 = 2,5$  м<sup>3</sup>. Знайти роботу при оборотному протіканні процесу.

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

5. Газ зі стану 1 переходить у стан 2 шляхом 1а2. При цьому до газу підводиться 50 кДж теплоти і над газом виконується 200 кДж роботи. Якими будуть робота /кДж/ і знак зміни об'єму у деякому процесі 2в1, в якому відводиться 100 кДж теплоти?

### **Варіант № 18**

1. У оборотному процесі / $Pv = \text{const}$ / газ об'ємом  $v_1 = 2$  м<sup>3</sup> при  $P_1 = 200$  кПа розширюється у 5 разів. Визначити роботу процесу /кДж/.

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

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

4. У ізобарному процесі внутрішня енергія робочого тіла збільшилась на 300 кДж, ентальпія — на 600 кДж. Визначити теплоту і роботу процесу.

5. Круговий процес /цикл/ складається з процесів 1a2 і 2в1, сумарна робота циклу  $L = -100$  кДж,  $L_{1a2} = -300$  кДж,  $Q_{1a2} = -400$  кДж. Знайти  $\Delta U_{1a2}, L_{2в1}, Q_{2в1}, \Delta U_{2в1}$  /кДж/.

### Варіант № 19

1. Газ при  $P = 1000$  кПа і густині  $\rho_1 = 2$  кг/м<sup>2</sup>, ізобарно стискується, зменшуючи об'єм у 5 разів. Визначити роботу оборотного процесу (кДж/кг).

2. У оборотному ізотермічному процесі при температурі  $t = 300$  °С ентропія 12 кг газу збільшується на 0,5 кДж/(кг·К). Визначити теплоту процесу /кДж/.

3. У процесі  $Pv = \text{const}$  об'єм  $v_1 = 1$  м<sup>3</sup> газу при  $P_1 = 2$  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: *ав*, *вс*, *са*; сумарна робота циклу дорівнює 200 кДж;  $Q_{ав} = 23,88$  ккал;  $\Delta U_{ав} = 100$  кДж;  $Q_{вс} = 250$  кДж;  $L_{вс} = 200$  кДж. Знайти  $L_{ав}, \Delta U_{вс}, L_{са}, Q_{са}, \Delta U_{са}$  /кДж/.

### Варіант №20

1. Визначити роботу /кДж/ ізобарного розширення газу від  $v_1 = 3$  м<sup>3</sup> до  $v_2 = 8$  м<sup>3</sup>, якщо  $P$  над = 3 бар,  $P_{ATM} = 750$  мм рт.ст.

2. При ізобарному оборотному протіканні газу технічна робота, яка віддається зовнішнім об'єктам, дорівнює 80 кДж/кг. Знайти кінцеву швидкість потоку (м/с; якщо початкова  $W_1 = 500$  м/с.

3. В ізотермічному процесі  $T = 1000$  К відводиться 700 кДж теплоти, при цьому ентропія системи зменшується на 0,5 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 МДж, а ентальпія — на 250 МДж. Визначити /МДж/ теплоту, роботу зміни об'єму і наявну роботу процесу.

5. Круговий процес /цикл/ складається з процесів 1a2 і 2в1. Сумарна теплота циклу дорівнює 50 кДж;  $L_{1a2} = 100$  кДж;  $\Delta U_{1a2} = -20$  кДж. Знайти  $Q_{1a2}, L_{2в1}, \Delta U_{2в1}, Q_{2в1}$  /кДж/.

### **Варіант № 21**

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

2. У рівноважному ізохорному процесі зміни стану газу /теплоємність  $C_v = 0,9$  кДж/ (кг·К)/ з відведенням 90 кДж/кг теплоти, початкова температура  $T_1 = 400$  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  $P_1 = 0,1$  МПа,  $v_1 = 0,5$  м<sup>3</sup>,  $v_2 = 2,5$  м<sup>3</sup>. Визначити роботу в разі оборотного протікання процесу.

4. До газу, який знаходиться у циліндрі під рухомим 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 штихом 1a2. При цьому до газу підводять 200 кДж теплоти і над ним виконується робота, яка дорівнює 300 кДж. Якими будуть робота і знак зміни об'єму в деякому процесі 2в1, під час якого відводиться 300 кДж теплоти?

### **Варіант № 22**

1. У оборотному процесі  $Pv = \text{const}$  з об'ємом  $v_1 = 1$  м<sup>3</sup> при  $P_1 = 300$  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  $T = 500$  К/ зміни стану системи робота дорівнює 2000 кДж. Зміна внутрішньої енергії системи 700 кДж, Визначити теплоту процесу /кДж/. Чи виконуються під час процесу умови оборотності, якщо ентропія системи збільшилась на 5 кДж/К? Яким було б значення теплоти /кДж/, якби 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 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.

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  $P_{\text{над}} = 4$  бар;  $P_{\text{атм}} = 750$  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 МДж, а ентальпія — на 700 МДж. Визначити теплоту, роботу зміни об'єму і наявну роботу процесу /МДж/.

5. Круговий процес /цикл/ здійснюється у результаті виконання робочим тілом двох процесів: 1а2 і 2в1. 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 змінилась 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 80 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>. Визначили роботу /кДж/ під час оборотного протікання процесу.

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

5. Робоче тіло зі стану I переходить у стан 2 шляхом 1а2. При цьому до робочого тіла підводиться 100 кДж теплоти і над ним виконується робота, яка дорівнює 400 кДж. Якими будуть робота /кДж/ і знак зміни об'єму в деякому 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.

