

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

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ РОБОЧИХ ТІЛ

ПОСІБНИК ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавр за освітньою програмою
«Енергетичний менеджмент та інжиніринг
теплоенергетичних систем»
спеціальності 144 «Теплоенергетика» та 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Термодинамічний аналіз процесів робочих тіл [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 144 «Теплоенергетика», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В.І. Дешко, М.М. Шовкалюк, Н.А. Буяк., Д.С. Карпенко – Електронні текстові дані (1 файл: X,XX Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 50 с.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 8 від DD.MM.YYYY р.)

за поданням Вченої ради Інституту енергозбереження та енергоменеджменту (протокол № 8 від 24.06.2021 р.)

Електронне мережне навчальне видання

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ РОБОЧИХ ТІЛ

ПОСІБНИК ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВО- ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

Укладачі: *Дешко Валерій Іванович, доктор техн. наук, проф.*
Шовкалюк Марина Михайлівна, канд. техн. наук, доц.
Буяк Надія Андріївна, канд. техн. наук.
Карпенко Дмитро Сергійович, канд. техн. наук.

Відповідальний редактор *Суходуб Ірина Олегівна, канд. техн. наук, доц.*

Рецензент *Розен Віктор Петрович, д-р техн. наук, проф., професор кафедри АУЕК ІЕЕ „КПІ ім. Ігоря Сікорського”*

Видання призначене для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» та 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» під час вивчення кредитного модуля «Технічна термодинаміка». Видання призначене для надання необхідної інформації для виконання розрахунково-графічної роботи. Під час виконання якої студенти навчатися визначати параметри різних робочих тіл, а саме реальних та ідеальних газів, засвоять математичні властивості параметрів стану і характеристик процесу, а також з'ясують основні положення другого закону термодинаміки. Використання ексергетичного аналізу в роботі дозволяє зробити оцінку досконалості пристроїв різного роду з ексергетичної точки зору. Робота є комплексною, тому виконуючи її, студент самостійно вивчає і застосовує на практиці знання з різних тем технічної термодинаміки.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

Зміст

1 Основні теоретичні відомості	6
2 Мета курсової роботи	8
3 Завдання до курсової роботи.....	9
Варіант 1	10
Варіант 2.....	12
Варіант 3	14
Варіант 4.....	16
4 Методичні вказівки до виконання курсової роботи.....	18
5 Розрахунковий приклад	19
5.1. Робоче тіло – ідеальний газ	19
5.1.1 Маса ідеального газу.....	19
5.1.2 Визначення параметрів стану в початковій точці циклу	20
5.1.3 Знаходження параметрів стану в точці 5	22
5.1.4 Обчислення параметрів стану в точці 4.....	22
5.1.5 Визначення параметрів стану в точці 3	24
5.1.6 Встановлення параметрів стану в точці 2	24
5.1.7 Зображення циклу ідеального газу в $p-v$ і $T-s$ діаграмах.....	26
5.1.8 Розрахунок процесів, що входять до циклу.....	27
5.1.9 Процес 1-2	27
5.1.10. Процес 2-3.....	29
5.1.11 Процес 3-4.....	31
5.1.12. Процес 4-5.....	32
5.1.13 Процес 5-1.....	34
5.1.14 Розрахунок циклу за II законом термодинаміки	35
5.2 Робоче тіло – реальний газ (H_2O)	37
5.2.1. Параметри стану водяної пари у початковій точці 1	37
5.2.2 Маса водяної пари.....	38
5.2.3 Параметри водяної пари в точці 5.....	38
5.2.4. Параметри водяної пари у точці 4.....	39

5.2.5 Параметри водяної пари в точці 3	40
5.2.6 Параметри водяної пари у точці 2.....	40
5.2.7 Розрахунок процесів водяної пари	41
5.2.8 Процес 1-2	41
5.2.10 Процес 3-4.....	44
5.2.11 Процес 4-5.....	45
5.2.12 Процес 5-1.....	46
5.2.13 Аналіз циклу водяної пари за II законом термодинаміки	47
5.3 Ексергетична оцінка теплообмінного пристрою	48

Вступ

Технічна термодинаміка є теоретичною основою курсу теплотехніки. Основні закони та положення технічної термодинаміки використовуються під час вивчення таких дисциплін як: теплотехніка, теплопостачання й вентиляція, кондиціонування, процеси і апарати хімічних виробництв, теплові процеси в технологічних системах, хімічна технологія, радіотехніка, електроніка та ін. Вивчення термодинаміки як науки про найбільш загальні закони перетворення та збереження енергії є необхідним для кожного інженера. Ця наука вказала енергетикам шляхи створення нових високоефективних двигунів, навчила хіміків використовувати невичерпні запаси азоту, допомогла вирішити проблеми отримання штучних діамантів.

Метою методичних вказівок до курсової роботи «Термодинамічний аналіз процесів робочих тіл» є навчити студентів виконувати інженерні розрахунки, самостійно працювати з літературою, аналізувати отримані результати.

Ця курсова робота має чимало особливостей. По-перше, аналогічні розрахунки для ідеальних та реальних газів допомагають студентам розібратися в особливостях властивостей різноманітних робочих тіл; по-друге, компонування термодинамічних процесів в цикл дає можливість не тільки вивчити основу першого закону термодинаміки, але й засвоїти на прикладі самостійних розрахунків математичні властивості параметрів стану і характеристик процесу, а також з'ясувати основні положення другого закону термодинаміки. По-третє, використання ексергетичного аналізу в курсовій роботі дозволяє зробити оцінку досконалості пристроїв різного роду з ексергетичної точки зору. По-четверте, курсова робота є комплексною, тому виконуючи її, студент самостійно вивчає і застосовує на практиці знання з різних тем технічної термодинаміки.

1 Основні теоретичні відомості

Теоретичною основою усіх термодинамічних розрахунків є I та II закони термодинаміки, математичні вирази яких можуть бути записані таким чином:

I закон термодинаміки

$$q = \Delta u + l; \quad (1)$$

$$q = \Delta h + l_n. \quad (2)$$

II закон термодинаміки

$$ds \geq \delta q / T; \quad (3)$$

$$\oint \delta q / T \leq 0. \quad (4)$$

Питому кількість теплоти q для оборотних процесів можна визначити через зміну ентропії (Δs), а також, використовуючи поняття теплоємності (c):

$$q = \int T ds; \quad (5)$$

$$q = \int c dT; \quad (6)$$

Вибір залежності для розрахунків диктується характером перебігу процесу та значеннями вихідних даних.

Питома робота, що виконується робочим тілом, при певному рівнянні процесу знаходиться із співвідношення:

$$l = \int p dv. \quad (7)$$

Не менш важливою характеристикою процесу є наявна робота, яка може корисно використовуватися та призводити до зміни енергії системи:

$$l_n = - \int v dp. \quad (8)$$

Треба відзначити, що формули (1) – (8) застосовуються для визначення питомих величин, тобто величин, що віднесені до 1 кг робочого тіла. Якщо в процесі бере участь m кг речовини, то всі характеристики збільшуються в m разів. Наприклад, $L = ml$, $Q = mq$ та ін.

Питома внутрішня енергія (u), питома ентальпія (h), питома ентропія (s), абсолютний тиск (p), абсолютна температура (T) та питома об'єм (v), які входять в рівняння (1) – (8), знаходяться як параметри та функції стану залежно від властивостей робочих тіл.

Робочі тіла розподіляються на ідеальні та реальні гази. Для ідеальних газів основним рівнянням для визначення їх властивостей є рівняння стану ідеального газу:

$$pV = mRT, \quad (9)$$

де V – об'єм ідеального газу, m^3 ; R – питома газова стала, Дж/(кг·К).

Рівняння стану ідеального газу можна використовувати для знаходження термічних (основних) параметрів стану (p , v , T) у будь-якій точці процесу, а

отже і в кінцевій точці. Тоді після нескладних математичних викладок отримаємо співвідношення:

$$\text{при } p=\text{const} - \text{ізобарний процес} \quad \frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}; \quad (10)$$

$$\text{при } v=\text{const} - \text{ізохорний процес} \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}; \quad (11)$$

$$\text{при } T=\text{const} - \text{ізотермічний процес} \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}; \quad (12)$$

$$\text{при } pv^k=\text{const} - \text{адіабатний процес} \quad \left(\frac{p_2}{p_1}\right) = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k; \quad (13)$$

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}; \quad (14)$$

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (15)$$

де k – показник адіабати.

Показник адіабати може бути визначений, як співвідношення між ізобарною (c_p) та ізохорною (c_v) теплоємностями, тобто $k=c_p/c_v$. У цьому завданні теплоємність ідеальних газів приймається незалежною від температури $c \neq (T)$ і тому калоричні параметри визначаються за рівняннями:

$$u = c_v T; \quad (16)$$

$$h = c_p T; \quad (17)$$

$$s = c_p \ln \left[\frac{T}{T_{н.у.}} \right] - R \ln \left[\frac{p}{p_{н.у.}} \right]. \quad (18)$$

У співвідношенні (18) використовуються нормальні фізичні умови, для яких:

$$T_{н.у.}=273 \text{ К, а } p_{н.у.}=101325 \text{ Па} = 760 \text{ мм. рт. ст.}$$

Водяна пара є реальним газом і взаємозв'язок між параметрами стану водяної пари має складний вигляд тому, що враховуються сили взаємодії між молекулами і об'єм самих молекул. Розрахунок процесів за рівнянням стану реальних газів є складним і тому при обчисленнях широко використовуються таблиці і діаграми. При цьому розрахунок за діаграми (**hs-**, **Ts-**, **pv-**) є пріоритетним завдяки графічному методу дослідження. Таблиці водяної пари застосовують тоді, коли є необхідною висока точність розрахунків.

В технічній термодинаміці останнім часом набула розповсюдження величина, яка має назву ексергія. Вона виявилася корисною для визначення термодинамічної ефективності будь-якого пристрою та його частин. Розрізняють ексергію теплоти та ексергію потоку робочого тіла. Ексергія теплоти є ніщо інше як максимально можлива робота, яку можна отримати за рахунок цієї теплоти в тепловому двигуні, якщо холодним джерелом двигуна є навколишнє середовище:

$$E=L_u=Q\left(1-\frac{T_0}{T}\right), \quad (19)$$

де T_0 , T – відповідно температури зовнішнього середовища та робочого тіла, яке розглядається як верхнє джерело теплоти.

Якщо здійснюються термодинамічні процеси, то значення ексергії робочого тіла в кінцевій та початковій точках процесу знаходяться за формулою:

$$e=(h-h_0)-T_0(s-s_0), \quad (20)$$

де h , s – питомі значення ентальпії та ентропії в конкретному стані робочого тіла; h_0 , s_0 - питомі значення ентальпії та ентропії робочого тіла при параметрах стану навколишнього середовища.

В технічній термодинаміці ексергія розглядається як міра працездатності робочого тіла за певних температурних умов навколишнього середовища. Тому оцінка роботи будь-якого приладу або установки оцінюється ексергетичним коефіцієнтом, що допомагає виявити елементи установки, в яких виникають втрати працездатності робочого тіла за рахунок необоротності процесів. Ексергетичний аналіз вказує, над якими елементами установки треба працювати, щоб позбутися втрат енергії та необоротності процесів і покращити енергетичні показники установки в цілому. Ексергетичний ККД дорівнює:

$$\eta_{\text{екс.}}=\frac{E_2}{E_1}, \quad (21)$$

де E_1 , E_2 – ексергія енергетичних потоків відповідно на виході і вході установки (приладу, системи), яка розглядається.

2 Мета курсової роботи

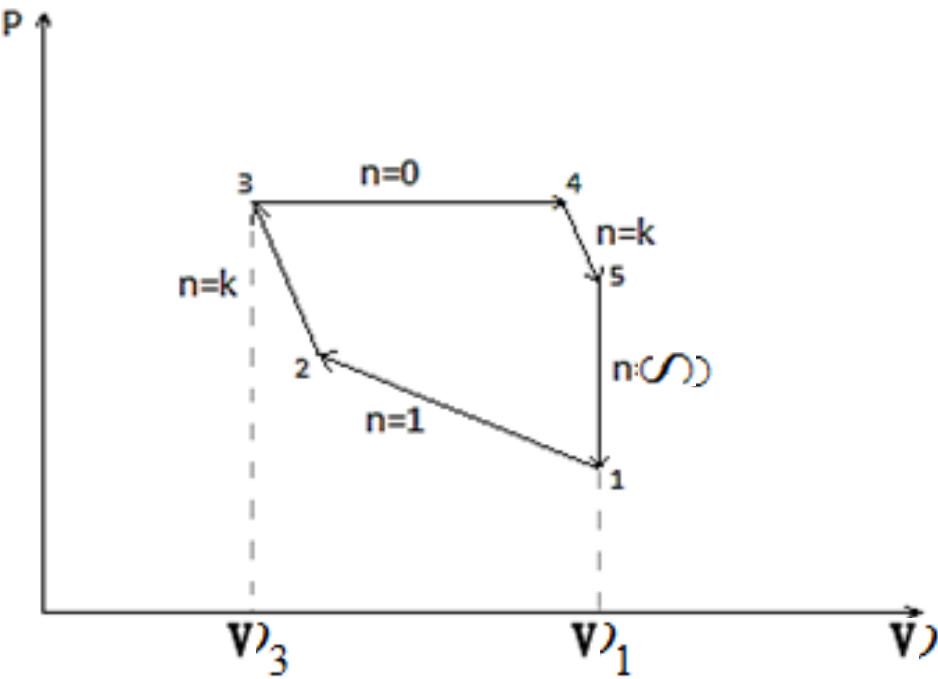
Мета курсової роботи – закріпити та розширити знання, отримані студентами при вивченні курсу «Технічна термодинаміка». Навчитись застосовувати положення I і II законів технічної термодинаміки під час розрахунку циклічних процесів ідеальних газів і водяної пари. Досконало вивчити h -с- діаграму водяної пари. Засвоїти поняття ексергії теплоти та розрахувати ексергетичний к.к.д. для теплообмінного пристрою, в якому утворюється пара.

3 Завдання до курсової роботи

Робоче тіло здійснює прямий термодинамічний цикл, який складається з п'яти процесів: 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-1. Для однієї точки циклу задані основні параметри стану: абсолютний тиск та абсолютна температура. Крім цього, для цієї точки вказано об'єм робочого тіла. Інші точки циклу (одна або дві) задані одним параметром стану (або p , або T , або v). Характер процесів, з яких складається цикл, для ідеального газу визначається показником політропи, а для водяної пари вибирається таким, як і для ідеального газу. Дані, які необхідні для проведення розрахунків, знаходяться за таблицями (1-5) згідно з номером завдання, який надається викладачем. Номер завдання складається з двох цифр. Перша цифра вказує на номер варіанта; друга – визначає розрахункові характеристики завдання в таблиці цього варіанта. Розрахункові характеристики завдання позначаються латинськими літерами для більш компактного запису умови завдання. Зміст їх є очевидним з таблиць варіантів 1-5, які наведені далі.

