

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних робіт студентів

напрямків підготовки: 6.050502 Інженерна механіка

6.050503 Машинобудування

Рекомендовано Вченою радою інженерно-хімічного факультету

Київ
НТУУ «КПІ»
2013

Теоретичні основи теплотехніки

Метод. вказівки до виконання практичних робіт студентів з дисципліни «**Теоретичні основи теплотехніки**» для студентів напрямків підготовки: 6.050502 Інженерна механіка 6.050503 Машинобудування / Укладачі: І.Л. Шилович, Т.Б. Шилович. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 21 с.

*Гриф надано Вченою радою ІХФ
(Протокол № 3 від 03.04. 2013 р.)*

Навчальне видання

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «**Теоретичні основи теплотехніки**» для студентів напрямків підготовки: 6.050502 Інженерна механіка, 6.050503 Машинобудування

Авторська редакція

Укладачі:

І.Л. Шилович, к.т.н., доц.

Т.Б. Шилович, к.т.н.

Відповідальний редактор

Є.М. Панов, д.т.н., проф.

Рецензент:

М.В. Коржик, к.т.н., доц.

Зміст

Вступ	4
<i>Тема 1.</i> Одиниці виміру фізичних величин, параметри стану та характеристики термодинамічних процесів	5
<i>Тема 2.</i> Розв'язання задач по обчисленню параметрів стану робочого тіла та характеристик процесів ідеального газу.	6
<i>Тема 3.</i> Перший закон термодинаміки та його застосування для термодинамічних процесів відкритих та ізольованих систем. Перший закон термодинаміки для потоку.....	6
<i>Тема 4.</i> Циклічні процеси. Цикл Карно. Принципи роботи теплового двигуна, холодильної машини. Поняття про ККД циклу. Обернені та не обернені процеси. Розв'язання задач на застосування Другого закону термодинаміки. Окремі вирази для ККД теплового двигуна, холодильної машини та теплового насосу	12
<i>Тема 5.</i> Застосування Другого закону термодинаміки для аналізу ефективності термодинамічних процесів за критеріями оберненості у ізольованих та відкритих системах. Друга теорема Карно.....	14
<i>Тема 6.</i> Реальні гази. Таблиці та діаграми термодинамічного стану реальних газів. Властивості водяної пари. Процеси водяної пари. Призначення та структура таблиць водяної пари. Знайомство з електронною таблицею термодинамічних властивостей робочих тіл (вода, насичена волога водяна пара, суха пара, перегріта пара). Призначення та вигляд в h,s – діаграми водяної пари	17
<i>Тема 7.</i> Конструкція та принципи дії паросилової установки (ПСУ). Цикл паросилової установки. Приклади побудови циклу ПСУ в h,s – діаграмі	21
Література	21

ВСТУП

Дисципліна «Теоретичні основи теплотехніки» відноситься до циклу дисциплін вільного вибору ВНЗ, варіативної частини програми, професійна складова навчального плану бакалаврів за напрямками підготовки 6.050502 «Інженерна механіка», 6.050503 Машинобудування. Згідно з ОКХ курс «Теоретичні основи теплотехніки» формує відповідні компетенції, а саме здатність виконувати чисельні та експериментальні дослідження, обробляти та аналізувати результати випробувань обладнання, випробувань об'єктів, вузлів, машин і механізмів; здатність приймати і обґрунтовувати конкретні технічні рішення при створенні нових і модернізації відомих видів техніки і технологій.

Дисципліна складається з одного кредитного модуль, відноситься до вибіркової частини навчальної програми (дисципліна вільного вибору ВНЗ), входить до циклу професійної та практичної підготовки студентів і являється спеціалізуючою в галузі машинобудування та виробництва та переробки упаковок з полімерних матеріалів.

Вивчення матеріалу дисципліни базується на широкому використанні фізичних уявлень та теоретичних положень фундаментальних і загальноінженерних дисциплін, які розкривають фізичну сутність термодинамічних процесів. Успішне засвоєння матеріалу дисципліни потребує від студентів підготовки з вищої математики, інформатики, нарисної геометрії, хімії, фізики, та інших наук.

Метою вивчення кредитного модуля "Теоретичні основи теплотехніки" являється оволодіння системою типових завдань діяльності, які студент здатен вирішувати згідно вимог ОПП.

У рамках розробки технологічних регламентів, на підставі термодинамічних принципів перетворення теплоти, а також даних щодо фізичних властивостей виробничої продукції, за допомогою спеціальної та довідкової літератури вибирати певні процеси та робити виробничу оцінку технологічним процесам (нагрівання, охолодження, випаровування, конденсацію, плавлення, твердіння, випарювання, кристалізацію, одержання штучного холоду тощо), За допомогою відомих методик планування й здійснення наукових досліджень з метою

вдосконалення виробництва, використовуючи дослідні установки і контрольно-вимірювальні прилади в умовах дослідної лабораторії або дослідної ділянки вміти провести експеримент.

Тема 1. Одиниці виміру фізичних величин, параметри стану та характеристики термодинамічних процесів.

Мета практичного заняття – сформулювати знання про основні фізичні величини, параметри стану та характеристики термодинамічних процесів.

Теоретичні відомості.