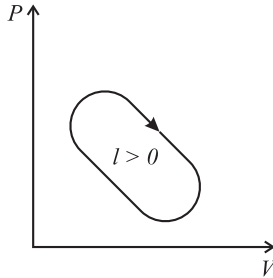
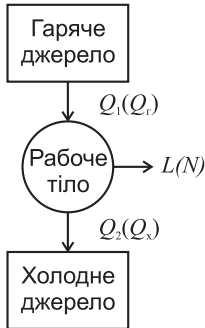
Навіть під час оборотних процесів внутрішню енергію і теплоту не можна повністю перетворювати у роботу. За Планком: неможливо побудувати періодично діючу машину, що виконує роботу за наявності одного /охладжуючого/ джерела теплоти.

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  $T_r$  і нижній холодний з  $T_x$  і робоче тіло.

У теплових двигунах, які слугують для перетворення теплоти в роботу, робоче тіло виконує прямий цикл, який в  $P, v$ -координатах спрямовано за годинниковою стрілкою.

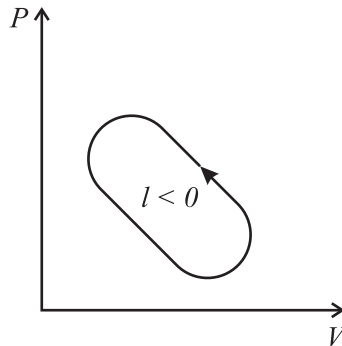
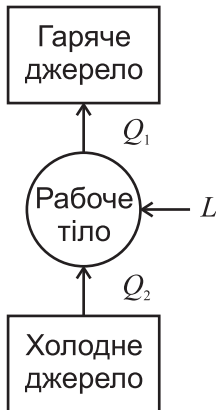
Теплота гарячого джерела  $Q_1$ , наприклад за рахунок згоряння органічного палива, підводиться до робочого тіла. У циклічному процесі робоче тіло виконує роботу  $L$ , яка віддається зовнішнім об'єктам. Частина циклу відбувається в разі відведення теплоти  $Q_2$  від робочого тіла до холодного джерела, наприклад оточуючого середовища. Залежно від того, що розглядається, або робоче тіло, джерело теплоти або об'єкт роботи, знаки теплоти і роботи будуть різними. Беручи  $L$  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 відношенням 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 слу-

гують для передачі теплоти від тіл з меншою температурою до тіл з більшою температурою за рахунок затрат роботи зовні.

Холодильні установки і теплові насоси різняться 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

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{L} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{q_2}{l} = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{Q_2}{N}.$$

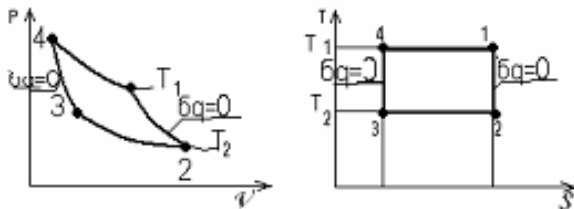
У тепловому насосі теплота  $Q_2$  навколишнього середовища передається гарячому джерелу з більш високою температурою. Корисний ефект — теплоту  $Q_1$  — використовують, наприклад, для опалення, ефективність

характеризується коефіцієнтом опалювання:

$$\varphi = \frac{Q_1}{L} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \frac{q_1}{l} = \frac{q_1}{q_1 - q_2} = \frac{Q_1}{N} > 0.$$

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:

$$T_1 = T_H, T_2 = T_X.$$



Основні властивості цього циклу формують у вигляді теорем Карно. Перша теорема Карно: ефективність циклу Карно не залежать 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:

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

$$\text{холодильна установка } \varepsilon_K = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

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

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 Карне полягає в тому, що ефективність довільного циклу можна визначити за допомогою еквівалентного йому циклу Карно за середніми термодинамічними температурами підведення і відведенням теплоти. Другий закон для циклу Карно дозволяє установити запальні 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:

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

Звідси може бути введено поняття ентропії тіла як функції стану:

$$\oint \frac{\delta q}{T} = \oint ds = 0; ds = \left(\frac{\delta q}{T}\right)_{\hat{i} \hat{a} \hat{i} \hat{\delta}}.$$

Інтеграл Клаузіуса для необоротних циклів:

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

де  $T$  — температура джерел теплоти, яка може відрізнятись 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 теплотою  $\int \frac{\delta q}{T}$  буде мірою необоротності процесу.

У теплоізолюваній 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  $Q$  теплоного джерела з температурою  $T$  визначають як максимально можливу роботу за умови, що нижнім джерелом буде навколишнє середовище з температурою  $T_H$ :

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

Втрати ексергії  $\Delta E$  за рахунок необоротності процесу в ізолюваній системі оцінюють за допомогою рівняння Гюї-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 т 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 теплоізолюваної системи.
19. Як встановити характер /оборотність/ процесів у циклі за допомогою інтеграла Клаузіуса, зміни ентропії, еквівалентного циклу Карно?
20. Поняття ексергії та анергії.
21. Як формулюють за допомогою понять ексергії та анергії другий закон термодинаміки?

### 2.3. Розв'язання задач та прикладів

1. Тепловий двигун працює за оборотним циклом Карно, віддаючи потужність 800 кВт. Знайти термічний ККД циклу і теплові потоки джерел тепла, якщо їх температури відповідно дорівнюють 1227 і 27 °С.