Варіант 1

	1	2	3	4	5
V, м³	c				
p, бар	d			g	
T, К	e				f
Співвідношення				b= v1/v3	
ГАЗ	Ідеальний			a	
	Реальний			H2O	

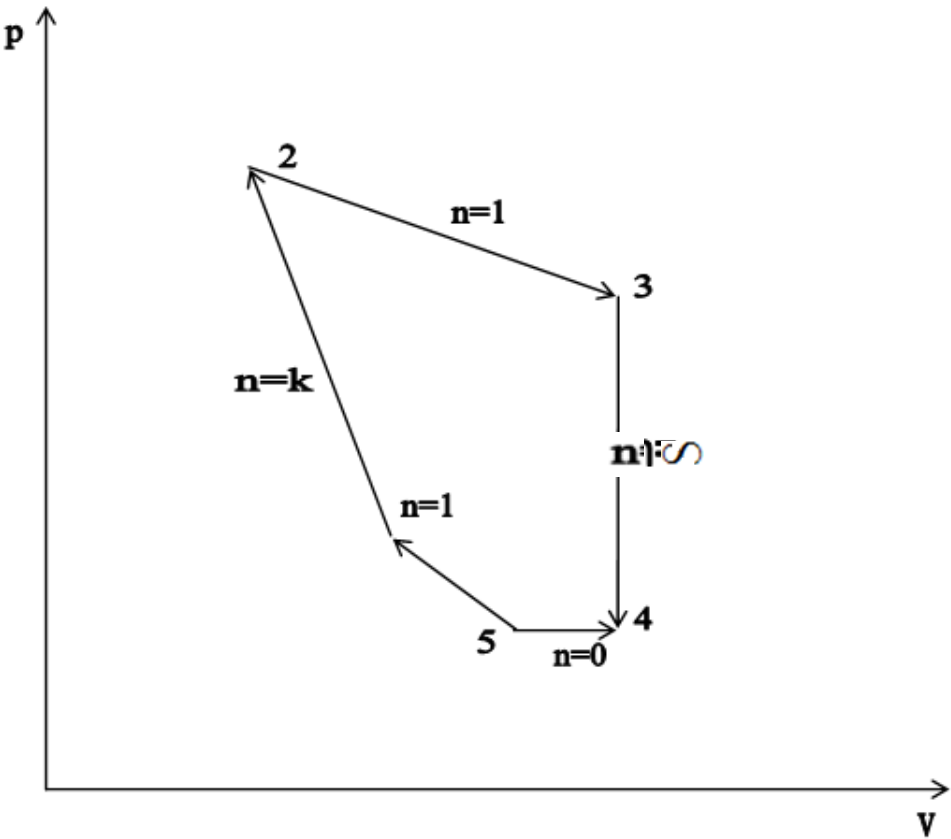


Таблиця 1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
а	Повітря	CO ₂	N ₂	CO	H ₂	O ₂	Повітря	CO ₂	N ₂	CO	H ₂	O ₂	Повітря	CO ₂	N ₂	CO	H ₂	O ₂	Повітря	CO ₂
б	3,33	4,166	6,0	3	3,88	2,777	2,187	2	1,8	1,5	2	2,0	2,0	15,0	6,0	7,0	8,333	1,7	3,75	3
в	24	5,0	18	1,2	3,5	0,5	7,0	1,4	0,5	2,0	0,9	0,56	6,0	15	0,8	3,5	7,0	35	1,8	7,0
д	1,0	1,0	1,6	3,0	4,0	5,0	10,0	20,0	30,0	15,0	22,0	11,0	1,0	0,6	0,8	0,7	0,9	1,0	6,0	7,0
е	433	433	553	523	603	543	757	683	743	673	673	673	423	393	403	393	483	473	593	543
ф	623	593	643	688	828	673	943	803	883	873	803	973	513	493	543	523	533	563	743	683
г	4,0	5,0	10,0	20,0	18,0	17,0	22,0	90,0	100,0	50,0	80,0	24,0	2,3	15,0	6,0	7,0	10,0	2,0	28,0	30,0
h	3,72	1,0	4,97	0,9	2,5	0,6	7,0	5,0	1,6	3,5	3,2	0,8	0,42	2,0	2,8	0,4	1,7	3,0	2,4	12
і	4,0	3,0	3,5	5,0	3,0	4,5	5,2	3,2	6,0	3,0	4,0	5,0	3,5	4,5	2,0	5,5	3,0	4,0	5,0	2,5

Варіант 2

	1	2	3	4	5
V, м³	с		g		
p, бар	d	f			
T, К	e				
Співвідношення				b= p ₁ /p ₄	
ГАЗ	Ідеальний			a	
	Реальний			H ₂ O	

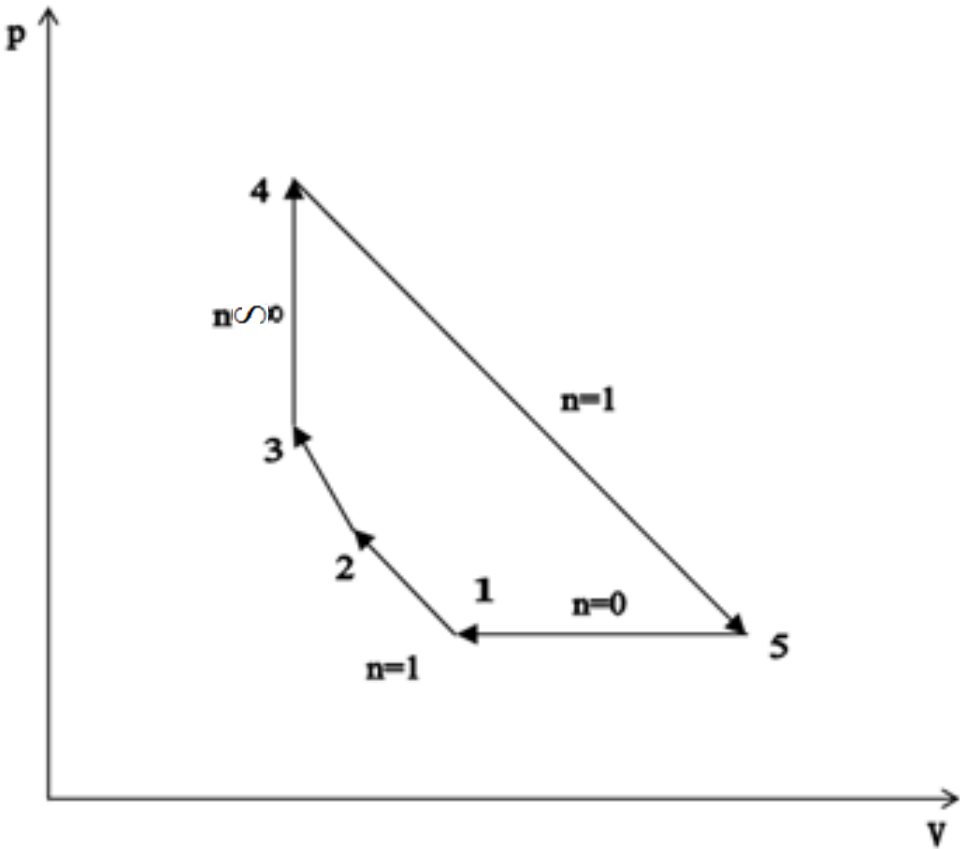


Таблиця 2

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
a	Повітря	CO ₂	N ₂	CO	H ₂	O ₂	Повітря	CO ₂	N ₂	CO	H ₂	O ₂	Повітря	CO ₂	N ₂	CO	H ₂	O ₂	Повітря	CO ₂
b	1,7	9	1,1	1,09	3	5	6,7	1,5	4,3	3	9,8	3	2	2	1,8	5	8,8	6	5,8	4
c	0,8	1	5	3	1,9	0,54	1,4	10	0,44	1,2	1,2	2,4	2,52	2,4	0,98	0,96	0,9	1,62	2	2,8
d	2	25	4	2	4	8	8	5	11	5	1	12	13	14	16	17	1	10	22	7
e	453	693	423	413	413	523	503	563	563	478	333	683	813	603	903	823	333	633	903	493
f	6	10	15	12	20	16	14	15	17	14	1,1	30	70	40	40	30	1,2	28	30	16
g	1,5	8	6	3,5	6	3	10	17	2	4,2	12	9	7	5	2	5	8	12	12	12
h	2,7	7	8,2	7,3	5,2	10	5	20	1,5	2,1	7,3	18	14	15	5,7	8	16	24	23	13
i	3	4	5	4	5	2,5	3,5	4,5	5,5	2	3	4	5	2,2	3,1	4	5	2,1	2,4	3

Варіант 3

	1	2	3	4	5
V, м³		c			
p, бар	f	d			
T, К		e	g		
Співвідношення				b=T ₅ /T ₂	
ГАЗ	Ідеальний			а	
	Реальний			Н ₂ O	



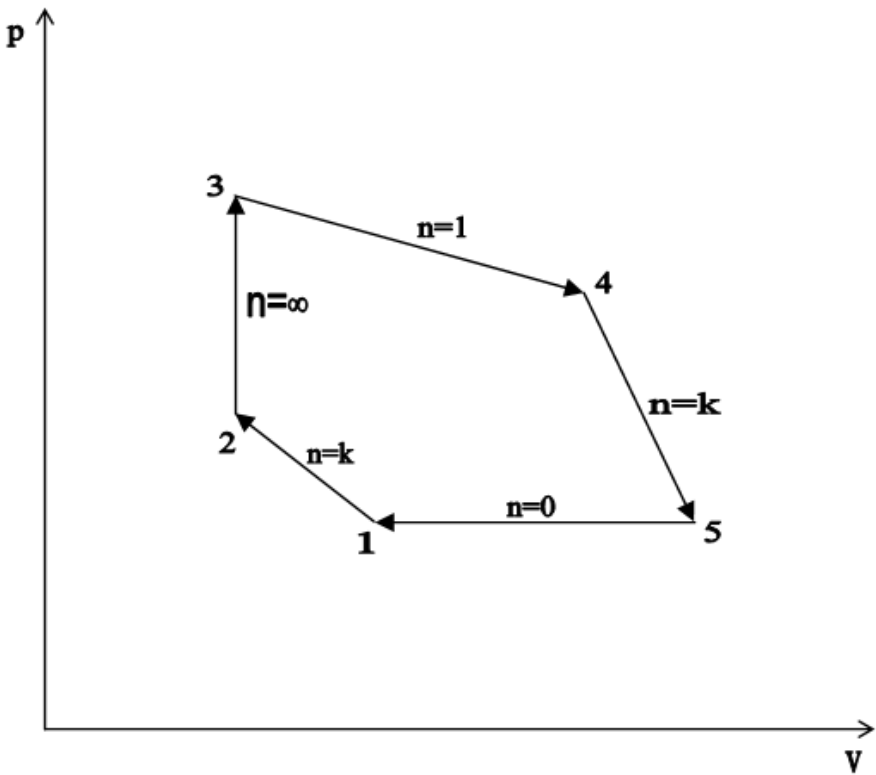
Таблиця 3

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
а	Повітря	CO ₂	H ₂	O ₂	CO	N ₂	Повітря	CO ₂	H ₂	O ₂	CO	N ₂	Повітря	CO ₂	H ₂	O ₂	CO	N ₂	Повітря	CO ₂
б	1,486	1,46	1,65	1,9	2	1,589	1,468	1,47	1,6	1,838	1,521	1,597	1,743	1,67	1,666	1,683	1,6	1,67	1,839	1,67
с	0,32	0,36	0,2	0,35	0,36	0,72	0,8	0,27	1,2	1,5	1,92	2,4	3	3,08	1,4	2,24	4,8	1,26	2,6	3,96
д	1,5	1,8	1,5	2,5	3,7	1,7	4	3	3	2,7	2	3,7	2,5	2,3	2,3	2,5	3,6	1,7	1,2	3,7
е	333	333	353	363	397	323	423	378	413	363	338	403	363	367	373	363	403	323	293	403
ф	1	1,4	1,2	2,4	3,4	0,9	1,6	1	2	2,2	0,9	2,2	1,9	1,5	1,5	1,7	2,4	1	1,1	2
г	403	433	553	503	557	473	563	543	643	563	483	593	513	573	573	543	593	503	473	633
h	5	10	8	9,5	10	17,2	9,6	4	10,5	21	20	23	30	26	12	17	28	9,8	16	15
i	2	2,5	3	4	3,5	2,4	2,8	3	3,5	4	2,4	3,2	3,8	4	4,2	2,3	2	3	4	5

Варіант 4

	1	2	3	4	5
V, м³			с		g
p, бар			d		
T, К		f	e		
Співвідношення				b= p ₃ /p ₁	
ГАЗ	Ідеальний			a	
	Реальний			H ₂ O	

Варіант 4



Таблиця 5

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
a	Повітря	CO ₂	H ₂	O ₂	CO	N ₂	Повітря	CO ₂	H ₂	O ₂	CO	N ₂	Повітря	CO ₂	H ₂	O ₂	CO	N ₂	Повітря	CO ₂
b	6,66	9,8	8,9	20	10	5,555	13,33	5,3	3,2	7,5	2,85	4,5	6,4	10,0	8,0	5,8	3	4	4,8	7,8
c	1,8	1,2	2,4	2,4	2,1	2,8	1,0	5,4	4	3,6	30	9,6	4,4	1	9,1	19,2	5,6	25,2	28	3,0
d	20,0	2,1	4,5	20,0	22,0	15,0	52,0	30,0	3,0	13,0	12,0	14,0	16,0	28,0	5,0	6,0	10,0	7,0	5,0	22,0
e	798	683	773	843	793	758	873	923	688	788	883	783	793	773	873	903	793	863	773	778
f	623	453	573	733	693	583	833	703	523	513	653	543	613	683	673	693	523	623	563	673
g	10,0	3,2	6,2	24,0	17,5	14,4	12,0	20,0	5,0	18,0	75,0	36,0	22,0	6,0	20,0	45,0	14,0	40,0	80,0	15,0
h	4,2	3,5	2	4,4	3,8	3,6	1,3	3,5	2,5	1,26	7,6	5	4,2	1,2	6,7	6,2	1,7	7,5	9	10
i	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,5	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	2,0	3,0	4,0	5,0

4 Методичні вказівки до виконання курсової роботи

Завдання на курсову роботу доцільно виконувати спочатку для ідеального газу, а потім для водяної пари, тобто для реального газу. Виконуючи розрахунки, необхідно дотримуватися такого порядку.

Визначити, для якої з точок циклу задано величини (**p**, **T**, **V**). Для цієї точки знайти невідомі параметри стану (**v**, **u**, **h**, **s**, **e**) або за розрахунковими залежностями (ідеальний газ), або за **hs**- діаграмою водяної пари. Точка, для якої знайдені всі параметри стану, є початковою точкою процесу.

Встановити будь-який параметр стану робочого тіла в кінці цього процесу. Це робиться або методом розрахунків, або методом аналізу умови завдання.

На основі двох невідомих параметрів стану на початку процесу, рівняння процесу та одного параметра в кінці процесу обчислити (ідеальний газ) або визначити за **hs**- діаграмою водяної пари усі кінцеві параметри робочого тіла. Таким чином, для процесу, що розглядається, будуть знайдені всі параметри стану в початковій і кінцевій точках.