Величини, що характеризують даний стан робочого тіла, називають параметрами стану. Розрізняють термічні (тиск, p , Па; температура, $t, ^\circ\text{C}$, T , К та питомий об'єм, v , $\text{м}^3/\text{кг}$) та калоричні (ентальпія H , Дж; внутрішня енергія U , Дж; ентропія, S , Дж) параметри стану. Величини, віднесені до одиниці маси називаються питомими: питома ентальпія: $h = \frac{H}{m}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

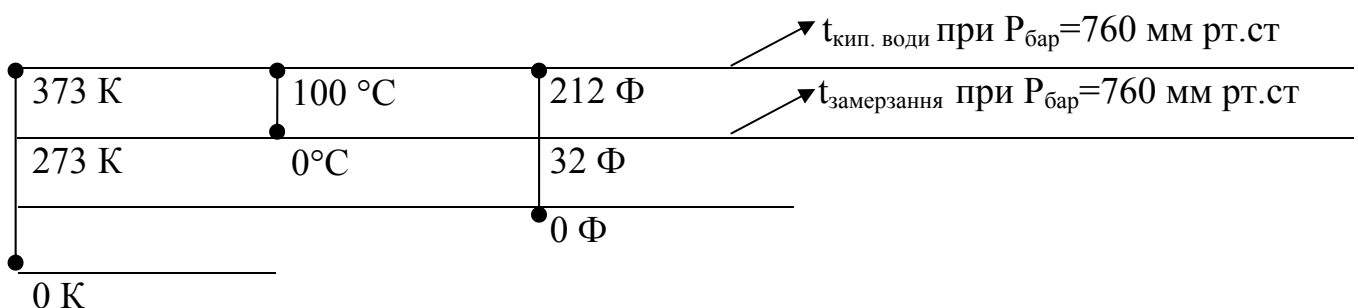
Завдання 1.

1. Установити співвідношення між одиницями роботи:

$$1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = \dots \text{ Дж} = \dots \text{ кДж} = \dots \text{ ккал}$$

2. Яка температура вище: 40°C або 340 К ? Виразити інтервал $\Delta T=40 \text{ К}$ у градусах за шкалою Цельсія, $^\circ\text{C}$.

3. Нормальна температура тіла людини $t=36,6^\circ\text{C}$. Скільки це за шкалою Фаренгейта? Співвідношення шкал Цельсія, Кельвіна й Фаренгейта представлено на схемі на рисунку 1.



4. Тиск у посудині становить $p_{\text{хат}}=0,45 \text{ бар}$, барометричний тиск $p_{\text{бар}}=760 \text{ мм рт.ст}$. Знайти абсолютний тиск в апаратах в *бар* і *МПа*.

Тема 2. Розв'язання задач по обчисленню параметрів стану робочого тіла та характеристик процесів ідеального газу.

Мета практичного заняття – сформувати уміння самостійно розв'язувати задачі по обчисленню параметрів стану робочого тіла та характеристик процесів ідеального газу.

Завдання 2.

1. В об'ємі $V=0,9 \text{ м}^3$ знаходиться 1,5 кг газу CO при заданих умовах. Знайти питомий об'єм та густину.

Розв'язання:

$$V=0,9 \text{ м}^3$$

$$m = 1,5 \text{ кг}$$

Знайти: ρ , кг/м^3 , v , $\text{м}^3/\text{кг}$ -?

$$\text{Питомий об'єм } v = \frac{V}{m} = \frac{0,9}{1,5} = 0,6 \text{ (м}^3/\text{кг)},$$

$$\text{Густина } \rho = \frac{1}{v} = 1,67 \text{ (кг/м}^3)$$

2. Визначити густину газу при нормальних умовах та питомий об'єм CO_2 і H_2 . Який із газів легший?

3. В об'ємі $V=0,9 \text{ м}^3$ знаходиться 1,5 кг газу CO при заданих умовах. Знайти питомий об'єм та густину за нормальних умов.

4. Визначити густину газу при нормальних умовах та питомий об'єм O_2 і N_2 . Який із газів легший?

Тема 3. Перший закон термодинаміки та його застосування для термодинамічних процесів відкритих та ізольованих систем. Перший закон термодинаміки для потоку.

Мета практичного заняття – сформувати уміння самостійно розв'язувати задачі із застосуванням першого закону термодинаміки.

Теоретичні відомості. Згідно Першому закону термодинаміки, робота (L_{1-2}), яку може виконати робоче тіло у процесі 1-2, дорівнює підведеній теплоті (Q_{1-2}) за

винятком зміни внутрішньої енергії робочого тіла (ΔU_{1-2}):

$$L_{1-2} = Q_{1-2} - \Delta U_{1-2}$$

Дане рівняння виражає те, що якщо підвести до робочого тіла деяку певну кількість теплоти, то в результаті розширення робочого тіла можна одержати певну кількість корисної роботи. Для того, щоб робоче тіло знову могло виконати роботу, необхідно повернути робоче тіло в початковий стан, що вимагає витрати певної кількості енергії.

Описаний замкнутий цикл показано на рисунку 2 в T,s – діаграмі.

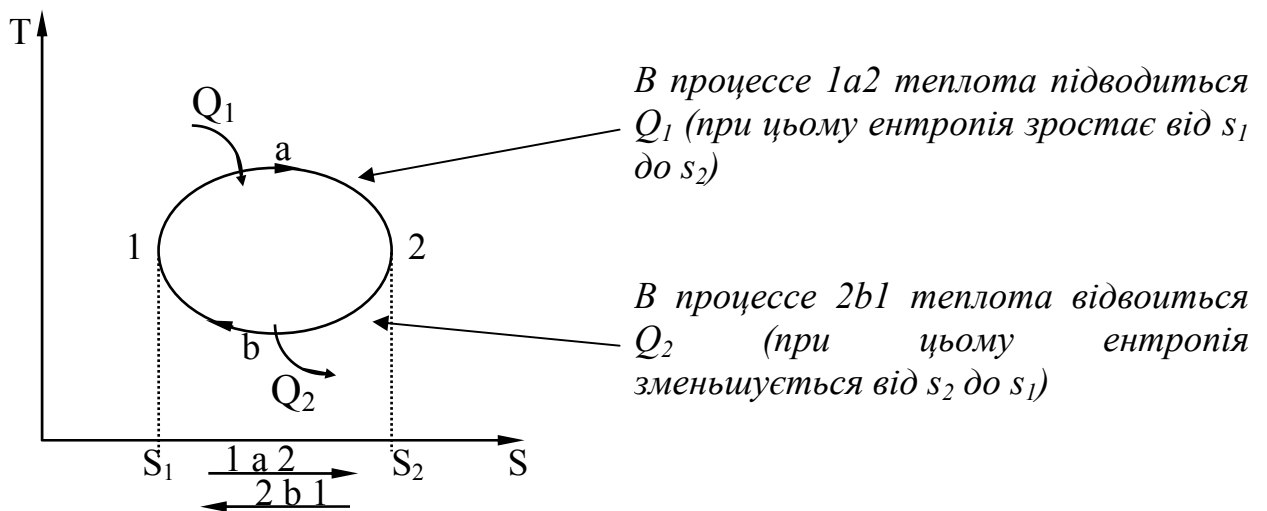


Рис.2 Замкнутий цикл в T,s – діаграмі.