Дано:

$$N = 800 \text{ кВт}$$

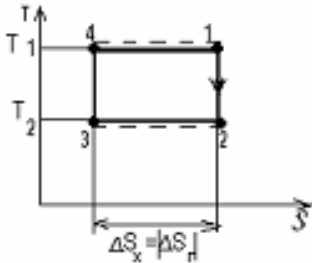
$$T_1 = \dot{Q}_A = 1227^\circ \text{N} = 1227 + 273 = 1500 \text{ К}$$



$$\dot{O}_2 = \dot{O}_o = 27^0 \tilde{N} = 27 + 273 = 300 \text{ K}$$

$\eta_t, Q_1, Q_2 - ?$

Розв'язання. Знайдемо термічний ККД:



$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{300}{1500} = 0,8.$$

Оскільки  $\eta_t = \frac{N}{Q_1}$ , теплота верхнього джерела

$$Q_1 = \frac{N}{\eta_t} = \frac{800}{0,8} = 1000 \text{ кВт.}$$

З першого закону для циклу теплота нижнього джерела  $Q_2 = Q_1 - N = 1000 - 800 = 200 \text{ кВт.}$

2. Тіло В одержує від джерела /тіла А /теплоту у кількості  $Q = 600 \text{ кДж}$ ; при цьому температура тіла В в процесі зі сталою теплоємністю  $C = 5 \text{ кДж/К}$  змінюється від  $t_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_2$ , а зміна ентропії джерела  $\Delta S_o = \Delta S_A = -0,75 \text{ кДж/К}$ . Знайти середню термодинамічну температуру тіла В,  $T_A$ , зміну ентропії даної системи, а також зниження ексергії системи внаслідок необоротного процесу теплообміну між тілами, якщо температура навколишнього середовища  $t_H = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ . Показати схему процесів в  $T, S$  -діаграмі.

Дано:

$$Q_{\bar{A}} = Q_A = -600 \text{ кДж};$$

$$Q = Q_{\bar{B}} = 600 \text{ кДж};$$

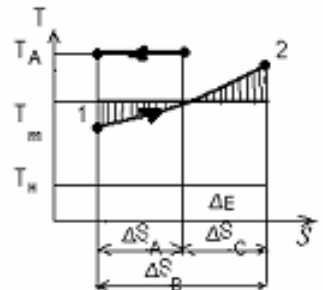
$$t_1 = t_{1B} = 200 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\Delta S_{\bar{A}} = \Delta S_A = -0,75 \text{ кДж/К};$$

$$t_H = 27 \text{ }^\circ\text{C}.$$

---


$$T_A, T_m = T_{mB}, \Delta S_c, \Delta E - ?$$



Розв'язання. Знайдемо кінцеву температуру тіла В у процесі одержання теплоти від джерела, використовуючи рівняння теплового балансу процесу  $Q = c \cdot (t_2 - t_1)$ :

$$t_2 = \frac{Q}{c} + t_1 = \frac{600}{5} + 200 = 320^\circ \text{C}.$$

Середня термодинамічна температура тіла в процесі

$$T_m = \frac{Q}{\Delta S_B} = \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{T_2}{T_1}} = \frac{120}{\ln \frac{593}{473}} = 522 \text{K};$$

$$\Delta S_B = \int_{T_1}^{T_2} \frac{\delta Q_B}{T} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{cdT}{T} = c \ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{Q}{T_m}.$$

Температура джерела:

$$T_A = \frac{Q_A}{\Delta S_A} = \frac{-600}{-0.75} = 600 \text{K}.$$

Зміна ентропії в системі;

$$\Delta S_c = \Delta S_A + \Delta S_B = -0,75 + \frac{600}{522} = 0,40 \text{кДж/К}.$$

Внаслідок необоротності, втрати експертів системи при взаємодії з навколишнім середовищем  $/t_n = 27^\circ \text{C}/$ .

$$\Delta E = \dot{Q}_i \Delta S_c = 300 \cdot 0,40 = 120 \text{кДж}$$

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 теплота тертя становить 20% зовнішнього теплового потоку до тіла?

Дано:

$$T_A = 800 \text{K}$$

$$T_{1B} = 473 \text{K}$$

$$T_{2B} = 593 \text{K}$$

$$C_B = 5 \text{кДж/К}$$

$$Q_{\text{тер}} = 0,2 Q_{\text{эф}}$$

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

$$\Delta S_e, \Delta E \text{ — ?}$$

---

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

$$Q_{\dot{a}o} = \frac{Q}{1,2} = \frac{600}{1,2} = 500 \text{ кДж,}$$

$$\text{тому } Q_{\dot{\lambda}} = Q_{\dot{\lambda}} = -Q_{\dot{a}o} = -500 \text{ кДж.}$$

Знайдемо зміну ентропії джерела і системи:

$$\Delta S_A = \frac{Q_A}{T_A} = \frac{-500}{800} = -0,625 \text{ кДж.}$$

Зміна ентропії тіла залишилась попередньою:  $\Delta S_B = 1,15 \text{ кДж/К}$ , тоді  $\Delta S_c = \Delta S_A + \Delta S_B = -0,625 + 1,15 = 0,525 \text{ кДж/К}$ . Втрати ексергії:  $\Delta E = T_H - \Delta S_c = 300 \cdot 0,525 = 157,5 \text{ кДж}$ .

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 °С 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:

$$T_H = 300 + 273 = 573 \text{ К}$$

$$T_x = 27 + 273 = 300 \text{ К}$$

$$Q_1 = 250 \text{ кВт}$$

$$\eta_t = 0,32$$

---

$$N, Q_2 \text{ — ?}$$

Розв'язання. Знайдемо корисну потужність:

$$\eta_i = N/Q_1, \quad N = \eta_i Q_1 = 250 \cdot 0,32 = 60 \text{ кВт.}$$

Тепловий потік холодного джерела

$$Q_2 = Q_1 - N = 250 - 80 = 70 \text{ кВт.}$$

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

1. Оборотний цикл при сталих температурах джерел — це цикл Карно, його ККД:

$$\eta_{\text{К}} = 1 - \frac{T_{\bar{o}}}{T_{\bar{A}}} = 1 - \frac{300}{573} = 0,48$$

більший за ККД розглядуваного циклу.

2. Знайдемо інтеграл Клаузіуса для даного циклу:

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

3. Зміна ентропії системи

$$\Delta S_c = \Delta S_{\bar{o}} + \Delta S_{\bar{A}} + \Delta S_{\bar{d.a}} = \frac{Q_2}{T_{\bar{o}}} - \frac{Q_1}{T_{\bar{A}}} + 0 = \frac{170}{300} - \frac{250}{573} = 0,13 \text{ кВт/К} > 0.$$

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

## 2.4. Домашнє завдання

Домашнє завдання оформляють аналогічно прикладам /див. підрозд. 2.3/. Спочатку записують номер задачі з варіантом /наприклад, 1-0/. Відповіді в одиницях СІ слід підкреслити і навести в кінці задачі.

