

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до самостійної роботи та виконання розрахунково-графічної
роботи з освітньої компоненти «Технічна термодинаміка»

Розрахунок газового циклу

для здобувачів вищої освіти спеціальності 144 «Теплоенергетика»
(освітня програма «Промислова і комунальна теплоенергетика»)
усіх форм навчання

Методичні вказівки до самостійної роботи та виконання розрахунково-графічної роботи з освітньої компоненти «Технічна термодинаміка» «Розрахунок газового циклу» для здобувачів вищої освіти спеціальності 144 «Теплоенергетика» (освітня програма «Промислова і комунальна теплоенергетика») усіх форм навчання. / Укл.: Бахтін В.І., Назаренко І.А., Кузьменко А.А., Каюков Ю.М., Запоріжжя : НУЗП, 2022. 46 с.

Укладачі: Бахтін В.І., доц. канд. техн. наук;
Назаренко І.А., доц. канд. техн. наук.
Кузьменко А.А., старш. викл.
Каюков Ю.М., доц. канд. техн. наук;

Рецензент Назаренко О.М., доц. канд. техн. наук.

Відповідальний
за випуск Яримбаш Д.С., проф., докт. техн. наук

Затверджено на засіданні
кафедри «Електричні машини»
Протокол №1
від 30.08.2022

Рекомендовано до видання
НМК Електротехнічного
факультету
Протокол №5
від 22.12.2022

ЗМІСТ

Загальні вказівки.....	4
1. Зміст розрахунково-графічної роботи і пояснювальної записки.....	5
2. Тематика завдання	6
3. Умови завдання	7
4. Методичні вказівки до розрахунку.....	9
Перелік посилань.....	35
Додаток А.....	36
Додаток Б.....	37
Таблиця Б.1 – Дані до завдання.....	37
Додаток В.....	42
Таблиця В.1 – Теплоємність повітря по С.Л. Ривкину.....	42
Додаток Г.....	43
Таблиця Г.1 – Розрахункові залежності для параметрів процесів циклу.....	43

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ

Розрахунково-графічна робота з курсу «Технічна термодинаміка» виконується студентами спеціальності 144 «Теплоенергетика».

При вивченні дисципліни позитивним моментом є придбання студентами навичок використання теоретичних основ курсу при вирішенні прикладних інженерних завдань.

Систематизація і цілеспрямованість самостійної роботи сприяють підвищенню ефективності навчання, а рішення конкретних технічних завдань числовими методами допоможе не тільки засвоєнню теоретичних основ курсу, але й практичному їхньому використанню.

Основними завданнями розрахунку являються закріплення і поглиблення знань, отриманих при вивченні курсу, придбання навичок аналізу технічних розрахунків, що виконуються, розширення знань в області термодинамічних циклів теплових двигунів, а також удосконалення вміння користуватися спеціальною технічною літературою і довідниками.

1 ЗМІСТ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ І ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ

Розрахунково-пояснювальна записка повинна бути написана на аркушах формату А4 і містити:

- а) титульний аркуш (див. Додаток А);
- б) реферат – короткий виклад змісту і результатів виконаної роботи;
- в) зміст;
- г) вступ, у якому описуються цикл і термодинамічні процеси, що складають цикл, проводиться початковий аналіз вихідних даних і графічна ілюстрація циклу;
- д) розрахункова частина, що включає два основних розділи, які виконуються відповідно до завдання;
- е) висновки;
- ж) перелік джерел посилань.

В першому розділі представлені послідовність термодинамічного аналізу циклу у вигляді формул (алгоритм розрахунку), із вказівкою розмірностей всіх величин і виконуються обчислення.

У другому розділі виконується графічний розрахунок по T , S – діаграмі.

2 ТЕМАТИКА ЗАВДАННЯ

Основне призначення теплового двигуна складається в перетворенні теплоти в механічну роботу. Теплота, яку перетворюють в роботу, виділяється при спалюванні палива. Це перетворення відбувається завдяки так званим робочим тілам, якими у теплових двигунах можуть бути пара і газ.

Принцип дії всіх теплових двигунів можна умовно розділити на наступні основні процеси: підведення теплоти до робочого тіла, перетворення теплоти в механічну енергію, відвід теплоти від робочого тіла.

Специфічною особливістю теплового двигуна є періодичність його дії, наявність двох джерел теплоти: вищого (нагрівача) і нижнього (холодильника), а також робочого тіла.

3 УМОВИ ЗАВДАННЯ

Сухе повітря масою 1 кг здійснює прямий термодинамічний цикл, який складається з чотирьох послідовних термодинамічних процесів. Дані, що необхідні для розрахунку, залежно від варіанта, наведені в Додатку Б.

Послідовність розрахунків

3.1 Розрахувати основні термодинамічні параметри стану робочого тіла (p , Па; v , м³/кг; T , К) в характерних точках циклу.

3.2 Для кожного із процесів визначити:

зміну внутрішньої енергії Δu , кДж/кг; ентальпії Δh , кДж/кг; ентропії ΔS , кДж/(кг·К); роботу процесу l , кДж/кг; наявну роботу l_n , кДж/кг; теплоту процесу q , кДж/кг; значення показника політропи n ; коефіцієнтів $\alpha = \Delta u / q_1$ і $b = l / q_1$.

3.3 Визначити сумарні кількості теплоти: підведеної q_1 , кДж/кг, і відведеної q_2 , кДж/кг, в циклі; роботу циклу $l_{\text{ц}}$, кДж/кг; наявну роботу циклу l_n , кДж/кг; термічний ККД циклу η_t .

3.4 Побудувати цикл в координатах $lg p - lg v$.

Використовуючи ці графіки, знайти координати трьох-чотирьох проміжних точок на кожному із процесів.

3.5 Використовуючи значення проміжних точок, побудувати цикл в координатах p, v і T, S .

3.6 Використовуючи p, v і T, S - діаграми, графічно визначити величини, що зазначені у п. 3.2 і п.3.3, та зіставити результати графічного і аналітичного розрахунків.

Для полегшення розрахунків і їхнього аналізу пропонується роботу теплових двигунів ідеалізувати, що зводиться до наступного:

- всі процеси протікають з постійною кількістю робочого тіла, цикл є замкненою послідовністю цих термодинамічних процесів і робоче тіло за час одного циклу повертається в первісний стан і не викидається в атмосферу;

- процес згоряння палива замінюється підведенням теплоти до робочого тіла крізь стінки циліндра від деякого фіктивного гарячого джерела теплоти;

- видалення робочого тіла, що відпрацювало, не враховується і замінюється відводом теплоти від робочого тіла через стінки циліндра до так званого холодного джерела теплоти (холодильника);

- теплоємності робочих тіл приймаються залежними від температури;

- робочим тілом є ідеальний газ;

- механічні втрати на тертя, гідравлічні втрати відсутні.

При таких припущеннях можна вважати, що теплові машини працюють по зворотніх термодинамічних циклах.