Завдання 3.

В оборотному термодинамічному процесі $pv^{1,2} = \text{const}$ питомий об'єм газу змінився від $v_1 = 2$ (і³/êã) до $v_2 = 4$ (і³/êã). Тиск газу в процесі $p = 2$ МПа. Обчислити термодинамічну роботу в процесі.

Пояснення до рішення.

Робота оборотного термодинамічного процесу обчислюється за формулами:

- повна робота всієї кількості (масою m , кг) робочого тіла

$$L = \int_{v_1}^{v_2} p(V) dV, \text{ Дж} \quad (1)$$

де $p(V) = f(V)$ - деяка функція всього (повного) об'єму, що займає газ; V - весь (повний) об'єм, м³.

- питома робота одиниці кількості (1 кг) робочого тіла

$$l = \frac{L}{m} = \int_{v_1}^{v_2} p(v) dv, \quad \text{Дж/кг} \quad (2)$$

де $v = \frac{V}{m}$ - питомий об'єм, м³/кг.

Для рішення обираємо формулу (2). Для підстановки у формулу (2) залежності тиску від питомого об'єму скористаємося рівнянням процесу $pv^{1,2} = \text{const}$, що являє собою залежність $p(v)$, задану в неявному вигляді. Тобто,

$$p(v) = \frac{\text{const}}{v^{1,2}} \quad (3)$$

Підставляємо (3) в (2) і інтегруємо в межах v_1 до v_2 . Одержуємо

$$l = \frac{L}{m} = \int_{v_1}^{v_2} p(v) dv = \text{const} \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v^{1,2}} = p_1 v_1 \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v^{1,2}} \quad (4)$$

У формулі (4) очевидна заміна $\text{const} = p_1 v_1$ тому що з рівняння процесу треба знайти значення константи:

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 = \dots = \text{const}.$$

Рішенням $\int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v^{1,2}}$ є інтеграл виду $\int_{x_1}^{x_2} x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1}$. (ПРИМІТКА: в нашому випадку

$$\text{інтегралі } \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v^{1,2}} = \left. \frac{v^{-1,2+1}}{-1,2+1} \right|_{v_1}^{v_2})$$

В остаточній відповіді для оцінки розмірності роботи необхідно врахувати те, що тиск виражений у МПа (МПа = МН/м²), а питомий об'єм м³/кг; отже, робота буде мати розмірність МДж/кг.

Завдання 4.

При ізобарному оборотному процесі течії потоку газу потенційна енергія тиску змінилася від початкового значення 200 МДж до 100 МДж. Визначити термодинамічну роботу течії газу.

Пояснення до рішення. Для рішення завдання скористаємося рівнянням Першого

закону термодинаміки для потоку газу.

Як відомо Перший закон термодинаміки має дві форми запису:

$$Q = \Delta U + L \quad (5)$$

$$Q = \Delta H + L_p \quad (6)$$

Рівняння Першого закону термодинаміки для потоку газу:

$$Q = \Delta U + \Delta(pV) + G\Delta\left(\frac{w^2}{2}\right) + Gg\Delta z + L_{\text{обі}} + L_{\text{обі}} \quad (7)$$

$$Q = \Delta H + G\Delta\left(\frac{w^2}{2}\right) + Gg\Delta z + L_{\text{обі}} + L_{\text{обі}} \quad (8)$$

З порівняння (5) - (7) і (6) - (8) витікає очевидне співвідношення:

$$Q = \Delta U + \Delta(pV) + G\Delta\left(\frac{w^2}{2}\right) + Gg\Delta z + L_{\text{обі}} + L_{\text{обі}} \quad (9)$$

$\underbrace{\hspace{15em}}_L$

$$Q = \Delta H + G\Delta\left(\frac{w^2}{2}\right) + Gg\Delta z + L_{\text{обі}} + L_{\text{обі}} \quad (10)$$

$\underbrace{\hspace{15em}}_{L_p}$

і, отже,

$$L = L_p + \Delta(pV)$$

З іншого боку, як відомо:

$$L_p = - \int_{p_1}^{p_2} V(p) dp \quad \text{і у випадку } p = \text{const}, \quad dp = 0; \quad L_p = 0$$

Отже,

$$L = \Delta(pV) = (p_2 V_2 - p_1 V_1), \text{ МДж}$$

Завдання 5. При ізобарному горизонтальній течії потоку газу без тертя технічна робота, що віддає потоком зовнішньому пристрою (обертівій крильчатці) дорівнює 14 кДж/кг. Визначити кінцеву швидкість течії газу, якщо початкова $w_1 = 200 \text{ м/с}$.