Значення вихідних даних для задач, що наведені далі, вибирають із відповідних таблиць за останньою цифрою номера студента згідно із списком академгрупи.

### Задача 1

Оборотний холодильний цикл Карно здійснюється між джерелами тепла з температурами  $t_1 = \text{°C}$  та  $t_2 = \text{°C}$ , при цьому холодопродуктивність установки  $Q_2 = \text{кВт}$  /табл. 2.1/. Знайти потужність і холодильний коефіцієнт циклу.

Таблиця 2.1

Основная	$t_2, \text{°C}$	$T_1, \text{°C}$	$Q_2, \text{кВт}$
----------	------------------	------------------	-------------------

цифра номера			
1	-3	27	75
2	-5	35	250
3	0	30	100
4	-10	30	50
5	-15	25	75
6	-3	27	150
7	-5	35	50
8	0	30	200
9	-10	30	100
0	-15	25	150

### Задача 2

Тепловий насос працює за оборотним циклом Карно за температур  $t_2 = \text{°C}$  і  $t_1 = \text{°C}$  при опалювальній продуктивності  $Q_1 = \text{кВт}$ . Визначити витрату потужності, коефіцієнт опалювання циклу та зміну ентропії холодного джерела теплоти /табл. 2.2/.

Таблиця 2.2

Основная цифра номера	$t_2, \text{°C}$	$T_1, \text{°C}$	$Q_1, \text{кВт}$
1	27	67	60
2	30	50	50
3	35	70	40
4	10	70	80
5	17	57	70
6	27	67	120
7	30	50	100
8	35	70	80
9	10	70	160
0	17	57	35

### Задача 3

Тіло в ізотермічному процесі отримує теплоту  $Q = \text{кВт}$  від джерела при  $T_D = \text{К}$ , ентропія тіла змінюється на  $\Delta S_1 = \text{кВт/К}$  /табл. 2.3/. З'ясувати,

оборотний це процес чи ні і знайти температуру тіла. Чому дорівнює ексергія теплоти джерела /кВт/ і втрата ексергії за рахунок передачі цієї теплоти тілу, якщо температура навколишнього середовища  $T_H = 300$  К.

Таблиця 2.3

Основная цифра номера	$Q_I$ , кВт	$T_D$ , °C	$\Delta S_{\dot{\sigma}}$ , °C
1	500	1000	0,5
2	500	500	1,67
3	500	800	0,5
4	600	800	1,0
5	1400	700	2,0
6	1000	500	2,0
7	500	1000	0,625
8	600	300	1,2
9	1200	800	2,0
0	1200	800	1,5

#### Задача 4

Доповнити відсутніми даними про характеристики тепломеханічних циклів рядок табл. 2.4, що відповідає останній цифрі номера студента згідно із списком академгрупи. Зробити висновок про оборотність процесів в циклі.

Таблиця 2.4

Основная цифра номера	Температура джерел, К		Тепловий потік, кВт		Корисна потужність N, кВт	ККД
	гарячого $T_g$	холодного $T_x$	$Q_g$	$Q_x$		
1	1000	500	1000			60
2	750	450		300	200	50
3	800	300	1200		600	40
4	1000	600		300		80

5	750	300	1000			70
6	800	400		1200	800	120
7	1000	600	750		300	100
8	800	300		200		80
9	750	450	1800			160
0	750	300		350	250	35

## 2.5. Картки для самостійної роботи

### Варіант № 1

1. Тепловий насос працює за зворотним циклом Карно за температур  $t_2 = 27^\circ\text{C}$  і  $t_1 = 77^\circ\text{C}$  при опалювальній продуктивності  $Q_1 = 70$  кВт. Знайти витрати потужності /кВт/ і опалювальний коефіцієнт циклу.

2. Тіло зі сталою температурою  $\dot{Q}_0$  одержує теплоту  $Q = 1000$  кДж від джерела з  $T_D = 1000$  К, ентропія тіла зменшується на  $1,25$  кДж/К. З'ясувати, оборотний це процес чи ні, знайти  $T_T$  і зміну ентропії системи кДж/К.

3. Джерело, змінюючи свою температуру від  $\dot{Q}_{\lambda_1} = 1000$  до  $\dot{Q}_{\lambda_2} = 800$  К, обмінюється енергією у формі теплоти з тілом, що має температуру  $T_T = 600$  К. Побудувати в  $T, S$  -діаграмі процеси зміни стану тіла і джерела, зазначивши теплоту і зміну ентропії системи.

4. Відповідно до умови задачі 2 знайти, яка максимальна робота /кДж/ може бути одержана за рахунок теплоти джерела, якщо нижнє джерело — навколишнє середовище з температурою  $T_H = 300$  К. Знайти втрати ексергії /кДж/ у результаті віддачі цієї теплоти тілу.

5. В циклі теплового двигуна з температурою джерел  $T_T = 1200$  К,  $T_X = 300$  К тепловий потік від верхнього джерела дорівнює  $100$  кВт,  $\eta_i = 0,75$ . Знайти потужність /секундну роботу/ двигуна /кВт/. З'ясувати, чи виконуються умови оборотності в циклі.

### Варіант № 2

1. Тепловий двигун працює за циклом Карно за температур  $t_1 = 627^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = 27^\circ\text{C}$ . Кількість теплоти, що підводиться,  $q_1 = 700$  кДж/кг. Знайти роботу циклу (кДж/кг).