Таким чином, в цих розрахунках повітря вважається ідеальним газом, а його властивості не залежними від температури. Приймається газова постійна R_n рівною 287,1 Дж / (кг · К).

Результати розрахунку треба представити у вигляді таблиць, вказавши в чисельнику значення, що отримані аналітично, а в знаменнику – графічно.

4 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО РОЗРАХУНКУ

Як приклад, приводимо розрахунок циклу, який представлений на рисунку 4.1, із заданими наступними параметрами в характерних точках:

$$p_1 = 0,3 \text{ МПа}; \quad v_1 = 0,3 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad p_2 = 1,0 \text{ МПа}; \quad T_3 = 473 \text{ К}$$

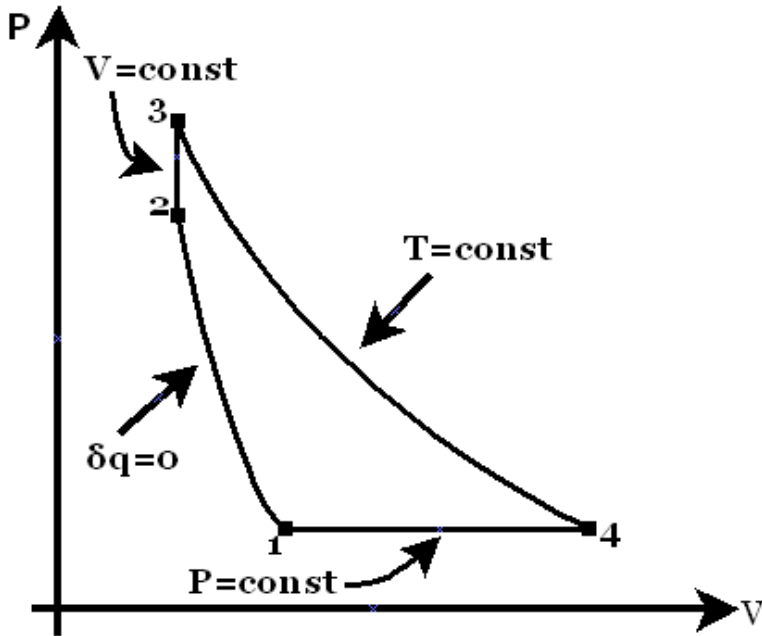


Рисунок 4. 1 – Термодинамічний цикл

і наступною послідовністю термодинамічних процесів, які складають даний цикл:

1 – 2 – адіабатний ($S = \text{const}$);

2 – 3 – ізохорний ($v = \text{const}$);

3 – 4 – ізотермічний ($T = \text{const}$);

4 – 1 – ізобарний ($p = \text{const}$).

Послідовність розрахунків

4.1 Визначимо температуру робочого тіла в т. 1 (T_1), °C.

$$T_1 = \frac{p_1 \cdot v_1}{Rn} = \frac{0,30 \cdot 10^6 \times 0,3}{287,1} = 313,5 \text{ K} = 40,4 \text{ }.$$

Згідно завдання робочим тілом є повітря, тому вибираємо з Додатку В:

$$c_v = 0,718 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)}; \quad c_p = 1,005 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)}; \quad k = 1,40;$$

$$R_n = 287,1 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{K)}.$$

Визначимо показник політропи n для кожного із процесів з наступного виразу

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v}, \quad (4.1)$$

в яке замість теплоємності c підставимо відповідні значення теплоємностей для даного процесу.

Як відомо, для ізохорного процесу $c = c_v$; для ізобарного процесу $c = c_p$; для ізотермічного процесу $c = \infty$; для адіабатного процесу $c = 0$.

Таким чином маємо:

$$\text{- для ізохорного процесу} \quad n_v = \frac{c_v - c_p}{c_v - c_v} = \frac{-R}{0} = \pm \infty;$$

$$\text{- для ізобарного процесу} \quad n_p = \frac{c_p - c_p}{c_p - c_v} = \frac{0}{R} = 0;$$

$$\text{- для ізотермічного процесу} \quad n_T = \frac{\infty - c_p}{\infty - c_v} = 1;$$

- для адіабатного процесу
$$n_s = \frac{0 - c_p}{0 - c_v} = \frac{-c_p}{-c_v} = k.$$

4.2 Розрахунок p , v , T в основних точках циклу проведемо, використовуючи співвідношення, що визначають зв'язок між основними термодинамічними параметрами робочого тіла

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{1}{n-1}}; \quad \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}};$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1}.$$

4.3 Для т. 2 дано $p_2 = 1,0$ МПа. Необхідно визначити v_2 і T_2 .

Для визначення питомого об'єму v_2 використовуємо рівняння зв'язку параметрів в адіабатному процесі 1 – 2, $\text{м}^3/\text{кг}$

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,3 \cdot \left(\frac{0,3}{1,0} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 0,127.$$

Для визначення абсолютної температури робочого тіла T_2 в т. 2, використовуємо рівняння Клапейрона- Менделєєва, °С

$$T_2 = \frac{p_2 \cdot v_2}{R_n} = \frac{1,0 \cdot 10^6 \times 0,127}{287,1} = 442,4 \text{ К} = 169,2^\circ \text{С}.$$

Для т. 3 дано $T_3 = 473 \text{ К} = 200^\circ \text{С}$, а також $v_2 = v_3 = 0,127 \text{ м}^3/\text{кг}$.
Необхідно знайти p_3 .

Для визначення абсолютного тиску p_3 використовуємо рівняння зв'язку параметрів в ізохорному процесі 2 – 3, МПа

$$p_3 = \frac{p_2 \times T_3}{T_2} = \frac{1,0 \cdot 10^6 \times 473}{442,4} = 1069168 \text{ Па} \approx 1,07 \text{ .}$$

Для т. 4 дано $T_3 = T_4 = 473 \text{ К} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$; $p_4 = p_1 = 0,3 \text{ МПа}$.

Необхідно знайти v_4

Для визначення питомого об'єму v_4 використовуємо рівняння зв'язку параметрів в ізотермічному процесі 3 – 4, $\text{м}^3 / \text{кг}$

$$v_4 = \frac{v_3 \times p_3}{p_4} = \frac{0,127 \times 1,07}{0,30} = 0,453 \text{ .}$$

Результати розрахунку термодинамічних параметрів стану в точках газового циклу представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1- Термодинамічні параметри стану точок газового циклу

Точки	p , МПа	v , $\text{м}^3 / \text{кг}$	T , К	t , $^\circ\text{C}$
т. 1	0,30	0,3	313,5	40,4
т. 2	1,0	0,127	442,4	169,2
т. 3	1,07	0,127	473,0	200,0
т. 4	0,3	0,453	473,0	200,0

4.4 Визначаємо величини питомої роботи розширення (стискування) l , питомої наявної роботи l_i , коефіцієнтів α і b , підведеної (відведеної) питомої теплоти процесів q , зміни питомої внутрішньої енергії Δu в процесах, зміни питомої ентальпії Δh в процесах, зміни питомої ентропії ΔS в процесах

4.4.1 Процес 1 – 2 (адіабатний, $n = k$)

$$\Delta u_{1-2} = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 0,718 \cdot (442,4 - 313,5) = 92,55 \text{ кДж / кг};$$

$$\Delta h_{1-2} = c_p \cdot (T_2 - T_1) = 1,005 \cdot (442,4 - 313,5) = 129,55 \text{ кДж / кг};$$

$$\Delta s_{1-2} = 0 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$q_{1-2} = 0 \text{ кДж} / \text{кг};$$

$$l_{1-2} = -\Delta u_{1-2} = -92,55 \text{ кДж} / \text{кг};$$

$$l_{n(1-2)} = l_{1-2} \times k = -92,55 \times 1,4 = -129,57 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

Величини α і b не визначають, тому що в адіабатному процесі теплообмін відсутній, так як $q_{1-2} = 0$.