Пояснення до рішення. Для рішення завдання скористаємося рівнянням Першого закону термодинаміки для потоку газу для питомих значень параметрів потоку (тобто, віднесених до одиниці масової витрати, кг/с).

$$q = \Delta u + \Delta(pv) + \Delta\left(\frac{w^2}{2}\right) + g\Delta z + l_{\text{оаоі}} + l_{\text{одіаі}} \quad \text{Äæ / êã} \quad (11)$$

$$q = \Delta\delta + \Delta\left(\frac{w^2}{2}\right) + g\Delta z + l_{\text{оаоі}} + l_{\text{одіаі}} \quad (12)$$

Оскільки при ізобарному процесі

$$l_p = -\int_{p^1}^{p^2} v(p) dp = 0 \quad (p = \text{const}, dp = 0; l_p = 0) \text{ і з попереднього завдання}$$

$$l_p = \Delta\left(\frac{w^2}{2}\right) + g\Delta z + l_{\text{техн}} + l_{\text{трєн}}, \text{ то з врахуванням сказаного}$$

відносно l_p , а також того, що при горизонтальній течії $\Delta z = 0$ і за умовами завдання $l_{\text{трєн}} = 0$ у підсумку одержимо:

$$0 = \Delta\left(\frac{w^2}{2}\right) + l_{\text{техн}}$$

і далі

$$(w_2^2 - w_1^2) = -2 \cdot l_{\text{техн}}$$

$$w_2 = \sqrt{(w_1^2 - 2 \cdot l_{\text{техн}})}$$

ПРИМІТКА. а) Тому що потік віддає технічну роботу, то знак цієї роботи «+»;

б) розмірність w^2 може бути представлена, як

$$\frac{m^2}{c^2} = \frac{m^2}{c^2} \cdot \frac{kg}{kg} = \frac{m^2 \cdot kg}{c^2} \cdot \frac{1}{kg} = \frac{kg \cdot m}{c^2} \cdot m \cdot \frac{1}{kg} = H \cdot m \cdot \frac{1}{kg} = \text{Дж} / \text{кг}$$

Таким чином,

$$w_2 = \sqrt{(w_1^2 - 2 \cdot l_{\text{техн}})} = \sqrt{(200^2 - 2 \cdot 14 \cdot 10^3)} = 185,7 \text{ м / с}$$

Завдання 6. В ізобарному термодинамічному процесі до робочого тіла (газу) підведено 200 кДж теплоти; зміна внутрішньої енергії становить 120 кДж. Тиск газу становить $p = 40$ кПа, а об'єм змінився від $V_1 = 1 \text{ м}^3$ до $V_1 = 3 \text{ м}^3$. З'ясувати чи дотримуються в процесі умови оборотності.

Пояснення до рішення. У завданні мається на увазі, що наведені дані по теплоті й зміні внутрішньої енергії отримані в результаті експериментальних вимірів, тобто для реального процесу. При протіканні реального процесу завжди мають

місце необоротні втрати у вигляді теплоти, що розсіюється в навколишнім середовищі (наприклад, що виділяється при терті, або за рахунок прямих втрат теплоти, що підводиться - тобто теплота не вся потрапила до газу: частина її розсіялася в навколишньому середовищі). Для реального процесу має місце співвідношення:

$$L_{\text{реальн}} = L_o - L_{\text{трєн}}$$

де $L_{\text{реальн}}$ - робота, що робить газ у реальному процесі; L_o - робота ідеального (теоретичного) оборотного процесу без втрат; $L_{\text{трєн}}$ - робота тертя.

Для оборотного процесу робота може бути підрахована за формулою

$$L_o = \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV$$

Дійсно, теоретична робота може бути представлена у вигляді аналітичної залежності (формули), у той час, як реальна робота може бути визначена тільки експериментально (наприклад з балансу, що представляє Перший закон термодинаміки).

Таким чином, необхідно обчислити роботу оборотного (ідеального процесу) і зрівняти її значення з отриманим з балансу за першим законом термодинаміки:

$$Q = \Delta U + L$$

$$L_{\text{реальн}} = Q - \Delta U = 200 - 120 = 80 \quad , \text{кДж}$$

$$L_o = \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV = 40 * (3 - 1) = 80 \quad , \text{кДж}$$

Порівняємо результат: $L_o = L_{\text{реальн}}$, з чого робимо висновок, що в запропонованому варіанті завдання процес пройшов оборотний, тобто без втрат.

Розглянемо випадки:

а) якщо в результаті рішення завдання буде отримане

$$L_{\text{реальн}} < L_o$$

Висновок: процес пройшов необернено.

б) якщо в результаті рішення завдання буде отримане

$$L_{\text{реальн}} > L_o$$

Висновок: процес неможливий - умова завдання задана некоректно.

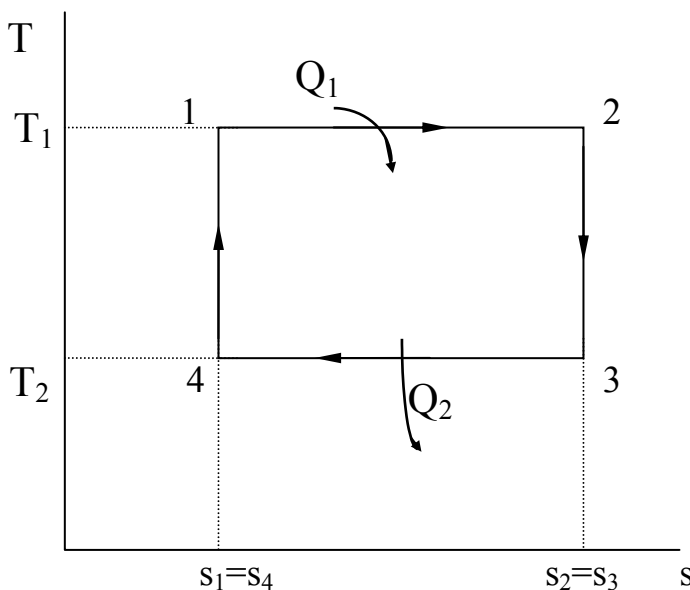
Завдання. Розв'язати завдання 3-5.

Тема 4. Циклічні процеси. Цикл Карно. Принципи роботи теплового двигуна, холодильної машини. Поняття про ККД циклу. Обернені та не обернені процеси. Розв'язання задач на застосування Другого закону термодинаміки. Окремі вирази для ККД теплового двигуна, холодильної машини та теплового насосу.

Мета практичного заняття – сформулювати вміння самостійно розв'язувати задач із застосуванням другого закону термодинаміки.