2. Тіло з температурою  $T_T = 800$  К одержує теплоту  $Q = 200$  кДж від джерела зі сталою температурою  $T_A$ , ентропія джерела зменшується-

ся на  $0,25 \text{ кДж/К}$ . З'ясувати оборотний це процес чи ні, знайти  $T_D$  та зміну ентропії системи ( $\text{кДж/К}$ ),

3. Джерело з температурою  $T_D = 1200 \text{ К}$  передає теплоту тілу, яке змінює при цьому свою температуру з  $\dot{Q}_1 = 800$  до  $\dot{Q}_2 = 1000 \text{ К}$ . Побудувати в  $T, S$  -діаграмі процеси зміни стану тіла і джерела, зазначивши теплоту і зміну ентропії системи.

4. За умовою задачі 2 знайти, яку максимальну роботу  $\text{/кДж/}$  можна одержати від тіла за рахунок наданої йому теплоти, якщо холодним джерелом є навколишнє середовище з температурою  $T_H = 290 \text{ К}$ . Які втрати ексергії  $\text{/кДж/}$  в разі передачі цієї теплоти від джерела до тіла?

5. В циклі теплового двигуна з температурами джерел  $\dot{Q}_A = 1500 \text{ К}$ ,  $T_x = 300 \text{ К}$  корисна потужність дорівнює  $150 \text{ кВт}$ , тепловий потік до холодного джерела  $50 \text{ кВт}$ . Знайти  $\eta_i$  циклу. З'ясувати, чи виконуються умови оборотності в циклі.

### **Варіант № 3**

1. Холодильна машина працює за зворотним циклом Карно між джерелами з температурами  $t_2 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ , холодопродуктивність установки  $Q_2 = 200 \text{ кВт}$ . Знайти витрати потужності  $\text{/кВт/}$  і холодильний коефіцієнт циклу.

2. Тіло з температурою  $T_T = 600 \text{ К}$  одержує теплоту  $Q = 1200 \text{ кДж}$  від джерела з температурою  $T_D = 800 \text{ К}$ . Знайти зміну ентропії системи ( $\text{кДж/К}$ ) у цьому процесі.

3. Джерело, змінюючи свою температуру з  $\dot{Q}_{A_1} = 1500$  до  $\dot{Q}_{A_2} = 300 \text{ К}$ , змінюється енергією у вигляді теплоти з тілом, температура якого підвищується від  $\dot{Q}_{O_1} = 800 \text{ К}$  до  $\dot{Q}_{O_2} = 1000 \text{ К}$ . Побудувати в  $T, S$  -діаграмі процеси зміни стану тіла і джерела, зазначивши теплоту і зміну ентропії системи.

4. Згідно з умовою задачі 2 знайти, яка максимальна робота  $\text{/кДж/}$  може бути одержана за рахунок теплоти джерела, якщо нижнє джерело - навколишнє середовище з температурою  $\dot{Q}_f = 300 \text{ К}$ . Чому дорівнюють втрати ексергії  $\text{/кДж/}$  в результаті передачі цієї теплоти тілу?



5. В циклі теплового двигуна з температурами джерел  $T_T = 1000 \text{ К}$ ,  $\dot{Q}_o = 400 \text{ К}$  тепловий потік від верхнього джерела становить 300 кВт, корисна потужність 180 кВт. Знайти ККД циклу, а також з'ясувати виконання умови оборотності.

#### **Варіант № 4**

1. Робоче тіло здійснює цикл Карно в інтервалі температур  $t_1 = 1727 \text{ }^\circ\text{C}$  і  $t_2 = 327 \text{ }^\circ\text{C}$ , виконуючи при цьому роботу 1000 кДж. Знайти  $Q_1$  /кДж/.

2. Тіло з температурою  $T_T = 600 \text{ К}$  дістає теплоту від джерела з температурою  $T_D = 900 \text{ К}$ , ентропія джерела при цьому зменшується на 1,0 кДж/К. Знайти теплоту /кДж/ та зміну ентропії системи (кДж/К).

3. За умовою попередньої задачі побудувати в  $T, S$  -діаграмі процеси зміни стану тіла і джерела, зазначивши теплоту та зміну ентропії системи.

4. За умовою задачі 2 знайти, яку максимальну роботу /кДж/ можна одержати від тіла за рахунок теплоти, яка передається йому, якщо холодним джерелом є навколишнє середовище з  $T_H = 290 \text{ К}$ . Які втрати ексергії /кДж/ при передачі цієї теплоти від джерела до тіла?

5. В циклі теплового двигуна з температурами джерел  $T_T = 1600 \text{ К}$  і  $T_x = 400 \text{ К}$  тепловий потік до нижнього джерела 25 кВт,  $\eta_t = 0.75$ . Знайти корисну потужність /кВт/, а також з'ясувати, чи виконуються умови оборотності в циклі.

#### **Варіант № 5**

1. Тепловий насос працює за зворотним циклом Карно за температур  $t_2 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$  і  $t_1 = 67 \text{ }^\circ\text{C}$  при опалювальній продуктивності  $Q_1 = 50 \text{ кВт}$ . Знайти потужність /кВт/ та коефіцієнт спалювання циклу.

2. Тіло зі сталою температурою  $T_T$  дістає теплоту  $Q_T = 1000 \text{ кДж}$  від джерела з  $T_D = 800 \text{ К}$ , ентропія тіла змінюється на 1,25 кДж/К. З'ясувати, оборотний це процес чи ні, знайти  $T_T$  і зміну ентропії системи (кДж/К).

3. Джерело, змінюючи свою температуру з  $T_{Д1} = 1200$  К до  $T_{Д2} = 1000$  К, передає теплоту тілу я температурою  $T_T = 800$  К. Побудувати в  $T, S$ -діаграмі процеси зміни стану тіла і джерела, зазначивши теплоту і зміну ентропії системи.