4.4.2 Процес 2 – 3 (ізохорний, $n = \pm \infty$)

$$\Delta u_{2-3} = c_v \cdot (T_3 - T_2) = 0,718 \cdot (473 - 442,4) = 21,97 \text{ кДж} / \text{кг};$$

$$\Delta h_{2-3} = c_p \cdot (T_3 - T_2) = 1,005 \cdot (473 - 442,4) = 30,75 \text{ кДж} / \text{кг};$$

$$\Delta s_{2-3} = c_v \cdot \ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right) = 0,718 \times \ln\left(\frac{473}{442,4}\right) = 0,048 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$q_{2-3} = \Delta u_{2-3} = 21,97 \text{ кДж} / \text{кг};$$

$$l_{2-3} = 0 \text{ кДж} / \text{кг};$$

$$l_{i(2-3)} = p_2 \cdot v_2 - p_3 \cdot v_3 = 0,127 \cdot (1000 - 1070) = -8,89 \text{ кДж} / \text{кг};$$

$$\alpha_{2-3} = \frac{\Delta u_{2-3}}{q_{2-3}} = \frac{21,97}{21,97} = 1,0; \quad b_{2-3} = \frac{l_{2-3}}{q_{2-3}} = \frac{0}{21,97} = 0.$$

4.4.3 Процес 3 – 4 (ізотермічний, $n = 1,0$)

$$\Delta u_{3-4} = 0 \text{ кДж / кг};$$

$$\Delta h_{3-4} = 0 \text{ кДж / кг};$$

$$\Delta S_{3-4} = Rn \cdot \ln \left(\frac{v_4}{v_3} \right) = 287,1 \cdot \ln \left(\frac{0,453}{0,127} \right) = 0,365 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)};$$

$$q_{3-4} = p_3 \cdot v_3 \times \ln \left(\frac{v_4}{v_3} \right) = 1070 \cdot 0,127 \times \ln \left(\frac{0,453}{0,127} \right) = 172,81 \text{ кДж / кг};$$

$$l_{3-4} = q_{3-4} = 172,81 \text{ кДж / кг};$$

$$l_{i(3-4)} = l_{3-4} \cdot n_T = 172,81 \text{ кДж / кг};$$

$$\alpha_{3-4} = \frac{\Delta u_{3-4}}{q_{3-4}} = \frac{0}{172,81} = 0;$$

$$b_{3-4} = \frac{l_{3-4}}{q_{3-4}} = \frac{172,81}{172,81} = 1,0.$$

4.4.4 Процесс 4 – 1 (изобарный, $n = 0$)

$$\Delta u_{4-1} = c_v \cdot (T_1 - T_4) = 0,718 \cdot (313,5 - 473) = -114,52 \text{ кДж / кг};$$

$$\Delta h_{4-1} = c_p \cdot (T_1 - T_4) = 1,005 \cdot (313,5 - 473) = -160,3 \text{ кДж / кг};$$

$$\Delta S_{4-1} = c_p \cdot \ln \left(\frac{T_1}{T_4} \right) = 1,005 \cdot \ln \left(\frac{313,5}{473} \right) = -0,413 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)};$$

$$q_{4-1} = \Delta h_{4-1} = -160,3 \text{ кДж / кг};$$

$$l_{4-1} = q_{4-1} - \Delta u_{4-1} = -160,3 - (-114,52) = -45,78 \text{ кДж / кг};$$

$$l_{i(4-1)} = l_{4-1} \cdot n_p = 0 \text{ кДж / кг};$$

$$\alpha_{4-1} = \frac{\Delta u_{4-1}}{q_{4-1}} = \frac{-114,52}{-160,3} = 0,714;$$

$$b_{4-1} = \frac{l_{4-1}}{q_{4-1}} = \frac{-45,78}{-160,3} = 0,286.$$

Отримані результати $n, c, l, l_i, \Delta q, \Delta u, \Delta h, \Delta s, \alpha, b$ зведені в таблицю 4. 2.

Таблиця 4.2-Результати розрахунків термодинамічних процесів циклу

	n	c, кДж / (кг · К)	α	b	Δu , кДж/кг	Δh , кДж/кг	Δs , кДж/(кг · К)	q , кДж/кг	l , кДж/кг	l_i , кДж/кг
1 – 2	$\frac{1,4}{1,4}$	0	-	-	$\frac{92,55}{0}$	$\frac{129,55}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{-92,55}{129,08}$	$\frac{-129,57}{129,68}$
2 – 3	$\frac{\pm \infty}{\pm \infty}$	0,71 8	1,0	0	$\frac{21,97}{-45,81}$	$\frac{30,75}{-63,98}$	$\frac{0,048}{0,051}$	$\frac{21,97}{16,82}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{-8,89}{78,61}$
3 – 4	$\frac{1,0}{1,0}$	∞	0	1,0	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0,365}{-0,3542}$	$\frac{172,81}{-105,55}$	$\frac{172,81}{-104,66}$	$\frac{172,81}{-104,65}$
4 - 1	$\frac{0}{0}$	1,00 5	0,7 14	0,28 6	$\frac{-}{114,52}$ 45,81	$\frac{-160,3}{64,11}$	$\frac{-0,413}{-0,051}$	$\frac{-160,3}{-16,82}$	$\frac{-45,78}{-59,58}$	$\frac{0}{0}$
СУМ А					$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0,13}$	$\frac{0}{0,0008}$	$\frac{34,48}{22,82}$	$\frac{34,48}{25,15}$	$\frac{34,35}{25,15}$

4.5 Визначаємо сумарну кількість підведеної теплоти q_1 ; відведеної теплоти q_2 в газовому циклі; корисну роботу циклу l ; термічний ККД циклу η_t ; індикаторний тиск p_i

4.5.1 Визначаємо кількість підведеної теплоти q_1 , кДж / кг

$$q_1 = q_{2-3} + q_{3-4} = 21,97 + 172,81 = 194,78.$$

4.5.2 Визначаємо кількість відведеної теплоти q_2 , кДж / кг

$$q_2 = q_{4-1} = -160,3.$$

4.5.3 Визначаємо корисну роботу циклу l , кДж / кг

$$l = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-1} = (-92,55) + 0 + 172,81 + (-45,78) = 34,48$$