Теоретичні відомості. В 1824 р. французький інженер С.Карно опублікував роботу, що поклала основу теорії теплових двигунів. Основне питання, що вирішував Карно полягав у пошуку найбільше циклу теплового двигуна, який би мав найбільшу ефективність при заданих значеннях температур підведення й відводу теплоти.

Карно показав, що при заданих температурах підведення (T_1) і відводу (T_2) теплоти, найбільшою ефективністю в цьому інтервалі температур володіє цикл теплового двигуна, що складає із двох ізотермічних і двох адіабатних процесів (рисунок 3).



1-2 - ізотермічний ($T_1 = \text{const}$) процес підводу теплоти Q_1 ;
 3-4 - ізотермічний ($T_2 = \text{const}$) процес відводу теплоти Q_2 ;
 2-3 - адіабатний процес (немає теплообміну з оточуючим середовищем), розширення робочого тіла;
 4-1 - адіабатний процес (немає теплообміну з оточуючим середовищем), стискання робочого тіла – робоче тіло повертається у вихідний стан .

Рисунок 3 – Цикл Карно в T-s координатах

Коефіцієнт корисної дії (ККД) будь-якого циклу теплового двигуна дорівнює

$$\eta_t = \frac{(Q_1 - Q_2)}{Q_1} \quad (13)$$

для ізотермічних процесів 1-2 і 3-4 відповідно кількості теплоти Q_1 і Q_2 можна представити як

$$Q_1 = \int_{s_1}^{s_2} T ds = T_1(s_2 - s_1) \quad (14)$$

$$Q_2 = \int_{s_3}^{s_4} T ds = T_2(s_4 - s_3) \quad (15)$$

Після підстановки виразів (14-15) для Q_1 і Q_2 у рівняння для ККД одержимо

$$\eta_t = \frac{T_1(s_2 - s_1) - T_2(s_4 - s_3)}{T_1(s_2 - s_1)} \quad (16)$$

Необхідно відзначити, що у виразі для ККД значення Q_1 і Q_2 беруть за абсолютною величиною (тобто зі знаком «+»); тому різниці $(s_2 - s_1)$ і $(s_4 - s_3)$ можна розглядати як довжини відрізків на кресленні циклу. Так як $s_2 = s_1$ і $s_3 = s_4$, то вираз (13) можна спростити

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (17)$$

Отримане (17) є математичним виразом першої теореми Карно:

ККД циклу Карно не залежить від властивостей робочого тіла, а визначається тільки температурами підведення й відводу теплоти від робочого тіла.

Звичайно ККД циклу Карно записують із індексом К:

$$\eta_{тК} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (18)$$

Відповідно, *холодильний коефіцієнт* для холодильної машини і *коефіцієнт опалення* для теплового насоса, які працюють за циклом Карно, будуть мати вигляд:

$$\varepsilon_{\text{тк}} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad \text{- холодильна машина, що працює за циклом Карно (19)}$$

$$\Phi_{\text{тк}} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad \text{- тепловий насос, що працює за циклом Карно (20)}$$

Завдання 7. Тепловий двигун працює за циклом Карно при $t_1 = 377^\circ\text{C}$ і $t_2 = 27^\circ\text{C}$. Кількість теплоти, що підводиться $q_1 = 500$ кДж/кг. Визначити роботу циклу, (кДж/кг).

Завдання 8. Холодильна машина працює за зворотнім холодильним циклом Карно між джерелами з температурами $t_1 = 30^\circ\text{C}$ $t_2 = -3^\circ\text{C}$, при цьому холодовиробництво установки $Q_2 = 100$ кДж. Визначити потужність і холодильний коефіцієнт циклу.

Завдання 9. Тепловий насос працює за зворотнім циклом Карно в діапазоні температур $t_1 = 50^\circ\text{C}$ $t_2 = 30^\circ\text{C}$ при опалювальній продуктивності $Q_1 = 50$ кВт. Визначити потужність, опалювальний коефіцієнт циклу й зміну ентропії холодного джерела теплоти.

Тема 5. Застосування Другого закону термодинаміки для аналізу ефективності термодинамічних процесів за критеріями оберенності у ізольованих та відкритих системах. Друга теорема Карно.

Мета практичного заняття – сформулювати уміння самостійно розв'язувати задач із застосуванням другого закону термодинаміки.

Теоретичні відомості. У термодинаміку прийняті поняття оборотності й необоротності протікання процесів (циклів). Прикладом необоротного процесу може служити процес мимовільного переносу теплоти від нагрітого тіла до менш нагрітого при кінцевій різниці температур між ними ΔT . У термодинаміці прийнято вважати, що процес переносу теплоти від більше нагрітих тіл до менш нагрітого може бути оборотним тільки в тому випадку, якщо різниця температур між тілами, що обмінюються теплотою, наближається до нуля (тобто $T_{\text{гор}} \cong T_0$). Уреальності таке неможливе, але для теоретичних міркувань і висновків

робиться припущення про рівність температур між тілами, які обмінюються теплотою. У цьому випадку говорять, що процес переносу теплоти відбувається оборотно. Тобто, можна собі представити, що напрямок переносу теплоти може бути як в одному, так і в іншому напрямку, і при цьому не буде відбуватися абсолютно ніяких змін ні в тілах, ні в навколишнім середовищі, - як при прямому так і при зворотному протіканні процесу.

Необерненність протікання процесу може бути викликана й іншими причинами: наприклад при прямому протіканні процесу розширення робочого тіла в циліндрі з поршнем діють сили тертя, які при зворотному русі поршня будуть мати інше значення. Т.е. передбачається, що при плинні процесу в тім і іншому напрямках у навколишніх тілах і в самім робочому тілі відбуваються зміни різної величини й характеру. Таке протікання процесу також буде необоротним.

Наукова база термодинаміки дозволяє виконувати розрахунки й аналіз тільки оборотних процесів і циклів.

Еквівалентний цикл Карно. Друга теорема Карно.