Вважаючи кінцеву точку попереднього процесу циклу початковою точкою наступного процесу, виконувати операції, які позначені в попередніх пунктах, поки параметри стану усіх точок перетину процесів не будуть визначені.

На основі відомих співвідношень (1) – (8) знайти характеристики процесів, які складають цикл, та характеристики самого циклу: теплоту циклу, роботу циклу, термічний коефіцієнт корисної дії.

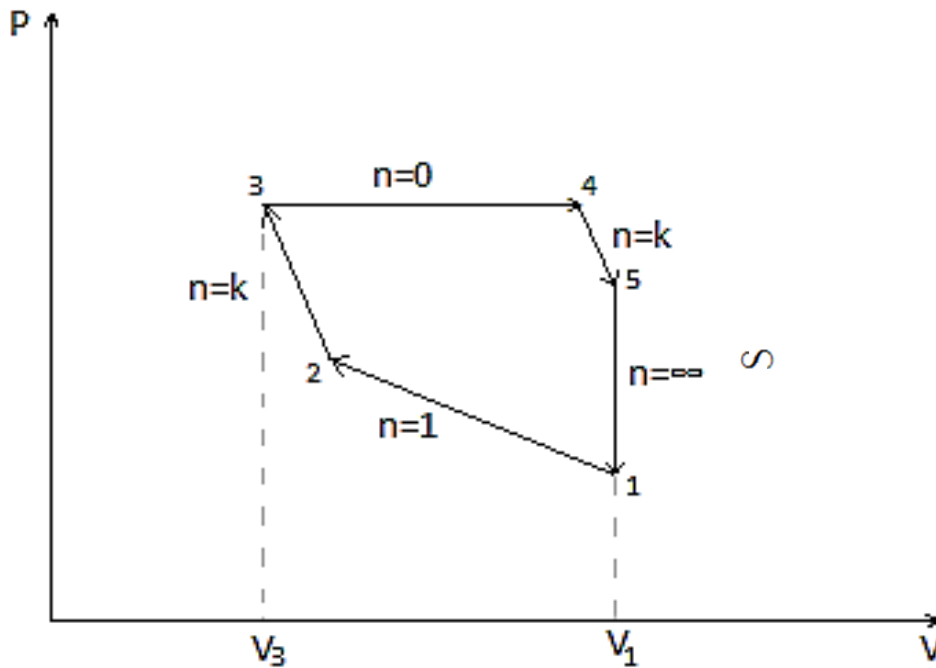
Зобразити цикл в **pv**- і **Ts**- діаграмах для ідеального газу, та в **pv**-, **Ts**-, **hs**- діаграмах для водяної пари. При цьому для кожного з процесів необхідно побудувати схему енергобалансу.

На основі отриманих результатів розрахувати ексергетичний коефіцієнт теплообмінного пристрою, в якому виробляється пара, з позиції використання працездатності введеної в нього теплоти. При цьому необхідно апріорно задатися зміною ентропії гарячого теплоносія та процентом втрат теплоти в теплообмінному пристрої.

Пояснювальна записка до курсової роботи повинна бути виконана на аркушах А4 з рамкою і супроводжуватись відповідними схемами, рисунками та поясненнями до них.

5 Розрахунковий приклад

Варіант 1 – 1



	1	2	3	4	5
$V, \text{м}^3$	c				
$p, \text{бар}$	d			g	
$T, \text{К}$	e				f
Співвідношення				$b = v_1/v_3$	
ГАЗ	Ідеальний			а	
	Реальний			H_2O	

Вихідні дані:

a	b	c	d	e	f	g	h	i
Газ	v_1/v_3	$V_1, \text{м}^3$	$p_1, \text{бар}$	$T_1, \text{К}$	$T_5, \text{К}$	$p_4, \text{бар}$	ΔS_r	%
Повітря	3,33	24	1	433	623	4	3,72	4

5.1. Робоче тіло – ідеальний газ

5.1.1 Маса ідеального газу

Визначимо масу робочого тіла (повітря), використовуючи рівняння стану ідеального газу (9). Питому газову сталу, що входить в формулу (9),

розраховуємо за співвідношенням: $R = \frac{\mu R}{\mu}$, в якому універсальна газова стала $\mu R = 8314 \text{ Дж/(кмоль} \cdot \text{К)}$, а маса 1 кіломоля повітря: $\mu = 29 \text{ кг/кмоль}$.

$$m = \frac{p_1 V_1}{R T_1} = \frac{110^5 \cdot 24 \cdot 29}{8314 \cdot 433} = 19,31 \text{ кг.}$$

Треба відзначити, що питому газову сталу можна вибрати з таблиць фізичних властивостей ідеальних газів.

5.1.2 Визначення параметрів стану в початковій точці циклу

Розрахуємо невідомі параметри стану у точках циклу. За вихідну точку візьмемо точку 1, тому що для неї відомі два параметри стану: $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ та $T_1 = 433 \text{ К}$. Питомий об'єм повітря можна знайти, якщо поділити об'єм ідеального газу в точці 1 на масу робочого тіла:

$$v_1 = \frac{V_1}{m} = \frac{24}{19,31} = 1,243 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Питому внутрішню енергію, питому ентальпію та питому ентропію обчислимо за залежностями (16) – (18), якщо спочатку знайдемо ізобарну та ізохорну масові теплоємності повітря:

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{29,2}{29} = 1,007 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{20,9}{29} = 0,721 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Молярні теплоємності μc_p та μc_v знайдемо залежно від атомності газу за табл.6.

Таблиця 6

Газ	Молярна теплоємність		$k = \mu c_p / \mu c_v$
	μc_p , кДж/кмоль · К	μc_v , кДж/кмоль · К	
Одноатомний	20,9	12,6	1,66
Двохатомний	29,2	29,2	1,4
Трьох- і багато- атомний	37,3	37,3	1,29

Зробивши розрахунки, отримаємо:

$$u_1 = c_v \cdot T_1 = 0,721 \cdot 433 = 312,193 \text{ кДж/кг};$$

$$h_1 = c_p \cdot T_1 = 1,007 \cdot 433 = 436,031 \text{ кДж/кг};$$

$$u_1 = c_v \cdot T_1 = 0,721 \cdot 433 = 312,19 \text{ кДж/кг}$$

$$s_1 = c_p \cdot \ln \left(\frac{T_1}{273} \right) - R \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p_{н.у.}} \right) = 1,007 \cdot \ln \left(\frac{433}{273} \right) - 0,287 \cdot \ln \left(\frac{1}{1,013} \right) = 0,468 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Перевіримо одержані результати за рівнянням стану:

$$p_i v_i = R_i T_i, \text{ тоді } R_i = \frac{p_i v_i}{T_i}.$$

В попередніх розрахунках ми знайшли, що:

$$R = \frac{\mu R}{\mu} = \frac{8314}{29} = 287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)},$$

тоді для точки 1 маємо:

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{110^5 \cdot 1,243}{433} = 287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Виконаємо розрахунок ексергії. Знайдемо ентальпію та ентропію повітря для значень параметрів навколишнього середовища:

$$T_0 = 300 \text{ К і } p_0 = 1,013 \text{ бар} = 760 \text{ мм.рт.ст.}$$

$$h_0 = c_p \cdot T_0 = 1,007 \cdot 300 = 302,1 \text{ кДж/кг};$$

$$s_0 = c_p \cdot \ln\left(\frac{T_0}{T_{н.у.}}\right) - R \cdot \ln\left(\frac{p_0}{p_{н.у.}}\right) = 1,007 \cdot \ln\left(\frac{300}{273}\right) = 0,095 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Розрахуємо ексергію за формулою (20):

$$e_1 = (h_1 - h_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0).$$

$$e_1 = (436,031 - 302,1) - 300 \cdot (0,468 - 0,095) = 22,03 \text{ кДж/кг}.$$

Результати обчислень для точки 1 зведемо в таблицю 7:

Таблиця 7

Параметри	Точки				
	1	2	3	4	5
p_i , Па	$1 \cdot 10^5$	$2,088 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$1,44 \cdot 10^5$
T_i , К	433	433	521,35	834,44	623
v_i , м ³ /кг	1,243	0,593	0,373	0,597	1,243
Перевірка R	287	286	286,2	286,2	287,3
u_i , кДж/кг	312,19	312,19	375,89	601,63	449,18
h_i , кДж/кг	436,03	436,03	524,99	840,281	627,36
s_i , кДж/(кг·К)	0,468	0,257	0,257	0,730	0,730
e_i , кДж/кг	22,03	85,33	174,29	347,4	134,76

Точка 1 відноситься до двох процесів: до процесу ізотермічного стиснення 1-2 та до процесу ізохорного зниження тиску 5-1. У першому випадку точка 1 є початковою, а у другому – кінцевою точкою процесу. Аналізуючи умову завдання, приходимо до висновку, що під час наступних обчислень будемо розглядати процес 5-1, оскільки для точки 2 невідомо жодного параметра стану.

5.1.3 Знаходження параметрів стану в точці 5

Визначимо параметри стану в точці 5. Процес 5-1 є ізохорним, тому $v_5=v_1=1,243 \text{ м}^3/\text{кг}$. Абсолютну температуру повітря T_5 знайдемо за умовою завдання, використовуючи залежність в ізохорному процесі $\frac{p_5}{p_1} = \frac{T_5}{T_1}$.

Обчислимо абсолютний тиск p_5 :

$$p_5 = p_1 \frac{T_5}{T_1} = 1 \cdot 623 / 433 = 1,438 \approx 1,44 \text{ бар.}$$

Перевірка R:

$$R = p_5 \cdot v_5 / T_5 = 1,44 \cdot 10^5 \cdot 1,243 / 623 = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$$

Аналогічно розрахункам в точці 1 знайдемо питомі внутрішню енергію, ентальпію, ентропію та ексергію:

$$u_5 = c_v T_5 = 0,721 \cdot 623 = 449,183 \text{ кДж}/\text{кг};$$

$$h_5 = c_p T_5 = 1,007 \cdot 623 = 627,361 \text{ кДж}/\text{кг};$$

$$s_5 = c_p \ln \left(\frac{T_5}{T_{н.у.}} \right) - R \ln \left(\frac{p_5}{p_{н.у.}} \right) = 1,007 \cdot \ln \left(\frac{623}{273} \right) - 0,287 \cdot \ln \left(\frac{1,44}{1,013} \right) = 0,73 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K});$$

$$e_5 = (h_5 - h_0) - T_0(s_5 - s_0) = (627,361 - 302,1) - 300 \cdot (0,73 - 0,095) = 134,75 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Значення основних параметрів та функцій стану точки 5 запишемо в таблицю 7 (с.22).

5.1.4 Обчислення параметрів стану в точці 4

В адіабатному процесі розширення 4-5 згідно з умовою завдання відомо абсолютний тиск $p_4 = 4 \text{ бар}$. Використовуючи співвідношення між основними параметрами стану в адіабатному процесі, знайдемо T_4 і v_4 :

$$\frac{T_4}{T_5} = \left(\frac{p_4}{p_5} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} \Rightarrow T_4 = T_5 \left(\frac{p_4}{p_5} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} ;$$

$$T_4 = 623 \cdot \left(\frac{4}{1,44} \right)^{\frac{(1,4-1)}{1,4}} = 623 \cdot 2,78^{0,286} = 834,44 \text{ K};$$

$$\left(\frac{v_4}{v_5} \right)^k = \frac{p_5}{p_4} \Rightarrow v_4 = v_5 \cdot \left(\frac{p_5}{p_4} \right)^{\frac{1}{k}};$$

$$v_4 = 1,243 \cdot \left(\frac{1,44}{4} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 1,243 \cdot 0,36^{0,714} = 0,597 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Під час розрахунків T_4 і v_4 коефіцієнт Пуассона $k = c_p/c_v$ дорівнює 1,4. Тобто повітря розглядається як двоатомний газ.

Перевірка R:

$$R = p_4 \cdot v_4 / T_4 = 4 \cdot 10^5 \cdot 0,597 / 834,44 = 286,17 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$$

Після того, як знайдені основні параметри стану, переходимо до обчислення функцій стану u_4 , h_4 , s_4 , e_4 :

$$u_4 = c_v \cdot T_4 = 0,721 \cdot 834,44 = 601,63 \text{ кДж}/\text{кг};$$

$$h_4 = c_p \cdot T_4 = 1,007 \cdot 834,44 = 840,281 \text{ кДж}/\text{кг};$$

$$s_4 = c_p \cdot \ln \left(\frac{T_4}{T_{н.у.}} \right) - R \cdot \ln \left(\frac{p_5}{p_{н.у.}} \right) = 1,007 \cdot \ln \left(\frac{834,44}{273} \right) - 0,287 \cdot \ln \left(\frac{4}{1,013} \right) = 0,73 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K});$$

$$e_4 = (h_4 - h_0) - T_0 \cdot (s_4 - s_0) = (840,281 - 302,1) - 300 \cdot (0,73 - 0,095) = 347,4 \text{ кДж}/\text{K}.$$

Отримані результати заносимо в таблицю 7 (с.22).

5.1.5 Визначення параметрів стану в точці 3

Процес 3-4 – це процес ізобарного розширення. Для точки 3 в явному вигляді ніяких параметрів стану не маємо, але за умовою завдання відоме співвідношення $b=v_1/v_3$, з якого отримаємо:

$$v_3 = \frac{v_1}{b} = \frac{1,243}{3,33} = 0,373 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Тоді абсолютну температуру при $p = \text{const}$ знайдемо за формулою:

$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{v_3}{v_4} \quad \Rightarrow \quad T_3 = T_4 \left(\frac{v_3}{v_4} \right);$$

$$T_3 = 834,44 \cdot \left(\frac{0,373}{0,597} \right) = 521,35 \text{ К}.$$

Абсолютний тиск в точці 4 буде таким, як в точці 3, тому що в ізобарному процесі тиск не змінюється ($p_4 = p_3 = 4 \text{ бар}$).