4.5.4 Визначаємо термічний ККД газового циклу η_t

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = \frac{34,48}{194,78} = 0,177.$$

4.5.5 Визначаємо індикаторний тиск p_i , кПа

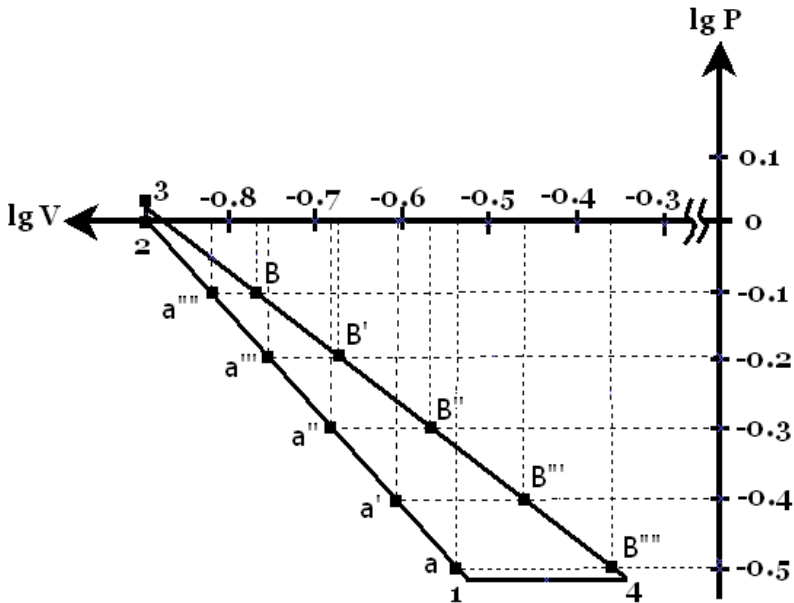
$$p_i = \frac{l}{(v_{\max} - v_{\min})} = \frac{34,48}{(0,453 - 0,127)} = \frac{34,48}{0,326} = 105,77.$$

4.6 Побудова газового циклу в координатах $lg p - lg v$

Як відомо, в логарифмічних координатах процеси 1 – 2; 2 – 3; 3 – 4; 4 – 1 будуть представляти собою прямі лінії. Значення основних термодинамічних параметрів p , v , що взяті із таблиці 4. 1 та їх логарифмів, представлені в таблиці 4. 3, а газовий цикл в координатах $lg p - lg v$ представлений на рисунку 4.2.

Таблиця 4.3- Значення параметрів стану в координатах $\lg p - \lg v$

	т. 1	т. 2	т. 3	т. 4
p , МПа	0,30	1,0	1,07	0,30
$\lg p$	- 0,523	0,0	0,0294	- 0,523
v , м ³ /кг	0,30	0,127	0,127	0,453
$\lg v$	- 0,523	- 0,896	- 0,896	- 0,344

Рисунок 4.2- Термодинамічний цикл в координатах $\lg p - \lg v$

4.7 Побудова газового циклу в координатах $p - v$

З метою здобуття найбільш коректної форми кривих термодинамічних процесів газового циклу в координатах $p - v$, розіб'ємо процеси 1–2; 2–3; 3–4; 4–1 (рис. 4.2 і рис. 4.3) на довільну кількість проміжних точок ($a, a', a'', a''', a''', c, c', B, B', B'', B''', B''', v, v', v'', v''', v''', v''''$).

Для цих проміжних крапок відповідні значення абсолютного тиску і питомих об'ємів, отримуємо потенціюванням їх значень для кожного із процесів.

При цьому значення проміжних точок, довільно вибираємо на координатах $lg p - lg v$ (рис. 4. 2) і $p - v$ (рис. 4. 3).

За результатами значень з таблиць 4. 4 і 4. 5 будемо p, v - діаграму газового циклу, що представлена на рисунку 4. 3 (для найбільшої точності подальших розрахунків доцільно рисунок 4. 3 зробити на міліметровому папері).

Таблиця 4.4- Значення проміжних точок процесу 1-2

Процес 1 - 2	т.1	т. а	т. а'	т. а''	т. а'''	т. а''''	т. 2
$lg p$	- 0,523	- 0,50	- 0,40	- 0,30	- 0,20	- 0,10	0,0
p , МПа	0,30	0,3162	0,3981	0,5012	0,6310	0,7943	1,0
$lg v$	- 0,523	- 0,539	- 0,611	- 0,682	- 0,754	- 0,824	- 0,896
v , м ³ /кг	0,30	0,289	0,245	0,208	0,176	0,150	0,127

Таблиця 4.5- Значення проміжних точок процесу 3-4

Процес 3 - 4	т. 3	т. в	т. в'	т. в''	т. в'''	т. в''''	т. 4
$lg p$	0,029	- 0,10	- 0,20	- 0,30	- 0,40	- 0,50	- 0,523
p , МПа	1,07	0,7943	0,6310	0,5012	0,3981	0,3162	0,30
$lg v$	- 0,896	- 0,767	- 0,668	- 0,567	- 0,467	- 0,367	- 0,344
v , м ³ /кг	0,127	0,171	0,215	0,271	0,341	0,430	0,453

$$T_c = T_2 \cdot \frac{p_c}{p_2} = 442,4 \cdot \frac{1,03}{1,0} = 455,7;$$

$$T_{c'} = T_2 \cdot \frac{p_{c'}}{p_2} = 442,4 \cdot \frac{1,05}{1,0} = 464,5.$$

Визначаємо зміни ентропії між т. 2 і т. 3 для проміжних точок, кДж / (кг · К):

$$\Delta S_{2-c} = c_v \cdot \ln \left(\frac{T_c}{T_2} \right) = 0,718 \cdot \ln \left(\frac{455,7}{442,4} \right) = + 0,021;$$

$$\Delta S_{2-c'} = c_v \cdot \ln \left(\frac{T_{c'}}{T_2} \right) = 0,718 \cdot \ln \left(\frac{464,5}{442,4} \right) = + 0,035.$$

Таблиця 4.6- Значення проміжних точок 2, 3, с, с'

	p , МПа	$lg p$	v , м ³ / кг	$lg v$	T , К	ΔS , кДж / (кг · К)
т. 2	1,00	-- 0,523- 0,523-0, 0,0	0,127	- 0,896	442,4	
т. с	1,03	0,013	0,127	- 0,896	455,7	$\Delta S_{1-B} = + 0,080$ $\Delta S_{1-C} = + 0,021$
т. с'	1,05	0,021	0,127	- 0,896	464,5	$\Delta S_{1-C'} = + 0,035$
т. 3	1,07	0,029	0,127	- 0,896	473,0	$\Delta S_{1-4} = + 0,048$

4.8.2 Процес 4–1 (ізобарний, $n = 0$)