Цикл Карно має найвищу ефективність у заданому інтервалі температур підведення й відводу теплоти. Реальні цикли теплових двигунів відрізняються від циклу Карно.

Для оцінки роботи теплових двигунів, їхній цикл звичайно порівнюють із циклом Карно.

Для порівняння цикл будь-якого теплового двигуна заміняють циклом Карно, що протікає в тім же інтервалі температур і має такий же КПД, що й аналізований цикл.

Розглянемо довільний цикл теплового двигуна (рисунок 4). Цикл передбачається оборотним. Для того, щоб цикл відповідав умовам оборотності необхідно, щоб підведення й відвід теплоти відбувалося за умови рівності температур робочого тіла й «гарячого» і «холодного» джерел.

ККД даного циклу дорівнює

$$\eta_{t1a2b1} = \frac{(Q_1 - Q_2)}{Q_1} \quad (21)$$

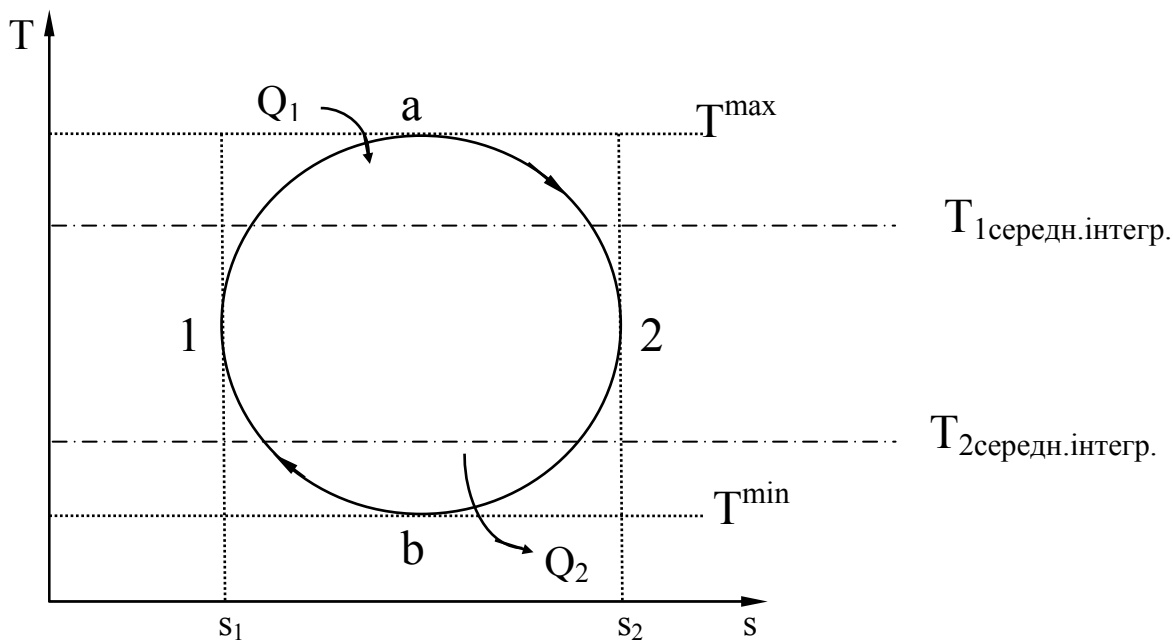


Рисунок 4 – Довільний цикл теплового двигуна в інтервалі температур T^{\max} і T^{\min}

ККД довільного еквівалентного циклу Карно:

$$\eta_{\text{тABCD}} = \frac{(Q_1 - Q_2)}{Q_1} = \frac{T_{1\text{ср.інтегр}} - T_{2\text{ср.інтегр}}}{T_{1\text{ср.інтегр}}} = \left(1 - \frac{T_{2\text{ср.інтегр}}}{T_{1\text{ср.інтегр}}}\right) \quad (22)$$

Завдання 10. Тіло з постійною температурою $T_{\text{т}}$ одержує теплоту в кількості $Q_{\text{т}} = 1000$ кДж від джерела з температурою $T_{\text{джер}} = 1000$ К. Ентропія тіла змінюється на 1,25 кДж/К. З'ясувати, чи оборотний цей процес, визначити $T_{\text{т}}$ і зміну ентропії системи.

Рішення.

Тому що теплообмін відбувається тільки між двома тілами, можна вважати, що ці два тіла становлять термодинамічну систему.

Зміна ентропії тіла відповідно до визначення ентропії можна представити як

$$\Delta S_m = \frac{Q_m}{T_m}$$

Тому що тіло одержує теплоту те його ентропія збільшується, тобто зміна ентропії $\Delta S_m > 0$.

$$T_m = \frac{Q_m}{\Delta S_n} = \frac{1000}{1,25} = 800 \text{ K}$$

Зміна ентропії джерела відповідно до визначення ентропії можна

представити як

$$\Delta S_{уст} = -\frac{Q_{уст}}{T_{уст}}$$

Тому що джерело віддає теплоту, те його ентропія зменшується, тобто зміна ентропії $\Delta S_{уст} < 0$.

Тому що джерело віддає теплоту тільки тілу в даній ізольованій термодинамічній системі й більше ніяким іншим тілам, то $Q_T = Q_{ист} = Q$.

Тоді зміна ентропії всієї системи можна представити у вигляді

$$\Delta S_{сист} = \Delta S_m + \Delta S_{уст} = Q \cdot \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_{уст}} \right) = 1000 \cdot \left(\frac{1}{800} - \frac{1}{1000} \right) = 0,25 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}$$

Таким чином, зміна ентропії системи $\Delta S_{сист} > 0$, те це означає, що процес переносу теплоти пройшов необоротно.