Обчислимо функції стану в точці 3 і значення всіх параметрів стану цієї точки запишемо в табл.7 .

$$u_3 = c_v \cdot T_3 = 0,721 \cdot 521,35 = 375,89 \text{ кДж/кг};$$

$$h_3 = c_p \cdot T_3 = 1,007 \cdot 521,35 = 524,99 \text{ кДж/кг};$$

$$\begin{aligned} s_3 &= c_p \cdot \ln \frac{T_3}{273} - R \cdot \ln \frac{p_3}{p_{н.у.}} = 1,007 \cdot \ln \left(\frac{521,35}{273} \right) - 0,287 \cdot \ln \left(\frac{4}{1,013} \right) = \\ &= 0,257 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_3 &= (h_3 - h_0) - T_0 (s_3 - s_0) = (524,99 - 302,1) - 300 \cdot (0,257 - 0,095) = \\ &= 174,39 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

5.1.6 Встановлення параметрів стану в точці 2

Для точки 2 за умовою завдання немає жодного параметра стану. Ця точка є початковою точкою адіабатного процесу стиснення 2 - 3 та кінцевою точкою ізотермічного процесу стиснення 1 - 2. Тому дуже легко встановити абсолютну температуру в точці 2 ($T_2 = T_1 = 433 \text{ К}$). Абсолютний тиск p_2 обчислимо із співвідношення між основними параметрами в адіабатному процесі:

$$\left(\frac{p_2}{p_3} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} = \frac{T_2}{T_3} \quad \Rightarrow \quad p_2 = p_3 \left(\frac{T_2}{T_3} \right)^{\frac{k}{(k-1)}}$$

$$p_2 = 4 \cdot \left(\frac{433}{521,35} \right)^{\frac{1,4}{0,4}} = 4 \cdot 0,831^{3,5} = 2,088 \text{ бар}.$$

Питомий об'єм v_2 можна розрахувати, використовуючи формули адіабатного процесу:

$$\left(\frac{v_2}{v_3} \right)^{k-1} = \frac{T_3}{T_2} \Rightarrow v_2 = v_3 \left(\frac{T_3}{T_2} \right)^{\frac{1}{k-1}}$$

або, використовуючи формули ізотермічного процесу:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{p_1}{p_2} \Rightarrow v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2} \right).$$

Порівнюючи формули для обчислення v_2 у адіабатному та ізотермічному процесах, бачимо, що остання є простішою, тому:

$$v_2 = 1,243 \cdot \left(\frac{1}{2,088} \right) = 0,593 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Аналогічно розрахункам функцій стану у попередніх точках циклу визначимо u_2 , h_2 , s_2 , e_2 :

$$u_2 = c_v \cdot T_2 = 0,721 \cdot 433 = 312,19 \text{ кДж/кг};$$

$$h_2 = c_p \cdot T_2 = 1,007 \cdot 433 = 436,03 \text{ кДж/кг};$$

$$\begin{aligned} s_2 &= c_p \cdot \ln \frac{T_2}{273} - R \cdot \ln \frac{p_2}{p_{н.у.}} = 1,007 \cdot \ln \left(\frac{433}{273} \right) - 0,287 \cdot \ln \left(\frac{2,088}{1,013} \right) = \\ &= 0,257 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_2 &= (h_2 - h_0) - T_0 (s_2 - s_0) = (436,03 - 302,1) - 300 \cdot (0,257 - 0,095) = \\ &= 85,33 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Таким чином табл.7 заповнена результатами розрахунків. Треба тільки відзначити, що для кожної точки циклу розраховувався добуток $(p_i v_i / T_i)$ і його значення порівнюється з питомою газовою сталою $R = 287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$. Якщо розбіжність результатів менше двох відсотків, то обчислення виконано вірно.

5.1.7 Зображення циклу ідеального газу в $p-v$ і $T-s$ діаграмах

Згідно із значеннями абсолютного тиску та питомого об'єму, абсолютної температури та питомої ентропії (див. табл. 7) побудуємо графічне зображення циклу у $p-v$ і $T-s$ діаграмах за визначеними масштабами. Зображення його бажано виконувати на міліметрівці та показувати, як графічно знаходиться кожна точка циклу, враховуючи напрям та характер процесу.

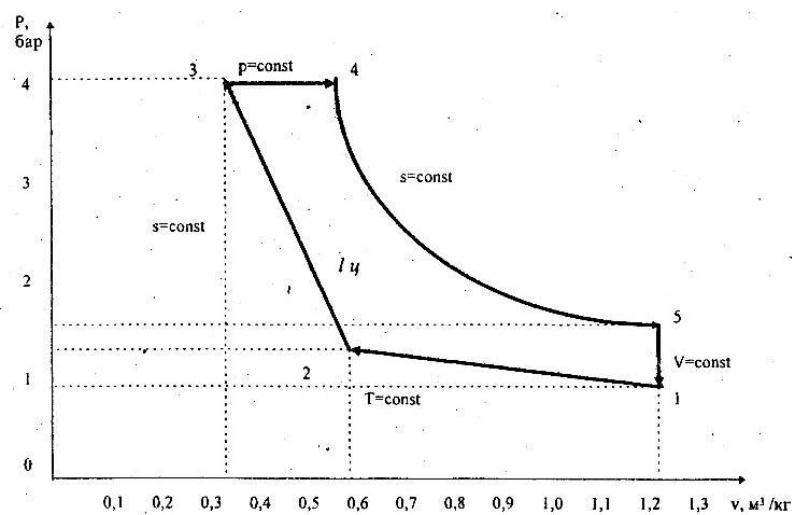


Рис.1

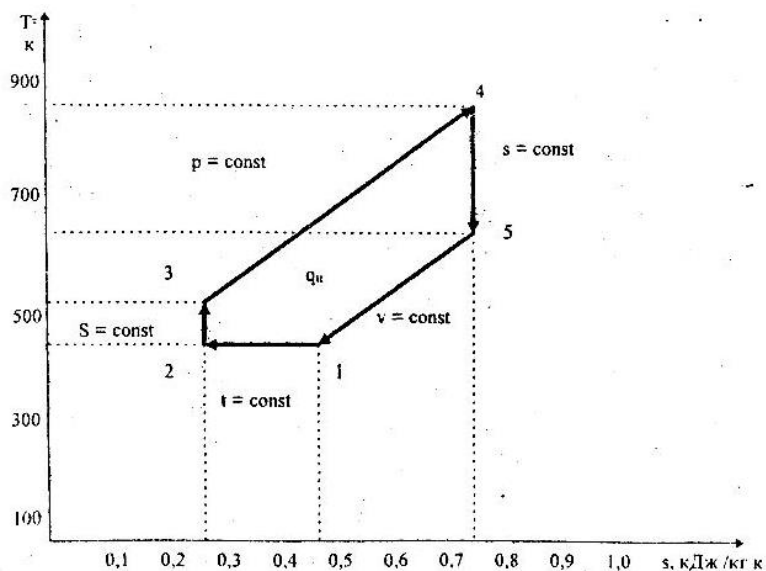


Рис. 2

5.1.8 Розрахунок процесів, що входять до циклу

Розрахунок певного процесу ідеального газу, що входить до циклу і має визначені параметри в кінці і на початку процесу, виконується таким чином: визначаються зміни функцій стану ΔU , ΔH , ΔS , ΔE : розраховується теплота Q , робота зміни об'єму L , наявна робота L_n ; складається енергетичний баланс процесу у вигляді I закону термодинаміки:

$$Q = \Delta U + L; \quad (22)$$

$$Q = \Delta H + L_n. \quad (23)$$

Графічно зображується розподіл енергії у процесі – схема енергобалансу (СЕБ).

5.1.9 Процес 1-2

Розглянемо процес ізотермічного стиснення 1-2. Для ідеального газу внутрішня енергія і ентальпія залежать тільки від температури, тобто зміна цих функцій в ізотермічному процесі дорівнює нулю ($\Delta U_{1-2} = \Delta H_{1-2} = 0$). Зміну ентропії та ексергії ідеального газу знайдемо за формулами:

$$\Delta S_{1-2} = m \cdot (s_2 - s_1) = 19,31 \cdot (0,257 - 0,468) = -4,074 \text{ кДж/К};$$

$$\Delta E_{1-2} = m \cdot (e_2 - e_1) = 19,31 \cdot (85,33 - 22,03) = 1222,323 \text{ кДж}.$$

Розрахуємо кількість теплоти у ізотермічному процесі стиснення 1-2:

$$Q_{1-2} = \int mTds = mT \cdot (s_2 - s_1) = 19,31 \cdot 433(0,257 - 0,468) = -1764,21 \text{ кДж}.$$

Знак «-», що стоїть перед числовим значенням кількості теплоти, вказує на те, що у процесі теплота відводиться.

Обчислимо роботу процесу L . Для визначення роботи використовуємо загальну формулу $L = \int m p dv$ та рівняння ізотермічного процесу, яке зв'язує абсолютний тиск і питомий об'єм $p_1 v_1 = p_2 v_2 = p v = \text{const}$. Розв'язавши цей інтеграл з урахуванням залежності $p = \phi(v)$, отримаємо

$$L = m \int p dv = m \int \frac{p_1 v_1}{v} = m p_1 v_1 \int \frac{dv}{v} = m p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} =$$

$$= p_1 V_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = 1 \cdot 10^5 \times 24 \times \ln \frac{0,593}{1,243} = -1776,2 \text{ кДж}$$

Розрахована робота так само як і теплота – величина від'ємна і вказує на те, що ідеальний газ у процесі 1-2 стискується.

Після того, як знайдена теплота і робота, обчислимо наявну роботу. Аналізуючи вираз $Q = \Delta H + L_n$ та маючи на увазі, що у ізотермічному

процесі ідеального газу зміна ентальпії, дорівнює нулю, приходимо до висновку:

$$\text{при } T=\text{const} \Rightarrow Q = L = L_n$$

Теж саме отримаємо, якщо будемо розв'язувати інтеграл $L_n = -m \int v dp$, враховуючи залежність $v=f(p)$ ізотермічного процесу. Таким чином ми знайшли всі характеристики процесу: теплоту, роботу і наявну роботу. Зобразимо процес ізотермічного стиснення у p - v і T - s діаграмах і виділимо площини які еквівалентні питомим теплоті(q), роботі(l) та наявній роботі (l_n).

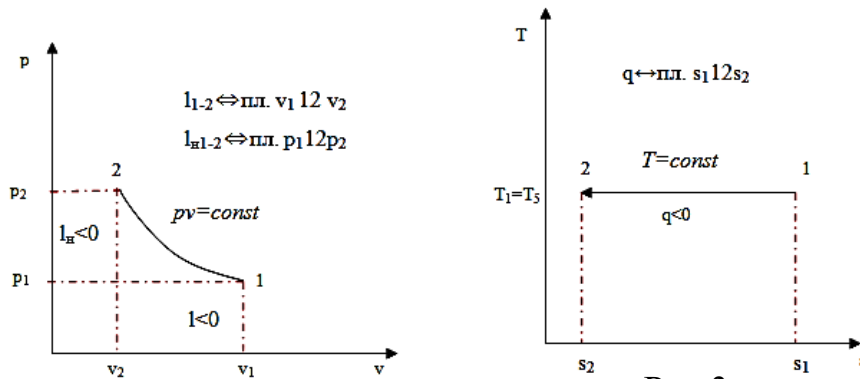


Рис.3

Зведемо енергетичний баланс процесу згідно з I законом термодинаміки (22), та виявимо похибку балансу. Оскільки $\Delta U_{1-2}=0$, то $Q_{1-2}=L_{1-2}$. За розрахунками маємо:

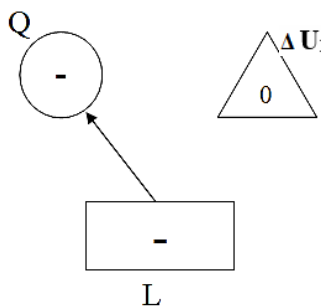
$$Q=\Delta U+L=U_2-U_1=0+L$$

$$Q_{1-2}=-1764,21 \text{ кДж}, L_{1-2}= -1776,2 \text{ кДж},$$

отже розбіжність балансу у відсотках становить:

$$\delta\%=((1776,2-1761,21)/1776,2)\cdot 100\%=0,67\%,$$

Складемо схему енергобалансу процесу 1-2 та розкриємо її суть.



При ізотермічному стисненні ідеального газу теплота відводиться, а внутрішня енергія залишається сталою.

Рис. 4

Отримані результати зведемо в табл. 8.

Таблиця 8

Процес	$\Delta U,$	$\Delta H,$	$\Delta S,$	$\Delta E,$	$Q,$	$L,$	$L_n,$
	кДж		кДж/К	кДж			
1-2	0	0	-4,074	1222,32	-1764,21	-1776,2	-1776,2
2-3	1230,047	1717,81	0	1717,81	0	-1224,08	-1713,71
3-4	4359	6088,27	9,134	3342,75	6088,27	1730,18	0
4-5	-2943,8	-4111,5	0	-4106,08	0	2929,48	4101,27
5-1	-2645,27	-3694,58	-5,059	-2176,82	-2645,27	0	1056,1
Σ	0,023	0,001	0,0006	0	1678,8	1659,4	1667,4

5.1.10. Процес 2-3

За процесом 1-2 іде процес адіабатного стиснення 2-3, який проходить без теплообміну з навколишнім середовищем. Знайдемо зміну калоричних параметрів у цьому процесі:

$$\Delta U_{2-3} = m \cdot (u_3 - u_2) = 19,31 \cdot (375,89 - 312,19) = 1230,047 \text{ кДж};$$

$$\Delta H_{2-3} = m \cdot (h_3 - h_2) = 19,31 \cdot (524,99 - 436,03) = 1717,81 \text{ кДж}.$$

Значення u_2 , u_3 , h_2 , h_3 вибираємо з таблиці 7. Зміна ентропії в процесі 2-3 дорівнює нулю ($\Delta S_{2-3}=0$). Розрахунки доводять, що зворотні адіабатні процеси є ізоентропійними ($s=\text{const}$). Зміна ексергії у процесі 2-3 складає:

$$\Delta E_{2-3} = m \cdot (e_3 - e_2) = 19,31 \cdot (174,29 - 85,33) = 1717,817 \text{ кДж}.$$

Розрахуємо характеристики процесу адіабатного стиснення повітря. В адіабатному процесі $Q=0$. Робота зміни об'єму знаходиться аналогічно процесу 1-2 за загальною формулою обчислення роботи і рівнянням адіабатного процесу, яке зв'язує між собою p і v .

$$L = m \int p dv;$$

$$p v^k = (p_1 v_1)^k = (p_2 v_2)^k = \dots = (p_i v_i)^k = \text{const}.$$

З останнього рівняння знайдемо абсолютний тиск $p = (p_1 v_1^k) / v^k$ і підставимо його в підінтегральний вираз. Далі розрахуємо табличний

інтеграл такого вигляду $\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{(n+1)}$ і остаточно отримаємо:

$$L = \frac{p_1 V_1 \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)}{k-1} = \frac{p_1 V_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right)}{k-1} = \frac{m R T_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right)}{k-1} = \frac{m R (T_1 - T_2)}{k-1}$$

Для процесу 2-3 формула для обчислення роботи буде мати вигляд:

$$L_{2-3} = \frac{mR}{k-1} \cdot (T_2 - T_3).$$

Отже

$$L_{2-3} = \frac{19,31 \cdot 0,287}{(1,4-1)} \cdot (433-521,35) = -1224,082 \text{ кДж.}$$

Для знаходження L_n треба визначити питому наявну роботу. Якщо рівняння адіабатного процесу записати у диференціальній формі, тобто:

$$k p dv + v dp = 0$$

і розв'язати його відносно питомої наявної роботи, то отримаємо:

$$l_n = - \int v dp = k \int p dv = k \cdot l$$

Очевидно, що наявна робота в адіабатному процесі в k разів більше роботи зміни об'єму.

$$L_{n2-3} = k \cdot L_{2-3} = 1,4 \cdot (-1224,082) = -1713,71 \text{ кДж.}$$

Зобразимо процес адіабатного стиснення у p - v і T - s діаграмах і графічно покажемо q , l , l_n .