4. Відповідно до умови задачі 2 знайти, яка максимальна робота /кДж/ може бути одержана за рахунок теплоти джерела, якщо нижнє джерело — навколишнє середовище з температурою  $T_H = 300$  К. Чому дорівнюють втрати ексергії /кДж/ в результаті передачі цієї теплоти тілу?

5. В циклі теплового двигуна з температурами джерел  $T_T = 1200$  К і  $\dot{O}_\delta = 600$  К, тепловий потік від верхнього джерела становить 200 кВт,  $\eta_t = 0,6$ . Знайти потужність двигуна /кВт/. З'ясувати, чи виконуються умови оборотності в циклі.

### Варіант № 6

1. Тепловий двигун працює за циклом Карно за температур  $t_T = 727$  °С і  $t_x = 127$  °С. Кількість теплоти, що підводиться,  $q_1 = 1000$  кДж/кг. Визначити роботу циклу (кДж/кг).

2. Тіло з температурою  $T_T = 800$  К одержує теплоту  $Q = 200$  кДж від джерела зі сталою температурою в результаті ентропія джерела зменшується на 0,2 кДж/К. З'ясувати, оборотний це процес чи ні, знайти  $T_A$  і зміну ентропії системи (кДж/К).

3. Джерело з температурою  $T_D = 1500$  К передає теплоту тілу, яке при цьому змінює свою температуру з  $T_{T1} = 1000$  до  $T_{T2} = 1200$  К. Побудувати  $T, S$ -діаграмі процеси зміни стану джерела і тіла, вказавши теплоту і зміну ентропії системи.

4. За умовою задачі 2 визначити, яку максимальну роботу /кДж/ можна отримати від тіла за рахунок переданої йому теплота, якщо холоднє джерело — навколишнє середовище з  $T_H = 290$  К. Які втрати ексергії /кДж/ при передачі цієї теплоти від джерела до тіла?

5. В циклі теплового двигуна з температурами джерел  $T_T = 1000$  К і  $T_x = 400$  К корисна потужність дорівнює 120 кВт, тепловий потік до холодного джерела 80 кВт. Визначити  $\eta_t$  циклу, з'ясувати, чи виконуються умови оборотності в циклі.

### **Варіант № 7**

1. Холодильна машина працює за зворотним циклом Карно між джерелами з температурами  $t_x = -10^\circ\text{C}$ ,  $t_r = 35^\circ\text{C}$ , холодопродуктивність установки  $Q_2 = 150$  кВт. Знайти потужність /кВт/ і холодильний коефіцієнт циклу.

2. Тіло з температурою  $T_T = 600$  К дістає теплоту  $Q = 1800$  кДж від джерела з температурою  $T_D = 900$  К. Знайти зміну ентропії системи (кДж/К).

3. Джерело, змінюючи свою температуру від  $\dot{O}_{\dot{A}_1} = 1200$  до  $\dot{O}_{\dot{A}_2} = 1000$  К, обмінюється енергією в формі теплоти з тілом, температура якого підвищується від  $T_{\dot{O}_1} = 300$  до  $\dot{O}_{\dot{O}_2} = 800$  К. Побудувати в  $T, S$ -діаграмі процеси зміни стану тіла і джерела, зазначивши теплоту і зміну ентропії системи.

4. Згідно з умовою задачі 2 визначити, яка максимальна робота /кДж/ може бути одержана за рахунок теплоти джерела, якщо нижнє джерело, навколишнє середовище з температурою  $T_n = 300$  К. Чому дорівнюють втрата ексергії /кДж/ в результаті передачі цієї теплоти тілу?

5. В циклі теплового двигуна з температурами джерел  $T_T = 900$  К і  $\dot{O}_{\dot{O}} = 300$  К тепловий потік від верхнього джерела становить 200 кВт, корисна потужність 150 кВт. Знайти ККД циклу і визначити, чи виконуються в циклі умови оборотності.

### **Варіант № 8**

1. Робоче тіло здійснює цикл Карно в інтервалі температур  $t_{\dot{A}} = 927^\circ\text{C}$  і  $t_{\dot{X}} = 27^\circ\text{C}$ , виконуючи при цьому роботу 2000 кДж. Знайти  $Q_1$  /кДж/.

2. Тіло з температурою  $T_T = 800$  К дістає теплоту від джерела з  $T_{\dot{A}} = 1000$  К, ентропія джерела при цьому зменшується на 2,0 кДж/К. Знайти теплоту /кДж/ і зміну ентропії системи (кДж/К).

3. За умовою попередньої задачі побудувати в  $T, S$ -діаграмі процеси зміни стану тіла і джерела, зазначивши теплоту і зміну ентропії системи.

4. Згідно з умовою задачі 2 знайти, яку максимальну роботу /кДж/ можна отримати від тіла за рахунок теплоти, яка йому віддається, якщо хо-

лодне джерело є навколишнє середовище з  $\dot{O}_i = 290 \text{ К}$ . Які втрати ексергії /кДж/ в разі передачі цієї теплоти від джерела до тіла?

5. В циклі теплового двигуна з температурами джерел  $T_T = 1200 \text{ К}$  і  $T_X = 300 \text{ К}$  тепловий потік до нижнього джерела 80 кВт,  $\eta_t = 0,6$ . Знайти корисну потужність /кВт/. З'ясувати, чи виконуються умови оборотності.

### **Варіант № 9**

1. Тепловий насос працює за зворотним циклом Карно за температур  $t_X = 17 \text{ }^\circ\text{С}$  і  $t_T = 87 \text{ }^\circ\text{С}$ . Опалювальна продуктивність  $Q = 50 \text{ кВт}$ . Знайти потужність /кВт/ і опалювальний коефіцієнт.

2. Тіло зі сталою температурою  $T_T$  дістає кількість теплоти  $Q = 2000 \text{ кДж}$  від джерела з  $\dot{O}_A = 1000 \text{ К}$ , ентропія тіла змінюється на  $2,5 \text{ кДж/К}$ . З'ясувати, оборотний це процес чи ні, знайти  $T_T$  і зміну ентропії системи (кДж/К).