Визначаємо значення температур, К:

$$T_B = T_4 \cdot \frac{v_B}{v_4} = 473,0 \cdot \frac{0,425}{0,453} = 443,8 ;$$

$$T_{B'} = T_4 \cdot \frac{v_{B'}}{v_4} = 473,0 \cdot \frac{0,400}{0,453} = 417,7 ;$$

$$T_{B''} = T_4 \cdot \frac{v_{B''}}{v_4} = 473,0 \cdot \frac{0,375}{0,453} = 391,6 ;$$

$$T_{B'''} = T_4 \cdot \frac{v_{B'''}}{v_4} = 473,0 \cdot \frac{0,350}{0,453} = 365,5 ;$$

$$T_{B''''} = T_4 \cdot \frac{v_{B''''}}{v_4} = 473,0 \cdot \frac{0,325}{0,453} = 339,4 .$$

Визначаємо зміни ентропії між т. 4 і т. 1 для проміжних точок, кДж / (кг · К):

$$\Delta S_{4-B} = c_p \cdot \ln\left(\frac{T_B}{T_4}\right) = 1,005 \cdot \ln\left(\frac{443,8}{473,0}\right) = - 0,064 ;$$

$$\Delta S_{4-B'} = c_p \cdot \ln\left(\frac{T_{B'}}{T_4}\right) = 1,005 \cdot \ln\left(\frac{417,7}{473,0}\right) = - 0,125 ;$$

$$\Delta S_{4-B''} = c_p \cdot \ln\left(\frac{T_{B''}}{T_4}\right) = 1,005 \cdot \ln\left(\frac{391,6}{473,0}\right) = - 0,190 ;$$

$$\Delta S_{4-B'''} = c_p \cdot \ln \left(\frac{T_{B'''} }{T_4} \right) = 1,005 \cdot \ln \left(\frac{365,5}{473,0} \right) = - 0,259 ;$$

$$\Delta S_{4-B''''} = c_p \cdot \ln \left(\frac{T_{B''''} }{T_4} \right) = 1,005 \cdot \ln \left(\frac{339,4}{473,0} \right) = - 0,334 .$$

За результатами розрахунків будемо газований цикл в координатах $T - S$, який представлений на рисунку 4. 4 (для найбільшої точності подальших розрахунків доцільно рисунок 4. 4 зробити на міліметровому папері).

Таблиця 4.7 - Значення проміжних точок 4,1, Б Б' Б'' Б''' Б''''

	p , МПа	$lg p$	v , $\text{м}^3 / \text{кг}$	$lg v$	T , К	ΔS , кДж / (кг · К)
Т. 4	0,30	0,523- 0,523- 0, - 0,523	0,453	- 0,344	473,0	
Т. Б	0,30	- 0,523	0,425	- 0,372	443,8	$\Delta S_{1-B} = + 0,080$ $\Delta S_{4-B} = - 0,064$
Т. Б'	0,30	- 0,523	0,400	- 0,398	417,7	$\Delta S_{4-B'} = - 0,125$
Т. Б''	0,30	- 0,523	0,375	- 0,426	391,6	$\Delta S_{4-B''} = - 0,190$
Т. Б'''	0,30	- 0,523	0,350	- 0,456	365,5	$\Delta S_{4-B'''} = - 0,259$
Т. Б''''	0,30	- 0,523	0,325	- 0,488	339,4	$\Delta S_{4-B''''} = - 0,334$
Т. 1	0,30	- 0,523	0,300	- 0,523	313,5	$\Delta S_{4-1} = - 0,413$

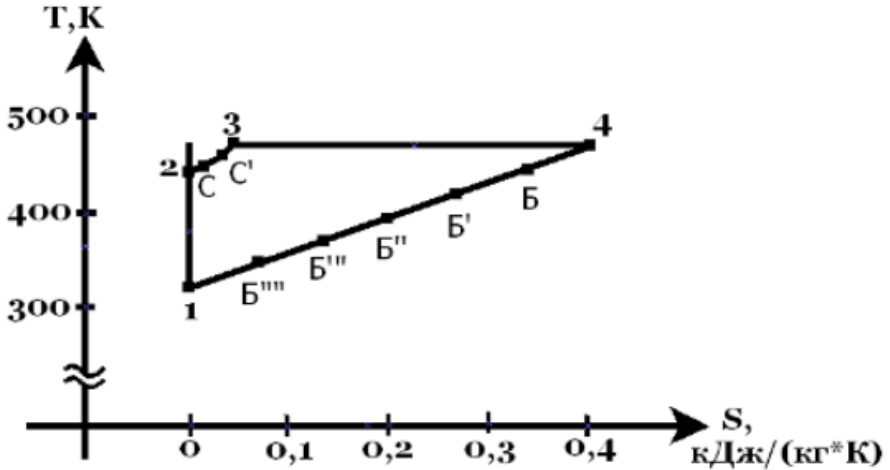


Рисунок 4. 4 - Термодинамічний цикл в координатах $T - S$

4.9 Визначення величин основних термодинамічних параметрів графічним способом

Використовуючи p, v - і T, S - діаграми, графічно визначаємо величини, що визначені в розрахунках п. 4. 2 і п. 4. 3 і представлені в таблиці 4. 2 і порівнюємо результати графічного і аналітичного розрахунків.

Роботи розширення, стиску і наявної роботи знайдемо з графіків процесів, що представлені на рисунку 4. 3. При цьому треба мати на увазі, що знак роботи δl визначається з вираження $\delta l = p \cdot dv$, оскільки абсолютний тиск p - величина позитивна, то знак δl визначається знаком dv .

Якщо об'єм зменшується, то dv має знак мінус, тобто робота здійснюється над робочим тілом і робота δl також має знак мінус і навпаки.

4.9.1 Процес 1 - 2 адіабатний

Робота розширення

Площа, що обмежена процесом 1- 2, ординатами 2 - 2' і 1 - 1', а також відсіченою частиною вісі абсцис 1' - 2' еквівалентна роботі розширення.

Після проведення додаткової лінії 1 - N - 2 на діаграмі циклу (рис.4.3), ця площа може бути представлена як різниця площ прямокутної трапеції (1-N - 2 - 2' - 1' - 1) і сегменту площі (1 - M - 2 - N - 1).

Тому буде справедливим наступний запис для площі еквівалентної роботи розширення в процесі 1 - 2

$$F_{l_{1-2}} = n_l (1 - N - 2 - 2' - 1' - 1) - n_l (1 - M - 2 - N - 1) = \left[\frac{(1-1') + (2-2')}{2} \right] \times \\ \times (1' - 2') - \frac{2}{3} \cdot (1 - N - 2) \cdot (M - N) = \left(\frac{30+100}{2} \right) \cdot 34,5 - \frac{2}{3} \cdot 78,5 \cdot 7,5 = 1850,0 \text{ мм}^2$$

де $F_{l_{1-2}}$ - площа на p, v діаграмі еквівалентна роботі розширення l_{1-2} в процесі 1 - 2, мм^2 ; (1 - 1'); (2 - 2'); (1 - N - 2); (M - N) - довжини відрізків на p, v - діаграмі (рис. 4.3) для процесу 1 - 2, мм.