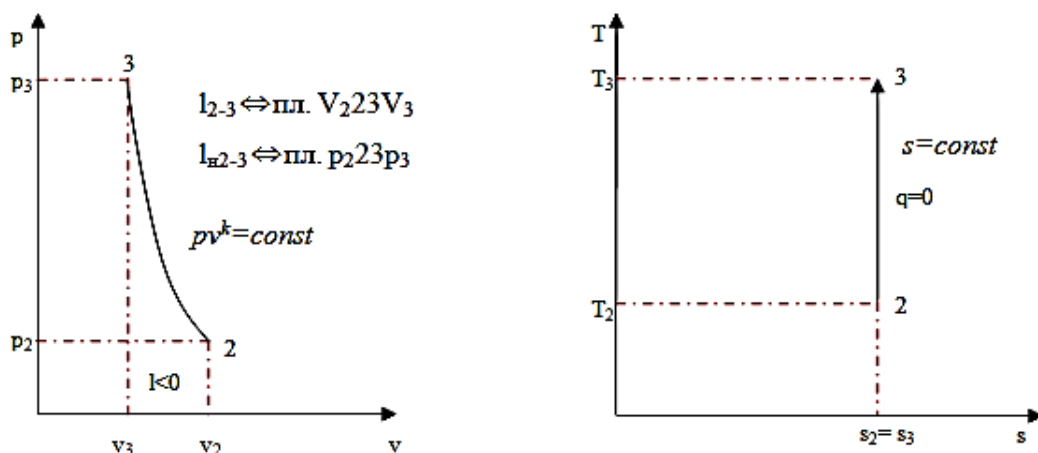


Рис. 5

І закон термодинаміки для адіабатного процесу стиснення запишемо таким чином:

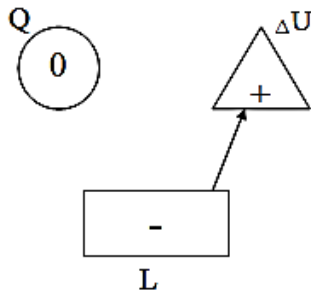
$$Q = \Delta U + L, \text{ оскільки } Q=0, \text{ то } L = -\Delta U, \text{ або}$$

$$Q = \Delta H + L_n \text{ і тоді } L_n = -\Delta H.$$

Визначимо похибку розрахунків, використовуючи рівняння енергетичного балансу, наприклад рівняння $L_n = -\Delta H$. З попередніх обчислень відомо, що $\Delta H = 1717,81$ кДж, а $L_n = -1713,71$ кДж.

Тоді: $\delta\% = (1717,81 - 1713,71) / 1717,81 = 0,238\%$.

Покажемо схему енергетичного балансу процесу 2-3:



При адіабатному стисненні ідеального газу внутрішня енергія збільшується

Рис. 6

У табл. 8 запишемо результати розрахунків адіабатного процесу стиснення 2-3.

5.1.11 Процес 3-4

Процес 3-4 є ізобарним процесом розширення. Зміну будь-якого параметра стану у цьому процесі знайдемо як добуток маси ідеального газу на різницю значень відповідного параметра стану у кінці та на початку процесу.

$$\Delta U_{3-4} = m \cdot (u_4 - u_3) = 19,21 \cdot (601,63 - 375,89) = 4359 \text{ кДж};$$

$$\Delta H_{3-4} = m \cdot (h_4 - h_3) = 19,21 \cdot (840,281 - 524,99) = 6088,27 \text{ кДж};$$

$$\Delta S_{3-4} = m \cdot (s_4 - s_3) = 19,31 \cdot (0,73 - 0,257) = 9,134 \text{ кДж/К};$$

$$\Delta E_{3-4} = m \cdot (e_4 - e_3) = 19,31 \cdot (347,4 - 174,29) = 33342,75 \text{ кДж}.$$

Розрахуємо характеристики процесу 3-4. Робота зміни об'єму буде дорівнювати:

$$L_{3-4} = \int m p dv = m p (v_4 - v_3), \text{ а для процесу 3-4 становить:}$$

$$L_{3-4} = \int m p dv = m p (v_4 - v_3) = 19,21 \cdot 4 \cdot 10^5 \cdot (0,597 - 0,373) = 1730,18 \text{ кДж}.$$

Наявна робота дорівнює нулю, тому що при $p = \text{const}$, $dp = 0$.

$$L_{n3-4} = -m \int v dp = 0$$

Теплоту в ізобарному процесі обчислимо як добуток маси ідеального газу на ізобарну теплоємність і різницю температур у кінці та на початку процесу:

$$Q_{3-4} = m c_p \cdot (T_4 - T_3) = 19,21 \cdot 1,007 \cdot (834,44 - 521,35) = 6088,99 \text{ кДж}.$$

Зобразимо процес 3-4 у p - v і T - s діаграмах і графічно покажемо характеристики процесу.

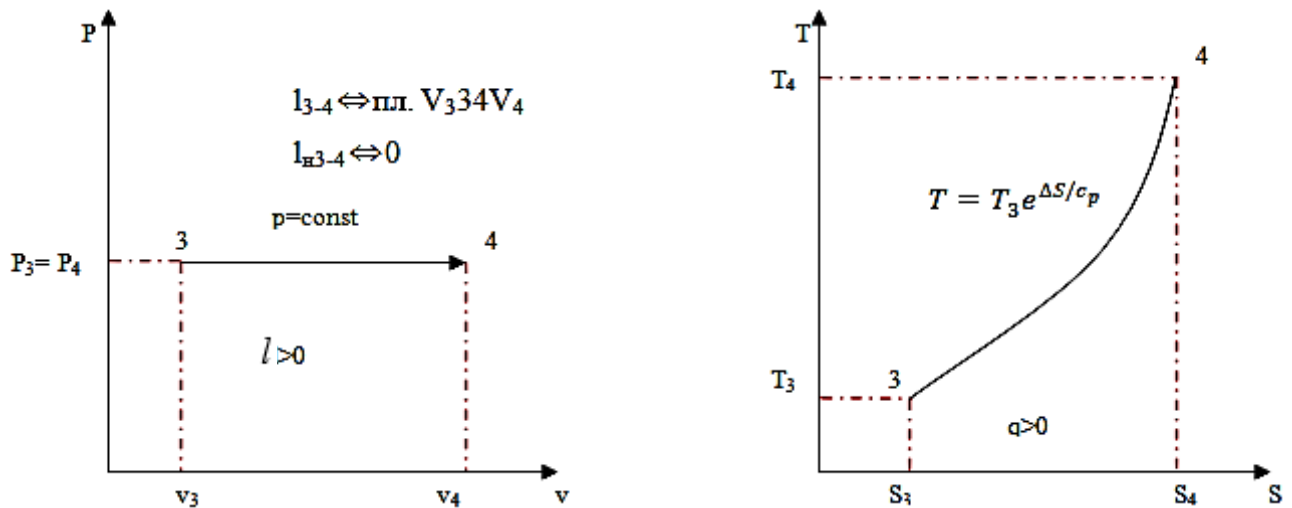


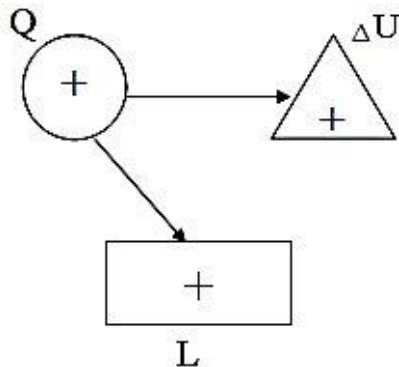
Рис. 7

Зведемо енергетичний баланс процесу 3-4, згідно з I законом термодинаміки $Q = \Delta U + L$, знайдемо відносну похибку розрахунків та покажемо схему енергетичного балансу. Відомо, що $Q=6088,71$ кДж, $\Delta U = 4359$ кДж, $L = 1730,18$ кДж, тоді:

$$6088,71 = 4359 + 1730,18 = 6089,18;$$

$$\delta\% = (|6088,71 - 6089,18|) / 6088,71 \cdot 100\% = 0,456\%.$$

Запишемо у табл. 8 результати розрахунків процесу 3-4.



У ізобарному процесі теплота підводу витрачається на збільшення внутрішньої енергії і розширення ідеального газу

Рис. 8

5.1.12. Процес 4-5

Адіабатний процес розширення 4-5 подібний до адіабатного процесу стиснення 2-3. Всі формули, які використовувалися у процесі 2-3, можна застосувати до процесу 4-5. Тому далі будуть наведені тільки розрахунки без додаткових пояснень.

$$\Delta U_{4-5} = m \cdot (u_5 - u_4) = 19,21 \cdot (449,18 - 601,63) = -2943,8 \text{ кДж};$$

$$\Delta H_{4-5} = m \cdot (h_5 - h_4) = 19,21 \cdot (627,36 - 840,281) = -4111,5 \text{ кДж};$$

$$\Delta S_{4-5} = m \cdot (s_5 - s_4) = 0;$$

$$\Delta E_{4-5} = m \cdot (e_5 - e_4) = 19,21 \cdot (134,76 - 347,76) = -4106,08 \text{ кДж};$$

$$Q_{4-5} = 0 \text{ (адіабатний процес);}$$

$$L_{4-5} = mR(T_4 - T_5)/(k-1) = 19,21 \cdot 0,287(834,44 - 623)/(1,4-1) = 2929,478 \text{ кДж};$$

$$L_{н4-5} = k \cdot L_{4-5} = 1,4 \cdot 2929,48 = 4101,27 \text{ кДж.}$$

Зобразимо процес 4-5 у p v - і T s - діаграмах.

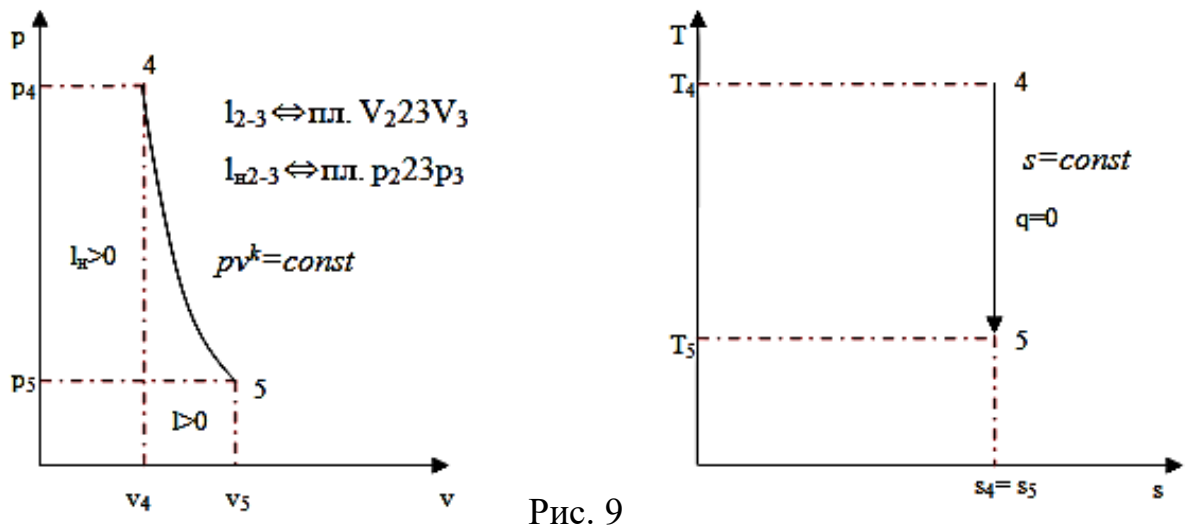


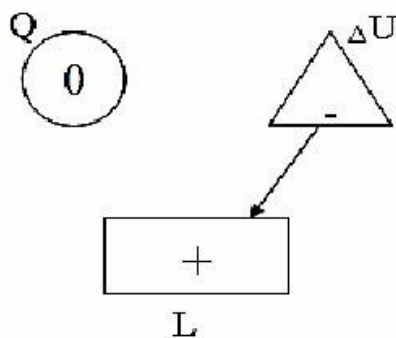
Рис. 9

Зведемо енергетичний баланс: $L_{н4-5} = -\Delta H_{4-5}$. Відомо, що

$L_{н4-5} = 4101,27 \text{ кДж}$, $\Delta H_{4-5} = -4111,5 \text{ кДж}$, тоді:

$$\delta\% = (|4101,27 - 4111,5|)/4101,27 = 1,03\%.$$

Схема енергобалансу процесу 4-5 має вигляд:



При адіабатному розширенні ідеального газу внутрішня енергія зменшується

Рис. 10

5.1.13 Процес 5-1

Ізохорний процес зниження тиску закінчує цикл, що розглядається. Обчислимо зміну параметрів стану цього процесу:

$$\Delta U_{5-1} = m \cdot (u_1 - u_5) = 19,21 \cdot (312,19 - 449,18) = -2645,27 \text{ кДж};$$

$$\Delta H_{5-1} = m \cdot (h_1 - h_5) = 19,21 \cdot (436,03 - 627,36) = -3694,58 \text{ кДж};$$

$$\Delta S_{5-1} = m \cdot (s_1 - s_5) = 19,21 \cdot (0,468 - 0,73) = -5,059 \text{ кДж/К};$$

$$\Delta E_{5-1} = m \cdot (e_1 - e_5) = 19,21 \cdot (22,02 - 134,76) = -2176,82 \text{ кДж}.$$

Оскільки в ізохорному процесі об'єм сталий, то робота зміни об'єму дорівнює нулю.

$$L = \int m p dv = 0, \quad v_5 = v_1, \quad dv = 0.$$

Наявну роботу процесу 5-1 знайдемо за формулою:

$$L_{н1-5} = m v_1 (p_5 - p_1) = 19,21 \cdot 1,243 \cdot (1,44 - 1) \cdot 10^5 = 1056,1 \text{ кДж}.$$

Теплоту процесу розрахуємо як добуток маси ідеального газу на ізохорну теплоємність та різницю температур у кінці та на початку процесу.

$$Q_{5-1} = m c_v (T_1 - T_5) = 19,21 \cdot 0,721 \cdot (433 - 623) = -2645,27 \text{ кДж}.$$

Зобразимо процес 5-1 у p - v і T - s діаграмах.

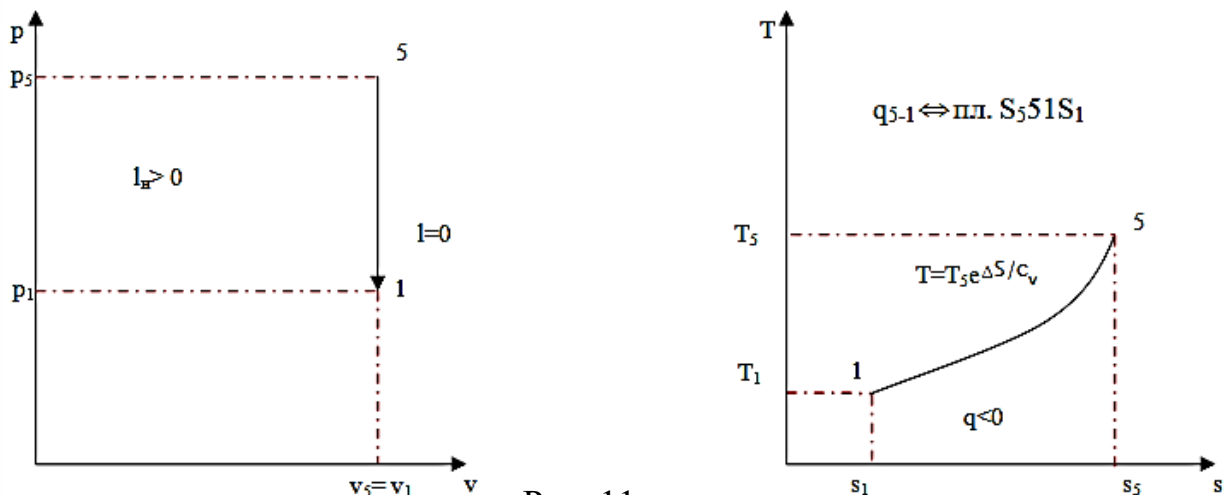


Рис. 11

Всі розрахункові дані для процесу 5-1 зведемо у табл. 8.