3. Джерело, змінюючи свою температуру з  $T_{A_1} = 1500$  до  $T_{A_2} = 1000 \text{ К}$ , обмінюється енергією у вигляді теплоти з тілом, температура якого  $T_T = 500 \text{ К}$ . Побудувати в  $T, S$  -діаграмі процеси зміни стану тіла і джерела, зазначивши теплоту та зміну ентропії системи.

4. Відповідно до умови задачі 2 знайти, яка максимальна робота /кДж/ може бути одержана за рахунок теплоти джерела, якщо нижнє джерело — навколишнє середовище з температурою  $T_H = 300 \text{ К}$ . Чому дорівнюють втрати ексергії /кДж/ У результаті передачі цієї теплоти тілу?

5. В циклі теплового двигуна з температурами джерела  $T_T = 1200 \text{ К}$  і  $\dot{O}_o = 300 \text{ К}$  тепловий потік від верхнього джерела становить 300 кВт,  $\eta_t = 0,6$ . Знайти потужність двигуна /кВт/. З'ясувати, чи виконуються умови оборотності в циклі.

### **Варіант № 10**

1. Тепловий двигун працює за циклом Карно за температур  $t_1 = 377 \text{ }^\circ\text{С}$  і  $t_2 = 127 \text{ }^\circ\text{С}$ . Кількість теплоти, що підводиться,  $q_1 = 700 \text{ кДж/кг}$ . Знайти роботу циклу (кДж/К).

2. Тіло з температурою  $T_T = 800 \text{ К}$  дістає кількість теплоти  $Q = 1000 \text{ кДж}$  від джерела зі сталою температурою  $T_D$ , ентропія джерела зменшуються на  $1 \text{ кДж/К}$ . З'ясувати, оборотний це процес чи ні. Знайти  $T_D$ , зміну ентропії системи (кДж/К).

3. Джерело з температурою  $\dot{O}_A = 1000$  К обмінюється енергією у вигляді теплоти з тілом, температура якого в результаті підвищується з  $T_{T_1} = 500$  до  $T_{T_2} = 700$  К. Побудувати в  $T, S$  -діаграмі процеси зміни стану тіла і джерела, зазначивши теплоту та зміну ентропії системи.

4. Згідно з умовою задачі 2 знайти, яку максимальну роботу /кДж/ можна одержати від тіла за рахунок теплоти, яка йому передається, якщо нижнє джерело — навколишнє середовище з температурою  $T_H = 290$  К. Чому дорівнюють втрати ексергії /кДж/ в результаті передачі цієї теплоти тілу?

5. В циклі теплового двигуна з температурами джерел  $T_T = 1000$  К і  $\dot{O}_\delta = 400$  К корисна потужність 75 кВт, тепловий потік до холодного джерела 25 кВт. Знайти  $\eta_t$  циклу, з'ясувати, чи виконуються в циклі умови оборотності.

### **Варіант № 11**

1. Холодильна машина працює за зворотним циклом Карно між джерелами з температурами  $t_2 = -20$  °С і  $t_1 = 30$  °С, холодопродуктивність установки  $Q_2 = 100$  кВт. Знайти потужність /кВт/ та холодильний коефіцієнт циклу.

2. Тіло з температурою  $T_T = 800$  К дістає кількість теплота  $Q = 2000$  кДж від джерела з температурою  $T_A = 1000$  К. Знайти зміну ентропії системи кДж/К).

3. Джерело, змінюючи свою температуру від  $T_{D1} = 1000$  до  $T_{D2} = 700$  К, обмінюється енергією у вигляді теплоти з тілом, температура якого в результаті підвищується від  $\dot{O}_{\delta_1} = 500$  до  $\dot{O}_{\delta_2} = 800$  К. Побудувати в  $T, S$  -діаграмі процеси зміни стану тіла та джерела, зазначивши теплоту та зміну ентропії системи.

4. Згідно з умовою задачі 2 знайти, яка максимальна робота /кДж/ може бути отримана за рахунок теплоти джерела, якщо нижнє джерело - навколишнє середовище з температурою  $T_H = 300$  К. Чому дорівнюють втрати ексергії /кДж/ в результаті передачі цієї теплоти тілу?

5. У циклі теплового двигуна з температурами джерел  $T_T = 1200$  К,  $T_X = 300$  К тепловий потік від верхнього джерела дорівнює 200 кВт, кори-

сна потужність 120 кВт. Визначити ККД циклу, з'ясувати, чи дотримуються в циклі умови оборотності.

### **Варіант № 12**

1. Робоче тіло здійснює цикл Карно в межах температур  $t_1 = 927\text{ }^\circ\text{C}$  і  $t_2 = 177\text{ }^\circ\text{C}$ , виконуючи при цьому роботу 1500 кДж. Знайти  $Q$  /кДж/.

2. Тіло з температурою  $T_T = 800\text{ К}$  дістає теплоту від джерела з  $T_A = 1600\text{ К}$ , ентропія джерела при цьому зменшується на 1,25 кДж/К. Знайти теплоту /кДж/ і зміну ентропії системи (кДж/К).

3. За умовою попередньої задачі побудувати в  $T, S$  -діаграмі процеси зміни стану тіла і джерела, зазначивши теплоту і зміну ентропії системи.

4. За умовою задачі 2 знайти, яку максимальну роботу /кДж/ можна дістати від тіла за рахунок переданої йому теплоти, якщо холодні, джерело — навколишнє середовище з  $T_H = 290\text{ К}$ . Які втрати ексергії /кДж/ в разі передачі цієї теплоти від джерела до тіла?

5. У циклі теплового двигуна з температурами джерел  $T_T = 1000\text{ К}$  і  $T_X = 400\text{ К}$  тепловий потік до нижнього джерела становить 100 кВт,  $\eta_t = 0,5$ . Знайти корисну потужність /кВт/. З'ясувати, чи виконуються в циклі умови оборотності.