Змінимо початкову умову. Нехай $T_{джер} = 800 \text{ К}$; тоді провівши всі розрахунки, також, як це було зроблено вище одержимо:

$$T_m = \frac{Q_m}{\Delta S_n} = \frac{1000}{1,25} = 800 \text{ К}$$

$$\Delta S_{сист} = \Delta S_{джер} + \Delta S_{тіло} = Q \cdot \left(\frac{1}{T_{джер}} - \frac{1}{T_{тіло}} \right) = 1000 \cdot \left(\frac{1}{800} - \frac{1}{800} \right) = 0$$

Отже, зміна ентропії системи в цьому випадку дорівнює нулю і це означає, що процес переносу теплоти проходив оборотний.

Розв'язати задачу. Тіло з температурою $T_T = 600 \text{ К}$ одержує теплоту $Q = 150 \text{ кДж}$ від джерела з температурою $T_{джер}$, у результаті ентропія джерела зменшується на $0,2 \text{ кДж/К}$. З'ясувати, оборотний це чи процес ні, визначити $T_{джер}$ й зміну ентропії системи (кДж/К). Визначити максимально можливу роботу (ексергію), якщо температура холодного джерела $T_{х.джер} = T_0 = 290 \text{ К}$.

Тема 6. Реальні гази. Таблиці та діаграми термодинамічного стану реальних газів. Властивості водяної пари. Процеси водяної пари. Призначення та структура таблиць водяної пари. Знайомство з електронною таблицею термодинамічних властивостей робочих тіл (вода, насичена волога водяна пара,

суха пара, перегріта пара). Призначення та вигляд в h,s – діаграми водяної пари.

Мета практичного заняття – сформувані уміння самостійно розв’язувати задачі з застосуванням довідкової літератури та таблиць водяної пари.

Теоретичні відомості. Теплофізичні властивості води та водяної пари в широкому діапазоні температур та тисків необхідні для виконання технічних розрахунків та моделювання процесів та обладнання, яке використовується у різних галузях промисловості. «Термодинамічні властивості води та водяної пари» є довідником, який складається з трьох таблиць та $h-s$ -діаграми водяної пари і містить термічні (тиск, температури, питомий об’єм) та калоричні (ентальпія, ентропія) параметри води. Наведені завдання розв’язуються за допомогою таблиць «Термодинамічні властивості води та водяної пари» (далі – таблиці)[1].

Основні позначення параметрів та їх розмірність:

p -	тиск,	бар, кПа
t -	температура,	°С
t_s -	температура насичення,	°С
v -	питомий об’єм,	м ³ /кг
$h(i)$ -	ентальпія,	кДж/кг
s -	ентропія	кДж/(кг·К)
u -	внутрішня енергія,	кДж/кг
x -	ступінь сухості,	-

Завдання 11. За таблицями визначити параметри води, що кипить (тиск, питомий об’єм, ентальпію, ентропію і внутрішню енергію) при температурі насичення $t_s=120$ °С.

Рішення.

За «Таблицею 1. Стан насичення (за температурою)» знаходимо в першому стовпчику температуру $t_s=120$ °С і виписуємо з відповідного рядка таблиці тиск насичення p і значення параметрів з одним штрихом: v' , h' (i'), s' ; значення внутрішньої енергії розраховуємо за формулою:

$$u = h - pv \quad (23)$$

За температурою $t_s=120$ °C виписуємо:

$p=1,9854$ бар $=1,9854 \cdot 10^2$ кПа; $v'=0,0010603$ м³/кг, $h'(i')=503,7$ кДж/кг,

$s'=1,5277$ кДж/(кг·K), за формулою (23) розраховуємо:

$u'=h'-pv'=503,7-1,9854 \cdot 10^2 \cdot 0,0010603=503,5$ кДж/кг.

Завдання 12. За таблицями визначити параметри сухої насиченої пари (температуру, питомий об'єм, ентальпію, ентропію і внутрішню енергію) при тиску насичення $p=4$ бар.

Рішення.

За «Таблицею 2. Стан насичення (за тиском)» знаходимо в першому стовпчику тиск $p=4,0$ бар і виписуємо з відповідного рядка таблиці температуру t_s , °C, і значення параметрів з двома штрихами: v'' , $h''(i'')$, s'' ; значення внутрішньої енергії розраховуємо за формулою (1).

За тиском $p=4,0$ бар виписуємо: $t_s=143,62$ °C; $v''=0,4624$ м³/кг, $h''(i'')=2738$ кДж/кг, $s''=6,897$ кДж/(кг·K), за формулою (23) розраховуємо:

$u''=h''-pv''=2738-4 \cdot 10^2 \cdot 0,4624=2553,04$ кДж/кг.

Завдання 13. За таблицями визначити параметри вологої насиченої пари (v_x питомий об'єм, $h_x(i_x)$ ентальпію, s_x ентропію) при тиску насичення $p=4$ бар, ступені сухості пари $x=0,8$.

Рішення.

За «Таблицею 2. Стан насичення (за тиском)» знаходимо в першому стовпчику тиск $p=4,0$ бар і виписуємо з відповідного рядка таблиці значення параметрів з одним штрихом v' , $h'(i')$, s' та двома штрихами v'' , $h''(i'')$, s'' :

$v'=0,0010836$ м³/кг, $v''=0,4624$ м³/кг, $h'(i')=604,7$ кДж/кг, $h''(i'')=2738$ кДж/кг, $s'=1,777$ кДж/(кг·K), $s''=6,897$ кДж/(кг·K).

Розрахунок параметрів вологої насиченої пари (в.н.п.) відбувається за формулами:

$$\begin{aligned}v_x &= v' + x \cdot (v'' - v') \\h_x &= h' + x \cdot (h'' - h') \\s_x &= s' + x \cdot (s'' - s')\end{aligned}\tag{24}$$

Питомий об'єм: $v_x=0,0010836+0,8 \cdot (0,4624-0,0010836)=0,37$ м³/кг;

ентальпія: $h_x=604,7+0,8 \cdot (2738-604,7)=2311$ кДж/кг;

ентропія: $s_x = 1,777 + 0,8 \cdot (6,897 - 1,777) = 5,87 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Завдання 14.