Запишемо I закон термодинаміки $Q = \Delta H + L_n$ та визначимо його відносну похибку.

$$2645,27 = -3694,58 + 1056,1 = 2638,48;$$

$$\delta\% = (|2645,27 - 2638,48|) / 2645,27 \cdot 100\% = 0,64\%.$$

Побудуємо схему енергобалансу та з'ясуємо її суть:



В ізохорному процесі ідеального газу відведення теплоти відбувається за рахунок зменшення внутрішньої енергії.

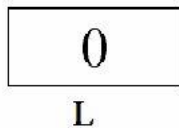


Рис. 12

5.1.14 Розрахунок циклу за II законом термодинаміки

Цикл, що розглядається, є термодинамічним циклом, за яким працюють теплові двигуни, бо всі процеси, що складають цикл, зображуються за годинниковою стрілкою. Встановимо характеристики прямого термодинамічного циклу $Q_{\text{ц}}$, $L_{\text{ц}}$, $L_{\text{нц}}$ як суму відповідних характеристик у процесах, що складають цикл.

$$Q_{\text{ц}} = \sum Q_i; \quad L_{\text{ц}} = \sum L_i; \quad L_{\text{нц}} = \sum L_{\text{нi}}.$$

Ці розрахунки є своєрідною перевіркою виконаних обчислень, бо якщо вони зроблені вірно, то повинен виконуватись I закон термодинаміки для циклів:

$$Q_{\text{ц}} = L_{\text{ц}} = L_{\text{нц}}.$$

За даними табл. 8

$$Q_{\text{ц}} = 1678,8 \text{ кДж}, \quad L_{\text{ц}} = 1659,4 \text{ кДж}, \quad L_{\text{нц}} = 1667,4 \text{ кДж}.$$

Знайдемо відносну похибку розрахунків при обчисленні $L_{\text{ц}}$ та $L_{\text{нц}}$.

$$\delta L_{\text{ц}}\% = (1678,8 - 1659,4) / 1678,8 \cdot 100\% = 1,15\%;$$

$$\delta L_{\text{нц}}\% = (1678,8 - 1667,4) / 1678,8 \cdot 100\% = 0,675\%.$$

Аналізуючи табл. 8 (с. 33), студент самостійно переконується у відмінності властивостей двох груп термодинамічних величин: зміна параметрів стану у циклі дорівнює нулю, а теплота і робота циклу не є нульовими величинами і дорівнюють одна одній.

Проаналізуємо цикл з точки зору II закону термодинаміки. Для цього накреслимо його у Ts - діаграмі та покажемо температурний інтервал у якому відбувається цикл. Виділимо процеси підведення та відведення теплоти у циклі. Покажемо відповідний цикл Карно у цьому інтервалі температур.

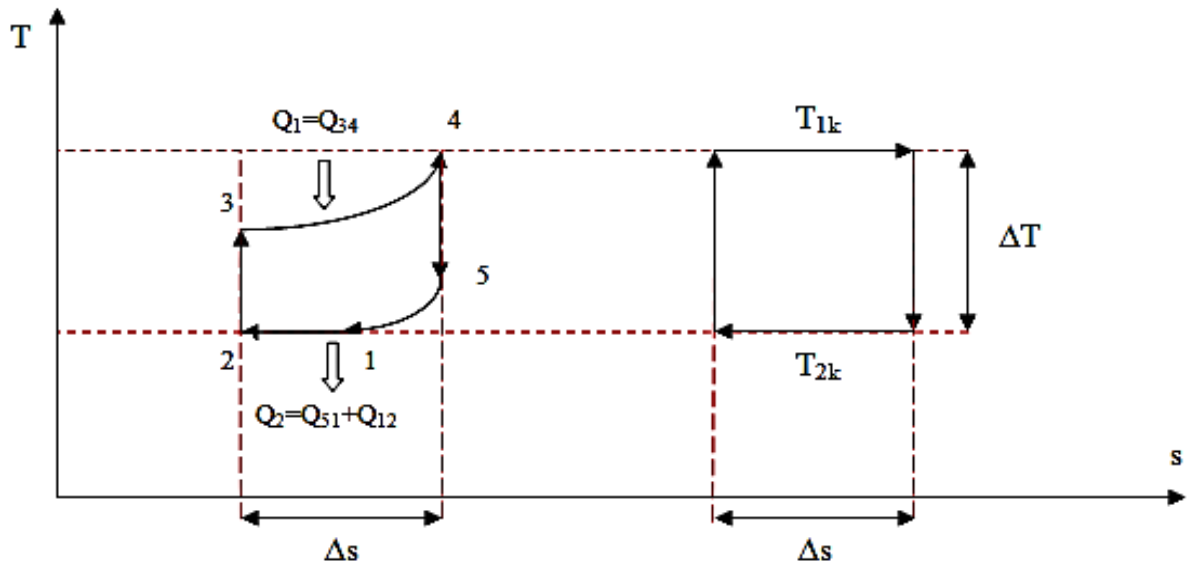


Рис. 13

Очевидно, що процеси 2-3 та 4-5 є адіабатними, бо у цих процесах ентропія є сталою величиною і теплота має нульове значення. Ізохорний процес 5-1 та ізоترمичний 1-2 відбуваються при зменшенні ентропії, тобто у них теплота відводиться. Єдиний процес, що протікає з підведенням теплоти – процес 3-4. Таким чином, теплота підведення у циклі дорівнює: $Q_1 = Q_{3-4} = 6088,269$ кДж, а теплота відведення у циклі є:

$$Q_2 = Q_{5-1} + Q_{1-2} = -1864,2 - 2645,27 = -4409,47 \text{ кДж.}$$

Теплоту циклу, що перетворюється в роботу, знайдемо за рівнянням:

$$L_{\text{ц}} = |Q_1| - |Q_2| = 6088,269 - 4400,47 = 1678,799 \text{ кДж.}$$

Термічний коефіцієнт корисної дії циклу, що показує яка частина підведеної теплоти перетворюється в роботу, знайдеться із співвідношення:

$$\eta_t = \frac{L_{\text{ц}}}{Q_1} = \frac{1678,799}{6088,269} \approx 0,276.$$

Порівняємо η_t довільного циклу з термічним коефіцієнтом відповідного циклу Карно

$$\eta_{\text{тк}} = 1 - \left(\frac{T_{2\text{k}}}{T_{1\text{k}}} \right) = 1 - \left(\frac{T_1}{T_4} \right) = 1 - \left(\frac{433}{834,44} \right) = 0,481.$$

Очевидно, що $\eta_{\text{тк}} > \eta_{\text{т}}$. Виконавши розрахунки, отримали підтвердження 2 теореми Карно: у даному інтервалі температур цикл Карно є найбільш досконалим та має максимальний коефіцієнт корисної дії.

5.2 Робоче тіло – реальний газ (H₂O)

Порівняємо, як результати розрахунків для ідеального газу відрізняються від розрахунків з реальним газом (водяною парою). Особливістю розрахунків з водяною парою є використання **hs**- діаграми водяної пари. Будь-яка точка на **hs**- діаграмі відповідає визначеному стану робочого тіла (суха насичена пара, волога насичена пара, перегріта пара). Для того, щоб знайти параметри водяної пари, необхідно побудувати точку у **hs**-діаграмі, а потім встановити числові значення ізобари, ізохори, ізотерми, лінії **s=const** та **h=const**, що проходять через цю точку. Числові значення цих ліній збігаються з величинами невідомих параметрів. Якщо через точку на **hs**-діаграмі зазначені лінії не проходять, то параметри стану встановлюють зіставленням найближчих до точки ізобар, ізохор та ін.

Внутрішня енергія – це єдиний параметр, який не знаходиться на **hs**-діаграмі, а встановлюється на основі розрахунків: $u = h - pv$.

5.2.1. Параметри стану водяної пари у початковій точці 1

У розрахунковому завданні для точки 1 відомі тиск **p₁=1 бар**, та температура **T₁=433K (t₁=160°C)**. За цими параметрами на перетині ізобари та ізотерми знайдемо точку 1. Вона (точка 1) знаходиться у зоні перегрітої пари (рис. 14). Знайдемо **v₁**, **h₁**, **s₁** за **hs**-діаграмою, як показано штриховими лініями:

$$v_1 = 2,0 \text{ м}^3/\text{кг}; h_1 = 2800 \text{ кДж/кг}; s_1 = 7,68 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Внутрішню енергію розрахуємо:

$$u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 2800 - (1 \cdot 10^5 / 10^3) \cdot 2 = 2600 \text{ кДж/кг}.$$

Параметри водяної пари у точці 1 запишемо у табл. 9.

Таблиця 9

Параметри	Точки				
	1	2	3	4	5
p, бар	1,0	1,8	4,0	4,0	1,45
t, °C	160	160	250	510	350
v, м ³ /кг	2,0	1,09	0,6	0,9	2,0
u, кДж/кг	2600	2593,8	2720	3150	2885
h, кДж/кг	2800	2790	2960	3510	3175
s, кДж/(кг К)	7,68	7,48	7,48	8,22	8,22

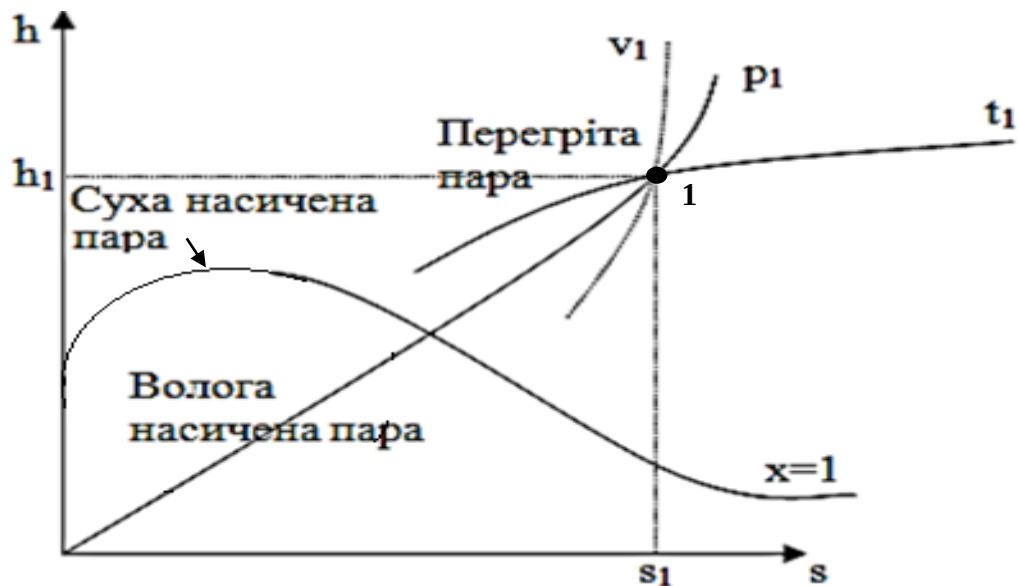


Рис.14

5.2.2 Маса водяної пари

Знаючи питомий об'єм перегрітої пари у початковій точці циклу, розрахуємо масу водяної пари:

$$m = V_1/v_1 = 24/2 = 12 \text{ кг.}$$

5.2.3 Параметри водяної пари в точці 5

Початкову точку ізохорного процесу 5-1 знайдемо на перетині ізохори $v_1 = v_5 = 2,0 \text{ м}^3/\text{кг}$ та ізотерми $t_5 = 350^\circ\text{C}$ ($T_5 = 623\text{K}$), як показано на рис. 15. Точка 5 знаходиться в зоні перегрітої пари.

Аналогічно попередньому визначимо параметри стану у точці 5 та занесемо їх до таблиці 9:

$$p_5 = 16,1 \text{ бар, } h_5 = 3920,6 \text{ кДж/кг, } s_5 = 8,05 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

Внутрішню енергію розрахуємо:

$$u_5 = h_5 - p_5 v_5 = 3175 - (1,45 \cdot 10^5 / 10^3) \cdot 2 = 2885 \text{ кДж/кг.}$$

5.2.5 Параметри водяної пари в точці 3

Тепер розглянемо, що є для знаходження на h -с- діаграмі точки 3. За умовою задачі процес 3-4 ізобарний і питомий об'єм у точці 3 в b разів менший від питомого об'єму в точці 1. Тому спочатку розрахуємо v_3 :

$$v_3 = v_1 / b = 2,0 / 3,33 = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 3 знаходиться на перетині ізобари $p_4 = 4$ бар та ізохори $v_3 =$

$v_3 =$

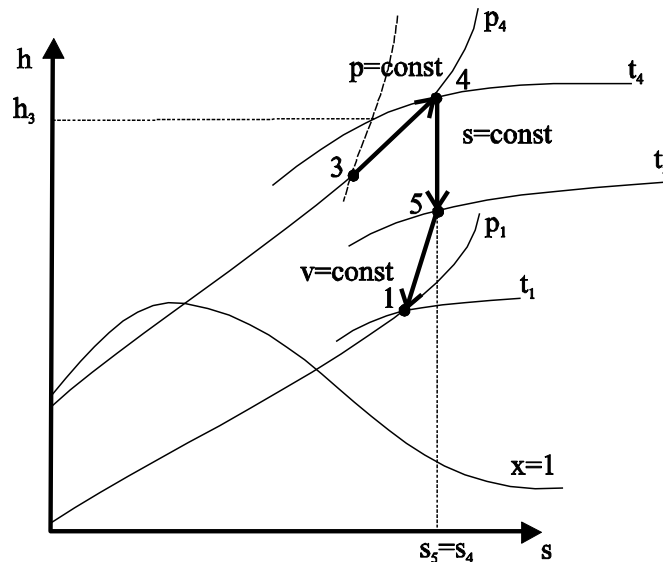


Рис. 17

Графічно визначимо: $t_3 = 250^\circ\text{C}$, $h_3 = 2960$ кДж/кг, $s_3 = 7,48$ кДж/(кг·К), u_3 розрахуємо подібно точкам 1, 5, 4. Результати внесемо у табл. 9.

$$u_3 = h_3 - p_3 v_3 = 2960 - (4 \cdot 10^5 / 10^3) \cdot 0,6 = 2720 \text{ кДж/кг}.$$

5.2.6 Параметри водяної пари у точці 2

Точка 2 є останньою точкою, яку треба знайти, будуючи цикл у h -с-діаграмі. Вона належить до адіабатного процесу стиснення 2-3 та ізотермічного процесу відведення теплоти 1-2. Точку 2 визначимо на перетині ізотерми, що проходить через точку 1 та адіабати, яка проходить через точку 3. Побудований цикл зображено на рис. 18.