Масштаб p, v - діаграми визначаємо наступним чином:

а) 10 мм ординати діаграми відповідають 0,1 МПа тиску, 1 мм - відповідно 0,01 МПа = 10000 Н / м^2 ;

б) 20 мм абсциси діаграми відповідають 0,1 $\text{м}^3/\text{кг}$ питомого об'єму, 1 мм- відповідно 0,005 $\text{м}^3/\text{кг}$.

Таким чином, маємо

$$M_{p,v} = p \cdot v = 10000 \text{ Н / м}^2 \cdot 0,005 \text{ м}^3 / \text{кг} = 50 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{мм}^2),$$

тобто

$$1 \text{ мм}^2 = 50 \text{ Дж / кг}.$$

$$\text{Отже } l_{1-2} = F_{l_{1-2}} \times M_{p,v} = 1850,0 \times 50 = -92,5 \text{ кДж / кг}.$$

Знак мінус, тому що процес 1 - 2 є процесом стискання, отже знак dv негативний.

Наявна робота

$$F_{l_{(1-2)}} = n_l (1 - N - 2 - 7v - 6p - 1) - n_l (1 - M - 2 - N - 1) = \left[\frac{(7v - 2) + (6p - 1)}{2} \right] \times \\ \times (7v - 6p) - \frac{2}{3} \cdot (1 - N - 2) \cdot (M - N) = \left(\frac{25,5 + 60}{2} \right) \cdot 70 - \frac{2}{3} \cdot 78,5 \cdot 7,5 = 2600,0 \text{ мм}^2$$

Звідки

$$l_{i(1-2)} = F_{l_{i(1-2)}} \times M_{p,v} = 2600,0 \times 50 = -130,0 \text{ кДж / кг.}$$

4.9.2 Процес 2 - 3 ізохорний

$$\text{Робота розширення} \quad l_{2-3} = 0; \quad F_{l_{2-3}} = 0.$$

Наявна робота

$$F_{li(2-3)} = n_l (8v - 3 - 2 - 7v) = (7v - 2) \cdot (2 - 3) = 25,5 \cdot 7 = 178,5 \text{ мм}^2$$

$$\text{Звідки} \quad l_{i(2-3)} = F_{l_{i(2-3)}} \cdot M_{p,v} = 178,5 \cdot 50 = -8,93 \text{ кДж / кг.}$$

4.9.3 Процес 3 - 4 ізотермічний

Робота розширення

$$F_{l_{3-4}} = n_l (3 - \Gamma - 4 - 4' - 2' - 3) - n_l (3 - \Gamma - 4 - \mathcal{D} - 3) = \left[\frac{(4 - 4') + (2 - 2')}{2} \right] \times \\ \times (2' - 4') - \frac{2}{3} \cdot (4 - \Gamma - 3) \cdot (\Gamma - \mathcal{D}) = \left(\frac{30 + 107}{2} \right) \cdot 65 - \frac{2}{3} \cdot 101 \cdot 15 = 3442,5 \text{ мм}^2$$

Звідки

$$l_{(3-4)} = F_{l_{(3-4)}} \cdot M_{p,v} = 3442,5 \cdot 50 = 172,13 \text{ кДж / кг.}$$

Так як процес 3 - 4 являється процесом розширення, то dv має знак плюс, отже і l_{3-4} також має знак плюс.

Наявна робота .

$$F_{l_{(3-4)}} = n l (3 - \Gamma - 4 - 6p - 8v - 3) - n l (3 - \Gamma - 4 - \mathcal{D} - 3) = \left[\frac{(6p - 4) + (8v - 3)}{2} \right] \times \\ \times (6p - 8v) - \frac{2}{3} \cdot (3 - \Gamma - 4) \cdot (\Gamma - \mathcal{D}) = \left(\frac{90,5 + 25,5}{2} \right) \cdot 77 - \frac{2}{3} \cdot 101 \cdot 15 = 3456,0 \text{ мм}^2$$

Звідки

$$l_{i(3-4)} = F_{l_{(3-4)}} \cdot M_{p,v} = 3456,0 \cdot 50 = 172,8 \text{ кДж/кг.}$$

4.9.4 Процес 4 – 1 ізобарний

Робота розширення

$$F_{l_{4-1}} = n l (1 - 4 - 4' - 1' - 1) - n l (1' - 4') \cdot (1' - 1) = 30,5 \cdot 30,0 = 915 \text{ мм}^2.$$

$$\text{Отже } l_{(4-1)} = F_{l_{(4-1)}} \cdot M_{p,v} = 915,0 \cdot 50 = -45,75 \text{ кДж / кг.}$$

Так як процес 4 – 1 - стискання, то dv має знак мінус, отже і l_{4-1} та-кож має знак мінус.

$$\text{Наявна робота } l_{i(4-1)} = 0, \text{ тому що } F_{l_{i(4-1)}} = 0.$$

Розраховані значення l і l_i графічним способом зведемо у таблицю 4.2 в знаменники відповідних колонок.

4.10 Для кожного процесу, що становить цикл, дамо схему в $T-S$ координатах і графічним методом визначимо Δu , Δh , q , n .

При графічному дослідженні процесів в $T-S$ діаграмі для простоти їх приймають за прямі лінії.

Крім того необхідно мати на увазі наступне:

1. Знак теплоти визначається з вираження $\partial q = T \cdot dS$. Так як абсолютна температура T - величина завжди позитивна, то знак ∂q визначається знаком dS . Якщо dS має знак плюс і ∂q також буде мати знак плюс і навпаки.

2. Знак Δu визначається з вираження $du = c_v \cdot dT$. Так як c_v - величина позитивна, то знак Δu визначається знаком dT .

Температура зменшується, значить dT має знак мінус і Δu також має знак мінус і навпаки.

3. Знак Δh визначається з вираження $dh = c_p \cdot dT$. Так як c_p - величина позитивна, то знак Δh визначається знаком dT . Температура зменшується, значить dT має знак мінус і Δh також має знак мінус і навпаки.

4.10.1 Процес 1 -2 (адіабатний)

При визначені Δu , Δh і n процесу 1 – 2 необхідно додатково нанес-ти процеси ізобарний і ізохорний.

Наступним чином визначимо зміну ентропії для ізобарного (2 - 2_p) та ізохорного (2 – 2_v) процесів в інтервалі зміни температур адіабатного процесу 1 – 2, кДж / (кг · К):

$$\Delta S_{v(2-2_v)} = c_v \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = 0,718 \cdot \ln\left(\frac{442,4}{313,5}\right) = 0,247 \quad ;$$

$$\Delta S_{p(2-2_p)} = c_p \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = 1,005 \cdot \ln\left(\frac{442,5}{313,6}\right) = 0,346 \quad .$$

$T - S$ – діаграма для розрахунку Δu , Δh і n в процесі 1 – 2 представлені на рисунку 4.5.