### **Варіант № 13**

1. Тепловий насос працює за зворотним циклом Карно при  $t_2 = 27\text{ }^\circ\text{C}$  і  $t_1 = 77\text{ }^\circ\text{C}$  при опалювальній продуктивності  $Q_I = 70\text{ кВт}$ . Знайти потужність /кВт/ і опалювальний коефіцієнт теплового насоса.

2. Тіло зі сталою температурою  $T_T$  дістає кількість теплоти  $Q = 1000\text{ кДж}$  від джерела з  $T_D = 1000\text{ К}$ , ентропія тіла змінюється на 1,25 кДж/К. З'ясувати, оборотний це процес чи ні, знайти  $T_T$  і зміну ентропії системи (кДж/К).

3. Джерело, змінюючи свою температуру з  $T_{A_1} = 1000$  до  $T_{A_2} = 600\text{ К}$ , передає теплоту тілу з температурою  $T_T = 600\text{ К}$ . Побудувати в  $T, S$  -діаграмі процеси зміни стану тіла і джерела, зазначивши теплоту і зміну ентропії системи.

4. Відповідно до умови задачі 2 знайти, яка максимальна робота /кДж/ може бути одержана за рахунок теплоти джерела, якщо нижнє джерело — навколишнє середовище з температурою  $T_H = 300$  К. Чому дорівнюють втрати ексергії /кДж/ у результаті передачі цієї теплоти тілу?

5. В тепловому двигуні з температурами джерел  $T_T = 1200$  К,  $T_X = 300$  К, тепловий потік від верхнього джерела становить 100 кВт,  $\eta_t = 0,75$ . Знайти потужність двигуна /кВт/. З'ясувати, чи виконуються в циклі умови оборотності.

### **Варіант № 14**

1. Тепловий двигун працює за циклом Карно при  $t_T = 627$  °С і  $t_X = 27$  °С. Знайти роботу двигуна (кДж/кг) при підведенні від гарячого джерела до робочого тіла 700 кДж/кг теплоти.

2. Тіло, температура якого  $T_T = 800$  К дістає кількість теплоти 200 кДж від джерела зі сталою температурою  $T_D$ , ентропія джерела зменшується на 0,25 кДж/К. З'ясувати, оборотний це процес чи ні, знайти  $T_D$  і зміну ентропії системи (кДж/К).

3. Джерело з температурою  $T_D = 1200$  К передає теплоту тілу, яке при цьому змінює свою температуру з  $T_{D_1} = 800$  до  $T_{D_2} = 1000$  К Побудувати в  $T, S$  -діаграмі процеси зміни стелу тіла і джерела, зазначивши теплоту і зміну ентропії системи.

4. За умовою задачі 2 знайти, яку максимальну роботу /кДж/ можна одержати від тіла за рахунок теплоти, яка йому передається, якщо холоднє джерело — навколишнє середовище з  $T_H = 290$  К. Які втрати ексергії /кДж/ при передачі цієї теплоти від джерела до тіла?

5. Цикл теплового двигуна з температурами джерел  $T_T = 1500$  К і  $T_X = 300$  К має корисну потужність 150 кВт, тепловий потік до холодного джерела 50 кВт. Знайти  $\eta_t$  двигуна, з'ясувати, чи виконуються умови оборотності в установці.

### **Варіант № 15**

1. Холодильна машина працює за зворотним циклом Карно між джерелами з температурами  $t_X = -20$  °С і  $t_T = 30$  °С, холодопродуктивність установки  $Q = 200$  кВт. Знайти потужність /кВт/ і холодильний коефіцієнт установки.

2. Тіло, температура якого  $T_T = 600$  К, дістає кількість теплоти  $Q = 1200$  кДж від джерела з температурою  $T_D = 800$  К. Знайти зміну ентропії системи (кДж/К).

3. Джерело, змінюючи свою температуру з  $T_{\dot{A}_1} = 1500$  до  $T_{\dot{A}_2} = 1300$  К, передає теплоту тілу, температура якого в результаті підвищується з  $T_{\dot{O}_1} = 600$  до  $T_{\dot{O}_2} = 1000$  К. Побудувати в  $T, S$ -діаграмі процеси зміни стану тіла і джерела, зазначивши теплоту і зміну ентропії системи.

4. Відповідно до умови задачі 2 знайти максимальну роботу /кДж/, яка може бути одержана за рахунок теплоти джерела, якщо нижнє джерело — навколишнє середовище з температурою  $T_H = 300$  К. Чому рівні втрати ексергії /кДж/ в результаті передачі цієї теплоти тілу?

5. При роботі теплового двигуна з температурами джерела  $T_T = 1000$  К і  $T_X = 400$  К тепловий потік від верхнього джерела становить 300 кВт, корисна потужність 180 кВт. Знайти ККД циклу, з'ясувати, чи виконуються в циклі умови оборотності.



## Література

1. Кириллин В.А., Сичев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. — М.: Наука, 1979. — 512 с.
2. Чечеткин А.В., Занемонец Н.А. Теплотехника. — М.: Высш.як., 1986. — 344 с.
3. Алабовськжй А.Н., Константинов СМ., Недужий И.А.
4. Теплотехника. — К.: Выща шк., 1986. — 255 с.
5. Чеботарев В.А., Босий В.В., Куделя П.П. Основные расчеты по темам 1 и 2 законов термодинамики. — К.: КПИ, 1977. — 40 с.

Навчальне видання  
Перший та другий закони термодинаміки  
Методичні вказівки  
до самостійної роботи з дисципліни "Теплотехніка"  
для студентів інженерно-технічних спеціальностей  
Укладач Дешко Валерій Іванович

Редактор А.Д. Пантелієнко  
Коректори: В.Я.Резник, Б.М.Українець, И.М.Дзьома