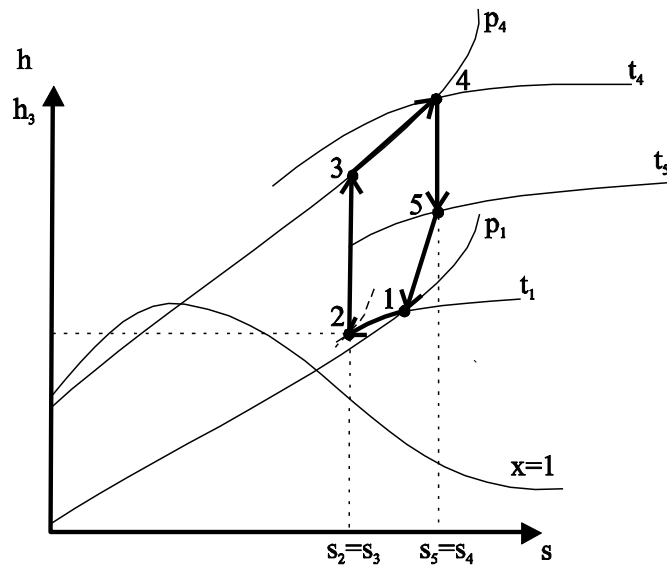


Рис. 18

Параметри стану h_2 , v_2 , p_2 встановимо за діаграмою t_2 і s_2 є відомими з попередніх розрахунків, а u_2 обчислимо, якщо добуток $p_2 v_2$ віднімемо від ентальпії h_2 :

$$h_2 = 2790 \text{ кДж/кг}, v_2 = 1,09 \text{ м}^3/\text{кг}, p_2 = 1,8 \text{ бар};$$

$$u_2 = h_2 - p_2 v_2 = 2790 - (1,8 \cdot 10^5 / 10^3) \cdot 1,09 = 2593,8 \text{ кДж/кг}.$$

Далі остаточно заповнимо табл. 9 параметрів водяної пари.

5.2.7 Розрахунок процесів водяної пари

Усі процеси, що складають цикл, зображені на рис. 18. Розрахунок кожного процесу будемо вести у такій послідовності. По-перше, знайдемо ΔU , ΔH , ΔS у процесі; по-друге, розрахуємо Q , L , L_n ; по-третє, складемо енергетичний баланс процесу за I законом термодинаміки, покажемо схему енергобалансу; по-четверте, накреслимо процес у h - s -, T - s -, і p - v -діаграмах водяної пари.

5.2.8 Процес 1-2

По аналогії з ідеальним газом першим йде процес 1-2. Для цього ізотермічного процесу простежується різниця властивостей ідеального газу та водяної пари. У процесі 1-2 ідеального газу внутрішня енергія і ентальпія рівна нулю. Для водяної пари $U=f(T,p)$ і $H=f(T,p)$, тобто враховуються сили взаємодії між молекулами, ΔU та ΔH не будуть мати нульового значення:

$$\Delta U_{1-2} = m \cdot (u_2 - u_1) = 12 \cdot (2593,8 - 2600) = -74,4 \text{ кДж};$$

$$\Delta H_{1-2} = m \cdot (h_2 - h_1) = 12 \cdot (2790 - 2800) = -120 \text{ кДж.}$$

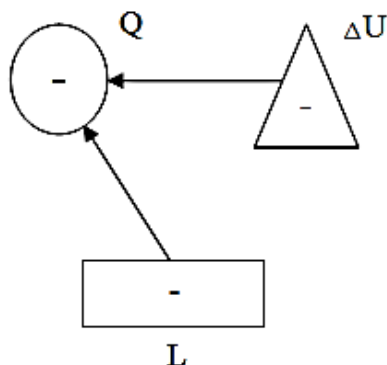
Обчислимо зміну ентропії у цьому процесі. Вона буде від'ємною:

$$\Delta S_{1-2} = m \cdot (s_2 - s_1) = 12 \cdot (7,48 - 7,68) = -2,4 \text{ кДж/К.}$$

За формулою (6) розрахуємо кількість теплоти, що відводиться у процесі:

$$Q_{1-2} = m T_1 (s_2 - s_1) = 12 \cdot 433 \cdot (7,48 - 7,68) = -1039,2 \text{ кДж}$$

Складемо схему енергобалансу ізотермічного стиснення водяної пари.



При ізотермічному стисненні водяної пари тепло відведення відбувається не тільки за рахунок стиснення робочого тіла, але й за рахунок зменшення внутрішньої енергії.

Рис. 19

Покажемо процес 1-2 у p - v - і T - s - діаграмах.

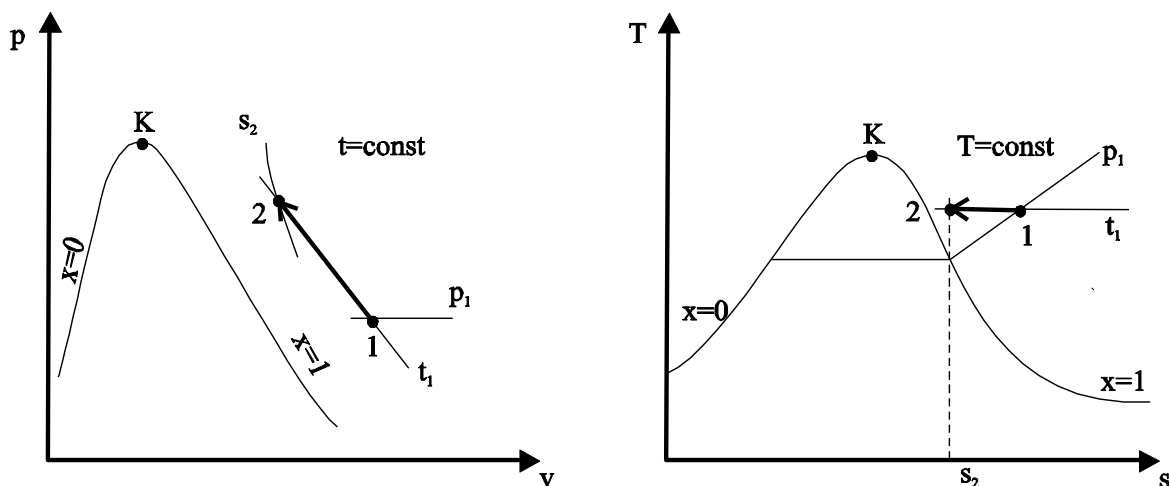


Рис. 20

Отримані результати запишемо у табл. 10.

Таблиця 10

Процеси	ΔU_b	ΔH_b	ΔS_b	Q_b	L_b	$L_{\text{нб}}$
	кДж	кДж	кДж/К	кДж	кДж	кДж
1-2	-74,4	-120	-2,4	-1039,8	-964,8	-919,2
2-3	1514,4	2040	0	0	-1514,4	-2040
3-4	5160	6600	8,88	6600	1440	0
4-5	-3180	-4020	0	0	3180	4020
5-1	-3420	-4500	-6,48	-3420	0	1080
Σ	0	0	0	2140,8	2140,8	2140,8

5.2.9 Процес 2-3

Процес 2-3 – це процес адіабатного стиснення, який повністю знаходиться у зоні перегрітої пари. Для цього процесу розрахуємо зміну функцій стану:

$$\Delta U_{2-3} = m \cdot (u_3 - u_2) = 12 \cdot (2720 - 2593,8) = 1514,4 \text{ кДж};$$

$$\Delta H_{2-3} = m \cdot (h_3 - h_2) = 12 \cdot (2960 - 2790) = 2040 \text{ кДж};$$

$$\Delta S_{2-3} = m \cdot (s_3 - s_2) = 12 \cdot (7,48 - 7,48) = 0.$$

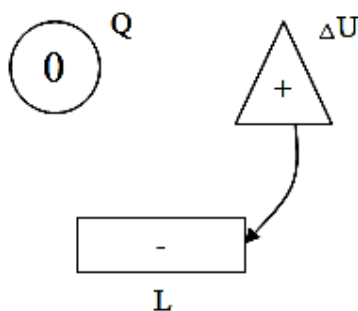
Знайдемо характеристики процесу. Незважаючи на природу робочого тіла, у адіабатному процесі, що йде без теплообміну з навколишнім середовищем, теплота дорівнює нулю. Але при розрахунку роботи зміни об'єму та наявної роботи природа робочого тіла виявляє свої властивості. Формули, які використовувалися не підходять. Характеристики процесу знаходяться для ідеального газу за I законом термодинаміки:

$$Q = \Delta U + L \text{ та } Q = \Delta H + L_n. \text{ Тоді, якщо } Q_{2-3}=0, \text{ отримаємо:}$$

$$L_{2-3} = -\Delta U_{2-3} = -1514,4 \text{ кДж};$$

$$L_{n2-3} = -\Delta H_{2-3} = -2040 \text{ кДж}.$$

На основі останніх рівнянь складемо схему енергобалансу.



В адіабатному процесі стиснення внутрішня енергія водяної пари зростає. При цьому робота зміни об'єму дорівнює зміні внутрішньої енергії з протилежним знаком.

Рис. 21

Зобразимо процес 2-3 у **hs**-, **Ts**-, і **pv**- координатах. Будуючи його, будемо пам'ятати, що при зображенні циклу спочатку була відома точка 3, а початкову точку 2 було встановлено на перетині адіабати s_3 та ізотерми t_1 (рис. 22).

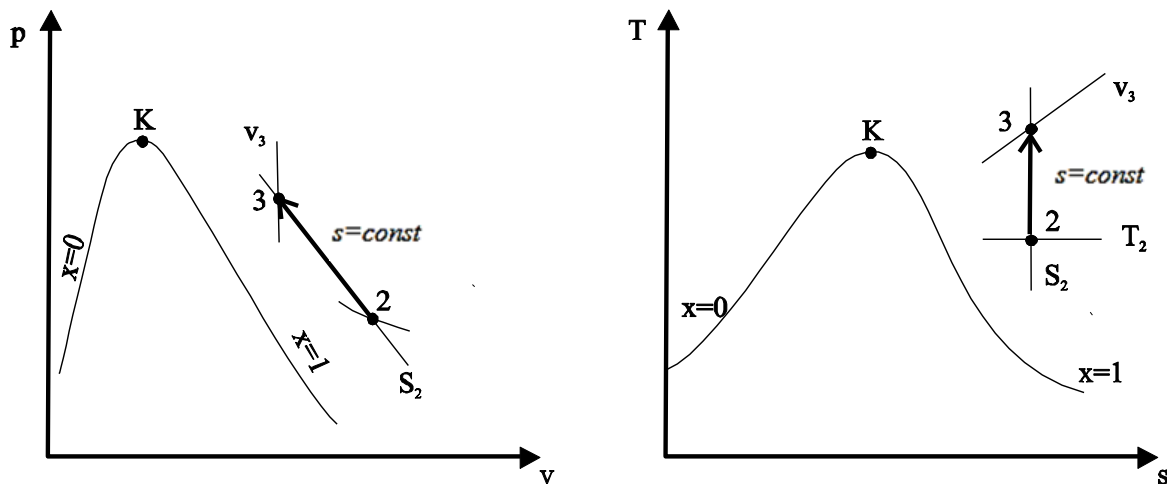


Рис. 22

Числові значення величин ΔU_{2-3} , ΔH_{2-3} , ΔS_{2-3} , Q_{2-3} , L_{2-3} , $L_{н2-3}$ занесемо у табл. 10.

5.2.10 Процес 3-4

Наступним процесом циклу є процес ізобарного розширення 3-4. По аналогії обрахуємо ΔU_{3-4} , ΔH_{3-4} , ΔS_{3-4} :

$$\Delta U_{3-4} = m \cdot (u_4 - u_3) = 12 \cdot (3150 - 2720) = 5160 \text{ кДж};$$

$$\Delta H_{3-4} = m \cdot (h_4 - h_3) = 12 \cdot (3510 - 2960) = 6600 \text{ кДж};$$

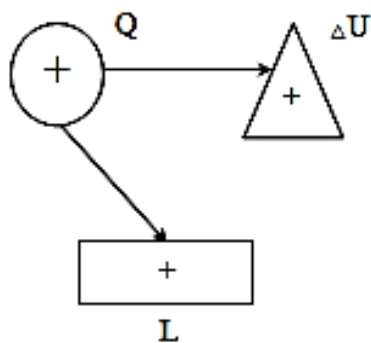
$$\Delta S_{3-4} = m \cdot (s_4 - s_3) = 12 \cdot (8,22 - 7,48) = 8,88 \text{ кДж/К}.$$

Особливістю ізобарного процесу є те, що наявна робота процесу має нульове значення. Роботу зміни об'єму знайдемо, використовуючи загальну формулу: $L_{3-4} = m \int p dv$. Якщо $p = \text{const}$, то:

$$L_{3-4} = m p_4 \cdot (v_4 - v_3) = (12 \cdot 4 \cdot 10^5) / 10^3 \cdot (0,9 - 0,6) = 1440 \text{ кДж}.$$

Теплоту ізобарного процесу найпростіше обчислити за I законом термодинаміки: $Q = \Delta H + L_n$. Якщо $L_{н4-5} = 0$, то $Q_{3-4} = \Delta H_{3-4} = 6600 \text{ кДж}$.

Схема енергобалансу ізобарного процесу водяної пари нагадує схему енергобалансу ідеального газу.



Теплота, що підводиться в ізобарному процесі, йде на збільшення внутрішньої енергії та розширення водяної пари.

Рис. 23

При зображенні процесу 3-4 кінцева точка 4 визначається на перетині ізобари p_4 і адіабати s_4 . Знаючи напрям ізобарного процесу, точку 3 знайшли на перетині лінії процесу з об'ємом v_3 . Покажемо цей процес у термодинамічних діаграмах (рис. 24).