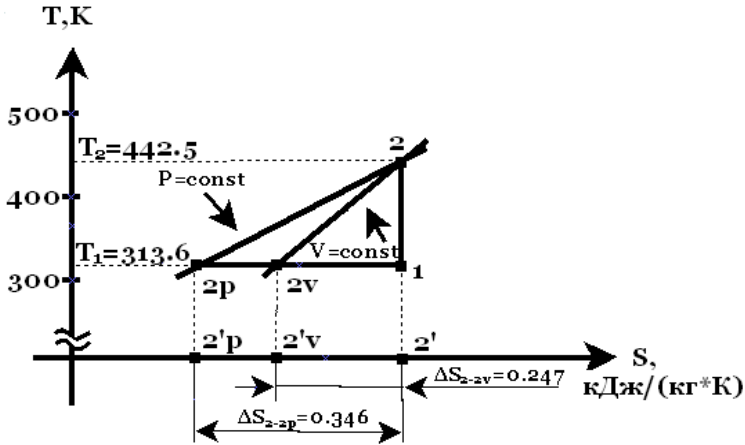


Рисунок 4.5 – Схема розрахунку процесу 1 – 2 в $T-S$ координатах

Як видно з рисунку 4.5 процес 1 – 2 є адіабатним. Площа під ізохорою 2 – 2_v еквівалентна зміні внутрішньої енергії в процесі 1 – 2.

Таким чином, маємо

$$\begin{aligned} \Delta u_{1-2} &= n l (2 - 2_v - 2'_v - 2' - 2) = \left[\frac{(2'_v - 2_v) + (2' - 2)}{2} \right] \cdot (2'_v - 2') = \Delta S_{v(2-2_v)} \cdot \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right) = \\ &= 0,247 \cdot \left(\frac{313,5 + 442,4}{2} \right) = 93,35 \text{ кДж / кг} \end{aligned}$$

Площа під ізобарою 2 – 2_p еквівалентна зміні ентальпії в процесі 1 – 2.

Таким чином, маємо

$$\Delta h_{1-2} = n l (2 - 2_p - 2'_p - 2' - 2) = \left[\frac{(2'_p - 2_p) + (2' - 2)}{2} \right] \cdot (2'_p - 2') = \Delta S_{p(2-2_p)} \cdot \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right) =$$

$$= 0,346 \cdot \left(\frac{313,5 + 442,4}{2} \right) = 130,77 \text{ кДж / кг}$$

З рисунку 4.5 слідує, що $q_{1-2} = 0$.

Показник політропи n графічно по $T - S$ – діаграмі може бути визначеним у такий спосіб.

З початкової точки процесу т. 1 (рис. 4.5) проводиться ізотерма, а з кінцевої т. 2 – ізобара і ізохора до перетинання із проведеною ізотермою у т. 2_p і т. 2_v .

Відношення відрізків $1 - 2_p$ до $1 - 2_v$ дає чисельне значення n .

Дійсно, відрізки $1 - 2_p$ і $1 - 2_v$ можна розглядати, як зміну ентропії в ізотермічних процесах $1 - 2_p$ і $1 - 2_v$.

Показник політропи n позитивний, якщо т. 2_p і т. 2_v розташовуються по одну сторону від т. 1. Причому, якщо т. 2_p і т. 2_v розташовуються ліворуч від т. 1, то $n > 1$, а якщо праворуч, то $0 < n < 1$. Якщо ж т. 1 розташовується між т. 2_p і т. 2_v , то $n < 0$.

Це легко отримати з вираження (4.1).

Як відомо, теплота, яка підведена в ізобарному процесі $2 - 2_p$, може бути розрахована по формулі $q_{2-2_p} = c_p \cdot (T_2 - T_1)$, але у свою чергу q_{2-2_p} можна виразити як $q_{2-2_p} = \Delta S_{2-2_p} \cdot (T_2 - T_1)$. Прирівнюючи ліві частини q_{2-2_p} цих рівнянь, отримаємо $c_p \cdot (T_2 - T_1) = \Delta S_{2-2_p} \cdot (T_2 - T_1)$. Звідки видно, що $c_p = \Delta S_{2-2_p}$.

Аналогічним чином отримаємо, що $c_v = \Delta S_{2-2_v}$ і для ізохорного процесу $2 - 2_v$.

Враховуючи, що в адіабатному процесі $c_{ad} = 0$, підставивши відповідні значення c_v і c_p в рівняння (4.1), отримаємо

$$n = \frac{c_{ad} - c_p}{c_{ad} - c_v} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{\Delta S_{2-2_p}}{\Delta S_{2-2_v}} = \frac{0,346}{0,247} = 1,40.$$

4.10.2 Процес ізохорний (2 – 3)

Для ізохорного процесу 2 – 3, як відомо, площа під ізохорою 2 – 3 чисельно дорівнює теплоті процесу 2 – 3 (q_{2-3}) і одночасно зміні внутрішньої енергії (Δu_{2-3}) цього ж процесу.

При визначенні Δu , Δh і n процесу 2 – 3 необхідно додатково нанести процеси ізобарний і ізохорний.

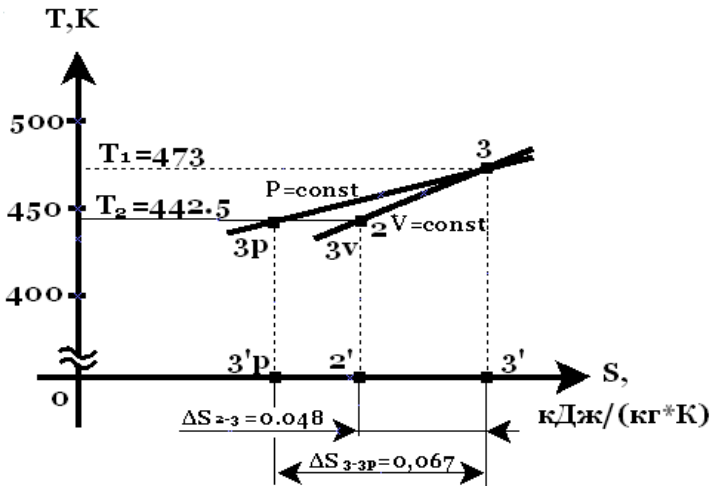


Рисунок 4.6 – Схема розрахунку процесу 2 – 3 в $T-S$ координатах

Наступним чином визначимо зміну ентропії для ізобарного (3 – 3_p) та ізохорного (3 – 3_v) процесів в інтервалі зміни температур ізохорного процесу 2 – 3, кДж / (кг·К)

$$\Delta S_{2-3} = \Delta S_{v(3-3_v)} \text{ з таблиці 4.2 дорівнює } 0,048 ;$$

$$\Delta S_{p(3-3_p)} = c_p \cdot \ln \left(\frac{T_3}{T_2} \right) = 1,005 \cdot \ln \left(\frac{473,0}{442,4} \right) = 0,067 .$$

$T-S$ – діаграма для розрахунку Δu , Δh і n в процесі 2 – 3 представлені на рисунку 4.6. Як видно з рисунку 4.6 процес 2 – 3 є

ізохорним. Площа під ізохорою 2 – 3_v еквівалентна зміні внутрішньої енергії в процесі 2 – 3.