Суха насичена пара, тиском $p_1 = 20 \text{ бар}$ перегрівается у пароперегрівнику до температури $t_1 = 400^\circ\text{C}$, після чого розширюється у турбіні до стану вологого насичення з $x_2 = 0,95$. Визначити кількість теплоти, підведена у пароперегрівнику та наявну роботу у турбіні. Вирішити з використанням h - s -діаграми водяної пари.

Рішення.

Дано: $x_6 = 1$ (с.н.п.)

$p_1 = 20 \text{ бар}$

$t_1 = 400^\circ\text{C}$

$x_2 = 0,95$

Визначити: q_{nm} , l_n - ?

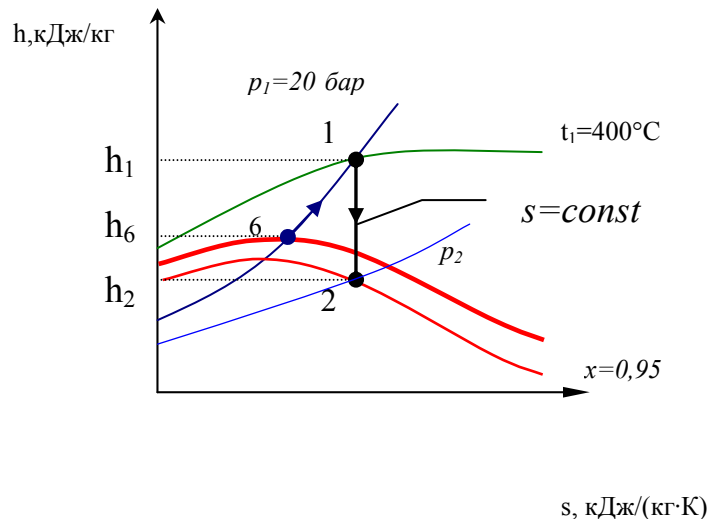


Рис.5 Процеси в h - s діаграмі

Процеси нагріву пари (6-1) та розширення пари у турбіні (1-2) показані на h - s діаграмі водяної пари (рис.5). Точка 6 (т.6) знаходиться на лінії сухого насичення при $p_1 = 20 \text{ бар}$, за діаграмою на перетині цих ліній визначаємо точку 6 та відповідну ентальпію $h_6 = 2800 \text{ кДж}/\text{кг}$, процес нагріву пари проходить ізобарно, тобто із т.6 рухаємося по ізобарі $p_1 = 20 \text{ бар}$ до перетину з ізотермою $t_1 = 400^\circ\text{C}$, визначаємо т.1 і ентальпію в цій точці $h_1 = 3250 \text{ кДж}/\text{кг}$. Теплота, підведена у процесі 6-1:

$$q_{nm} = h_1 - h_6 = 3250 - 2800 = 450 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Із точки 1 проводимо лінію адіабатного процесу розширення пари у турбіні 1-2 до перетину з лінією $x_2 = 0,95$. Знаходимо т.2. Для точки 2 визначаємо $h_2 = 2550 \text{ кДж}/\text{кг}$. Наявна робота процесу:

$$l_n = h_1 - h_2 = 3250 - 2550 = 700 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Тема 7. Конструкція та принципи дії паросилової установки (ПСУ). Цикл паросилової установки. Приклади побудови циклу ПСУ в h,s - діаграмі.

Мета практичного заняття – сформувати вміння самостійно будувати процеси ПСУ.

Теоретичні відомості. Теоретичним циклом паросилової установки є цикл Ренкіна (рисунок 6).

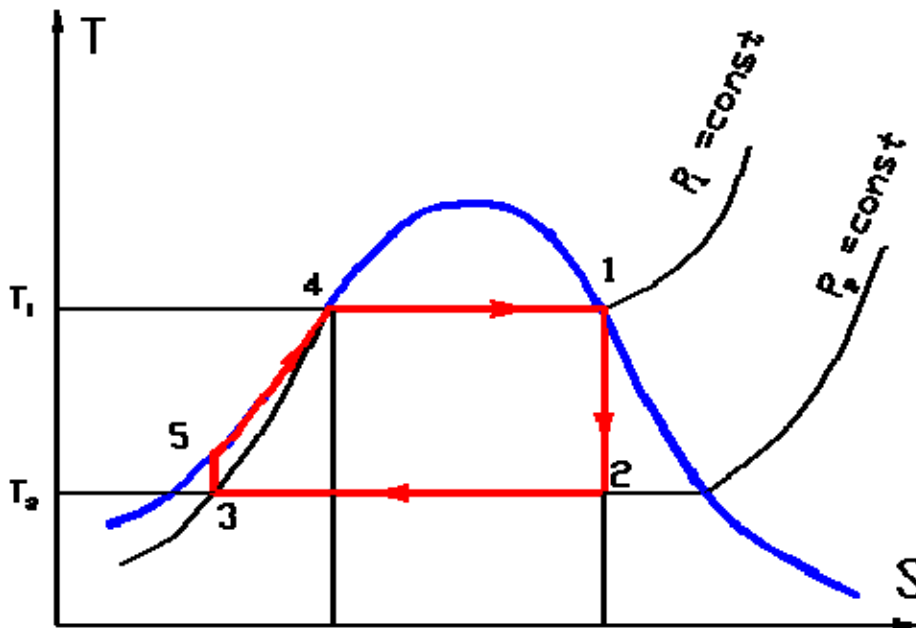


Рисунок 6 – Теоретичний цикл Ренкіна: процес 1-2 – розширення пари в турбіні, 2-3 – процес конденсації пари в конденсаторі, 3-5 підвищення тиску в насосі, 5-4-1 – підвод теплоти в парогенераторі.

Завдання 15. Побудувати в h,s - діаграмі процес паросилової установки з параметрами:

$p_1 = 10$ МПа, $p_2 = 0,5$ МПа. Розрахувати ККД циклу.

Література

1. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 80 с.