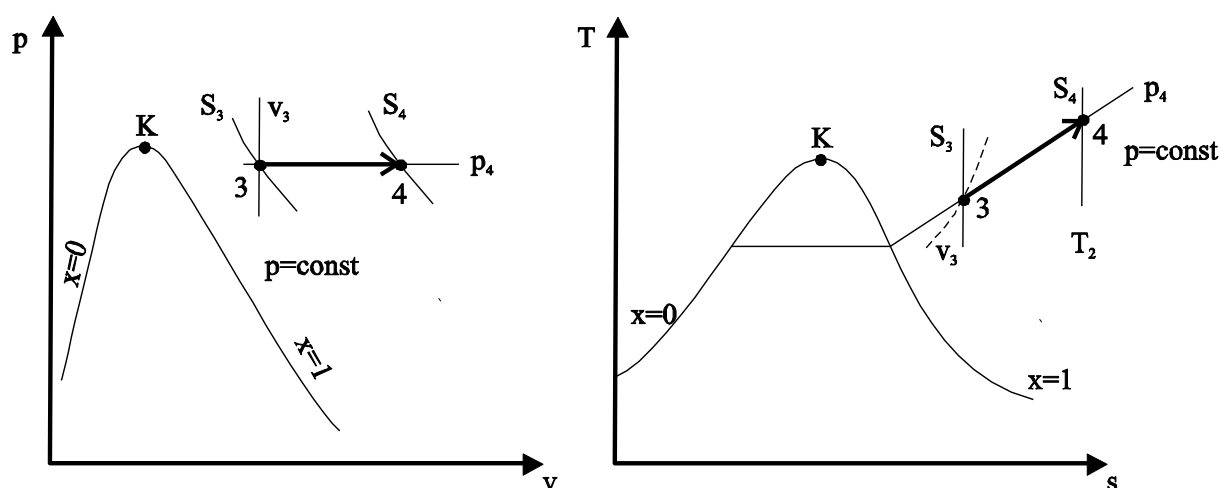


Рис. 24

5.2.11 Процес 4-5

Адіабатний процес розширення 4-5 відбувається без теплообміну з навколишнім середовищем при сталій ентропії. Знайдемо для цього процесу зміну функцій стану:

$$\Delta U_{4-5} = m \cdot (u_5 - u_4) = 12 \cdot (2885 - 3150) = -3180 \text{ кДж};$$

$$\Delta H_{4-5} = m \cdot (h_5 - h_4) = 12 \cdot (3175 - 3510) = -4020 \text{ кДж};$$

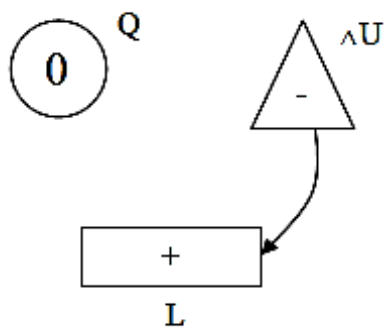
$$\Delta S_{4-5} = m \cdot (s_5 - s_4) = 12 \cdot (8,22 - 8,22) = 0.$$

Аналогічно до процесу 2-3 $Q_{4-5}=0$, а L_{4-5} і $L_{н4-5}$ визначимо за I законом термодинаміки:

$$L_{4-5} = -\Delta U_{4-5} = +3180 \text{ кДж};$$

$$L_{н4-5} = -\Delta H_{4-5} = +4020 \text{ кДж}.$$

Схема трансформації енергії у процесі має вигляд:



В адіабатному процесі розширення, внутрішня енергія водяної пари зменшується.

Рис. 25

Результати розрахунків адіабатного процесу розширення зведемо у табл. 10. Побудуємо процес 4-5 у термодинамічних діаграмах водяної пари.

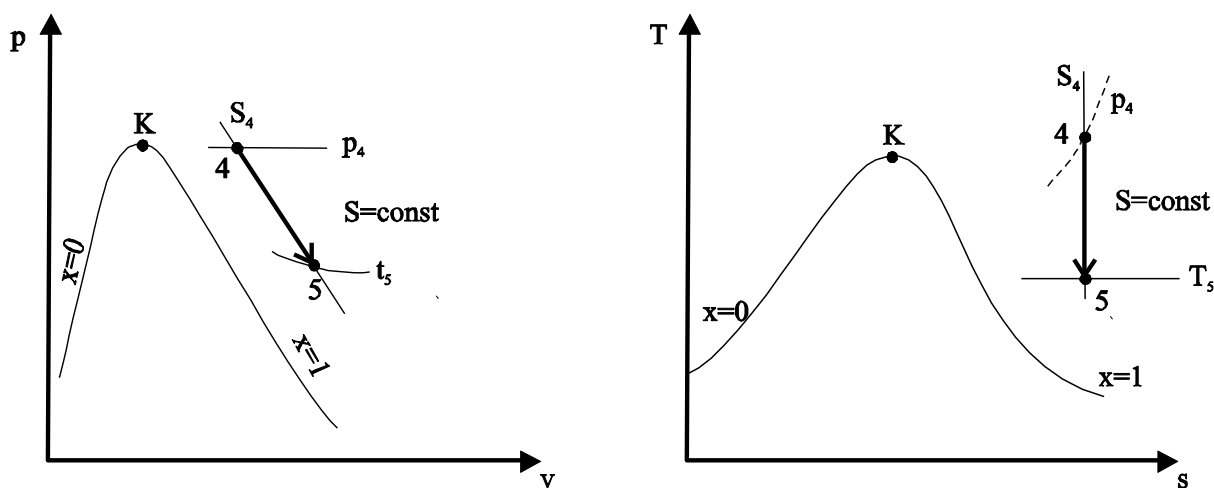


Рис. 26

Як видно із діаграм, кінцева точка процесу 5 знаходиться у місці перетину ізотерми t_5 та ізохори v_5 . А початкова точка 4 визначається на перетині лінії процесу $s_5 = \text{const}$ та ізобари p_4 .

5.2.12 Процес 5-1

Останнім процесом циклу є процес ізохорного відведення теплоти. Здійснимо розрахунок процесу 5-1 подібно до попередніх.

$$\Delta U_{5-1} = m \cdot (u_1 - u_5) = 12 \cdot (2600 - 2885) = -3420 \text{ кДж};$$

$$\Delta H_{5-1} = m \cdot (h_1 - h_5) = 12 \cdot (2800 - 3175) = -4500 \text{ кДж};$$

$$\Delta S_{5-1} = m \cdot (s_1 - s_5) = 12 \cdot (7,68 - 8,22) = -6,48 \text{ кДж/К}.$$

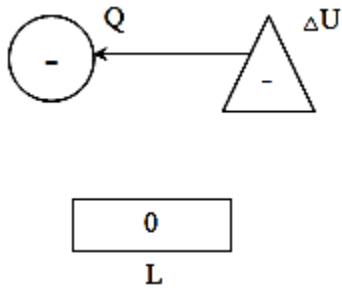
Особливістю процесу, що протікає при сталому об'ємі, є те, що робота зміни об'єму дорівнює нулю. Враховуючи це, за I законом термодинаміки визначимо теплоту процесу:

$$L_{5-1} = m \int p dv = 0, \quad Q_{5-1} = \Delta U_{5-1} + L_{5-1}, \quad Q_{5-1} = \Delta U_{5-1} = -3420 \text{ кДж.}$$

Найвну роботу визначимо із загальної формули:

$$L_{H5-1} = m v_1 \cdot (p_5 - p_1) = 12 \cdot 2 \cdot ((1,45 - 1,0) \cdot 10^5) / 10^3 = 1080 \text{ кДж.}$$

Побудуємо схему енергобалансу ізохорного процесу.



В ізохорному процесі теплота еквівалентна зміні внутрішньої енергії. Якщо теплота відводиться, внутрішня енергія зменшується.

Рис. 27

Покажемо процес ізохорного відведення теплоти у **hs**-, **Ts**-, і **pv**-діаграмах (рис. 28).

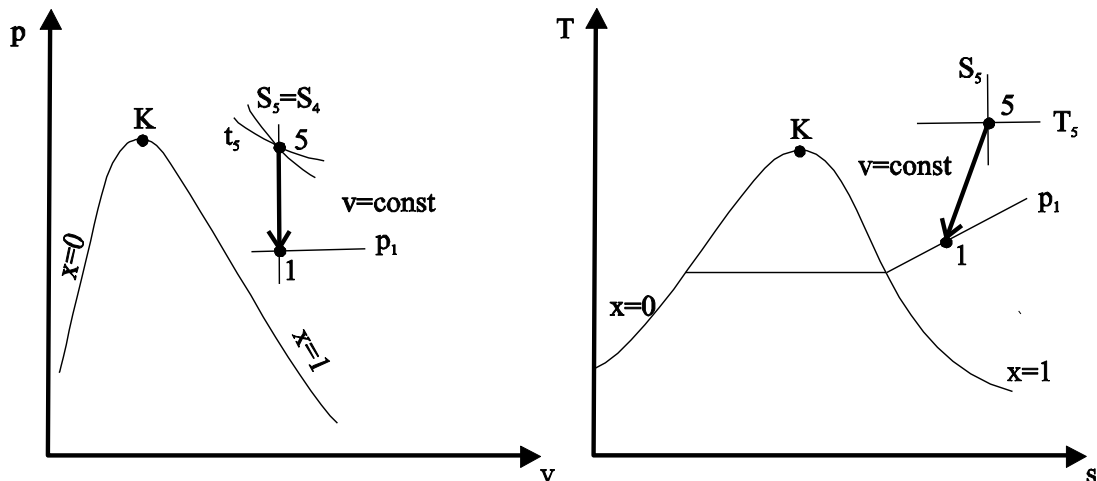


Рис. 28

У будь-якій діаграмі кінцева точка процесу 5-1 знаходиться на перетині ізоТЕРМИ **t₁** та іЗОБАРИ **p₁**. Точку 5 визначали у тому місці діаграми, де лінія процесу **v₁=const** перетиналася з відомою ізоТЕРМОЮ **t₅**.

Дані таблиці 10 свідчать про те, що незалежно від природи робочого тіла властивості параметрів стану та характеристики процесів зберігаються:

$$\Delta U_{ц} = 0, \quad \Delta H_{ц} = 0, \quad \Delta S_{ц} = 0, \quad Q_{ц} = L_{ц} = L_{нц} = 2140,8 \text{ кДж.}$$

5.2.13 Аналіз циклу водяної пари за II законом термодинаміки

Знайдемо основні величини, які характеризують тепломеханічний цикл водяної пари. Теплота, яка підводиться від гарячого джерела до робочого тіла у циклі дорівнює:

$$Q_1 = Q_{3-4} = 6600 \text{ кДж.}$$

Теплота, яка відводиться від робочого тіла холодному джерелу у циклі становить:

$$Q_2 = Q_{5-1} + Q_{1-2} = -3420 - 1039,2 = -4459,2 \text{ кДж.}$$

Корисну роботу циклу та термічний коефіцієнт корисної дії знайдемо із рівнянь:

$$L_{\text{ц}} = |Q_1| + |Q_2| = 6600 - 4459,2 = 2140,8 \text{ кДж};$$

$$\eta_t = \frac{L_{\text{ц}}}{Q_1} = \frac{2140,8}{6600} = 0,324 = 32,4\%.$$

Термічний ККД відповідного циклу Карно, що протікає у тому ж інтервалі температур дорівнює:

$$\eta_{\text{тк}} = 1 - \frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}} = 1 - \frac{T_1}{T_4} = 1 - \left(\frac{433}{783} \right) = 0,447 = 44,7\%.$$

Отримані результати свідчать, що незалежно від природи робочого тіла (ідеальний газ або водяна пара), у даному інтервалі температур цикл Карно є найефективнішим.

5.3 Ексергетична оцінка теплообмінного пристрою

Мірою, яка характеризує якісне перетворення будь-якого виду енергії, а отже досконалість установки, у якій це перетворення відбувається, є ексергія.

Для проведення ексергетичної оцінки теплообмінного агрегату прийемо на основі літературних джерел наступними параметрами:

- температура навколишнього середовища $T_0 = 300 \text{ К}$;
- відсоток втрат теплоти теплообмінним агрегатом у навколишнє середовище $i = 4\%$;
- зміна ентропії гарячого теплоносія теплообмінного пристрою $\Delta S_r = 3,72 \text{ кДж/К}$.

Знайдемо кількість теплоти, що передається до водяної пари у теплообмінному агрегаті. Для цього розглянемо термодинамічний цикл, який здійснюється водяною парою (рис. 18). Очевидно, що кількість теплоти, яку отримує водяна пара у теплообмінному агрегаті, дорівнює теплоті процесу 3-4. Це тому, що тільки у цьому процесі циклу ентропія водяної пари збільшується. Ця кількість теплоти

$$Q_{3-4} = 6600 \text{ кДж}.$$

Знаючи відсоток втрат теплоти у теплообмінному агрегаті, знаходимо наявну кількість теплоти у теплообміннику:

$$Q_H = (Q_{3-4} / (100 - i)) \cdot 100 = 6600 / 0,96 = 6875 \text{ кДж}.$$

Розрахуємо ексергію цієї теплоти згідно формулою:

$$E_1 = Q_H \cdot \left(1 - \left(\frac{T_0}{T_r} \right) \right) = 5712 \text{ кДж}, \quad (24)$$

де T_r - середньо-термодинамічна температура гарячого теплоносія.

Вона дорівнює:

$$T_r = Q_{3-4} / \Delta S_r = 6875 / 3,72 = 1848,12 \text{ К}.$$

Щоб розрахувати ексергетичний коефіцієнт корисної дії

$\eta_{\text{екс}} = \frac{E_2}{E_1}$, необхідно знати ексергію теплоти утвореної водяної пари, яка

виходить з установки:

$$E_2 = Q_n \cdot \left(1 - \left(\frac{T_0}{T_n} \right) \right),$$

де T_n - температура водяної пари, що залишає теплообмінний агрегат. Ця температура збігається з кінцевою температурою ізобарного процесу підведення теплоти до водяної пари 3-4. Отже :

$$T_n = t_4 + 273 = 510 + 273 = 783 \text{ K};$$

$$E_2 = 6600 \cdot \left(1 - \frac{300}{783} \right) = 4071,3 \text{ кДж.}$$

Обчислимо ексергетичний коефіцієнт корисної дії:

$$\eta_{\text{екс}} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{4071,3}{5712} = 0,713 = 71,3\%.$$

Визначимо традиційний коефіцієнт корисної дії теплообмінного агрегату, який розраховується як відношення теплоти, яку корисно використано, до підведеної теплоти:

$$\eta_{\text{т.у.}} = \frac{Q_1}{Q_n} = \frac{Q_{3-4}}{Q_n} = \frac{6600}{6875} = 0,96 = 96\%.$$

Очевидно, що $\eta_{\text{т.у.}} > \eta_{\text{екс.}}$

Таким чином, з точки зору передачі теплоти, теплообмінний агрегат є достатньо ефективним апаратом, а з точки зору працездатності робочого тіла (ексергії), його не можна вважати досконалим пристроєм, тому що відсоток знецінювання енергії робочого тіла є достатньо високим - 28,7%.

Список літератури

1. Константинов С.М. Технічна термодинаміка. Підручник. – К.: «Політехніка», 2001. – 368с.
2. Константинов С.М., Панов Є.М. Теоретичні основи теплотехніки. Підручник. – К.: «Золоті ворота», 2012. – 592с.
3. Константинов С.М., Луцик Р.В. Збірник задач з технічної термодинаміки та теплопередачі. Навчальний посібник. – К.: «Освіта України», 2009. – 544с.
4. Константинов С.М., Луцик Р.В. Збірник задач з технічної термодинаміки. Навчальний посібник. – К.: «Політехніка», 2002. – 379с.
5. Алабовский А.Н., Константинов С.М., Недужий Н.О. Теплотехника. Під редакцією професора Константинова С.М. – К.: Вища шк. 1986. – 255с.
6. Константинов С.М. Процессы и параметры идеальных и реальных газов. – К.: КТИЛП, 1983. – 109с.
7. Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка. Підручник. – К.: «Техніка», 2001. – 320с.
8. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Справочник. – Москва.: «Энергоатомиздат», 1984. – 80с.