Таким чином, маємо

$$\Delta u_{2-3} = n_l (3 - 3_v - 2' - 3' - 3) = \left[\frac{(2' - 3_v) + (3' - 3)}{2} \right] \cdot (2' - 3') = \Delta S_{v(3-3_v)} \cdot \left(\frac{T_2 + T_3}{2} \right) =$$

$$= 0,048 \cdot \left(\frac{442,4 + 473,0}{2} \right) = 21,97 \text{ кДж / кг}$$

Площа під ізобарою 3 – 3_p еквівалентна зміні ентальпії в процесі 2 – 3. Таким чином, маємо

$$\Delta h_{2-3} = n_l (3 - 3_p - 3'_p - 3' - 3) = \left[\frac{(3_p - 3'_p) + (3' - 3)}{2} \right] \cdot (3'_p - 3') = \Delta S_{p(2-2_p)} \cdot \left(\frac{T_2 + T_3}{2} \right) =$$

$$= 0,067 \cdot \left(\frac{442,4 + 473,0}{2} \right) = 30,67 \text{ кДж / кг}$$

Так як процес 2 – 3 є ізохорним, то $q_{2-3} = \Delta u_{2-3} = 21,97$
кДж / кг.

Показник політропи n для ізохорного процесу 2 – 3 визначаємо в такий спосіб

$$n = \frac{c_v - c_p}{c_v - c_v} = \frac{\Delta S_{v(3-3_v)} - \Delta S_{p(3-3_p)}}{\Delta S_{v(3-3_v)} - \Delta S_{v(3-3_v)}} = \frac{0,048 - 0,067}{0,0} = \pm \infty.$$

Отже, в $T - S$ діаграмі графічне визначення показника політропи n змісту не має, тому що в знаменнику дробі нуль.

4.10.3 Процес ізотермічний (3 – 4)

Як відомо в ізотермічному процесі $\Delta u = 0$ і $\Delta h = 0$.

Таким чином $\Delta u_{3-4} = 0,0$; $\Delta h_{3-4} = 0,0$.

ΔS_{3-4} беремо з таблиці 4.2 $\Delta S_{3-4} = 0,365 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)}$;

$$q_{3-4} = n l (3 - 4 - 4' - 3' - 3) = (3' - 3) \cdot (3' - 4') = \Delta S_{3-4} \cdot T_3 =$$

$$= 0,365 \cdot 473 = 172,65 \text{ кДж / кг}$$

$T - S$ – діаграма для розрахунку Δu , Δh і n в процесі 3 – 4 представлені на рисунку 4.7.

Показник політропи n для ізотермічного процесу 3-4 визначимо таким чином.

Оскільки $T_3 = T_4$, то зміна ентропії для ізохорного і ізобарного процесів в цьому інтервалі температур дорівнюватиме нулю. Це витікає з виразів

$$\Delta S_{v(3-4)} = c_v \cdot \ln \left(\frac{T_4}{T_3} \right) = 0,718 \cdot \ln \left(\frac{473,0}{473,0} \right) = 0;$$

$$\Delta S_{p(3-4)} = c_p \cdot \ln \left(\frac{T_4}{T_3} \right) = 1,005 \cdot \ln \left(\frac{473,0}{473,0} \right) = 0.$$

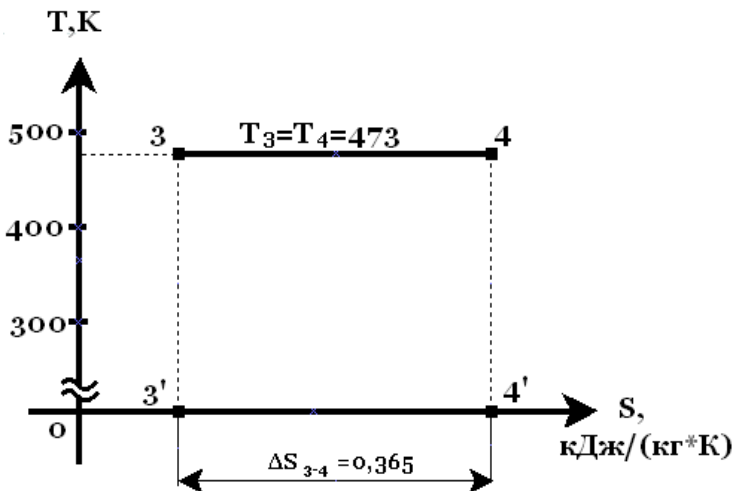


Рисунок 4.7 – Схема розрахунку процесу 3 – 4 в $T - S$ координатах

Тому провести ізохору і ізобару для ізотермічного процесу 3 – 4 неможливо. Отже, підставивши відповідно значення $c_{uz} = \Delta S_{3-4}$; $c_p = \Delta S_{4p}$; $c_v = \Delta S_{4v}$ у формулу (4.1), маємо

$$n = \frac{c_{uz} - c_p}{c_{uz} - c_v} = \frac{\Delta S_{3-4} - \Delta S_{4p}}{\Delta S_{3-4} - \Delta S_{4v}} = \frac{\Delta S_{3-4}}{\Delta S_{3-4}} = 1.$$

4.10.4 Процес ізобарний (4 – 1)

Для ізобарного процесу, як відомо, вся підведена теплота витрачається на зміну ентальпії. Отже під ізобарою 4 – 1 площа (4 – 1 - 1' - 4' – 4) еквівалентна теплоті процесу 4 – 1 чи зміні ентальпії процесу 4 – 1.

$$\begin{aligned} q_{4-1} &= \Delta h_{4-1} = n l (4 - 1 - 1' - 4' - 4) = \left[\frac{(1 - 1') + (4 - 4')}{2} \right] \cdot (1' - 4') = \\ &= \Delta S_{4-1} \cdot \frac{T_4 + T_1}{2} = -0,413 \cdot \left(\frac{473,0 + 313,5}{2} \right) = -162,4 \text{ кДж / кг} \end{aligned}$$

де з таблиці 4. 2 $\Delta S_{4-1} = -0,413 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)}$.

Під ізохорою 4 – 1_v площа (4 - 1_v - 1'_v - 4' - 4) еквівалентна зміні внутрішньої енергії процесу 4 – 1.

$T - S$ – діаграма для розрахунку Δu , Δh і n в процесі 4 – 1 представлені на рисунку 4.8.

$$\begin{aligned} \Delta u_{4-1} &= n l (4 - 1_v - 1'_v - 4' - 4) = \left[\frac{(1'_v - 1_v) + (4' - 4)}{2} \right] \cdot (1'_v - 4'_v) = \Delta S_{4-1} \cdot \frac{T_1 + T_4}{2} = \\ &= -0,295 \cdot \left(\frac{313,5 + 473,0}{2} \right) = -116,02 \text{ кДж / кг} \end{aligned}$$

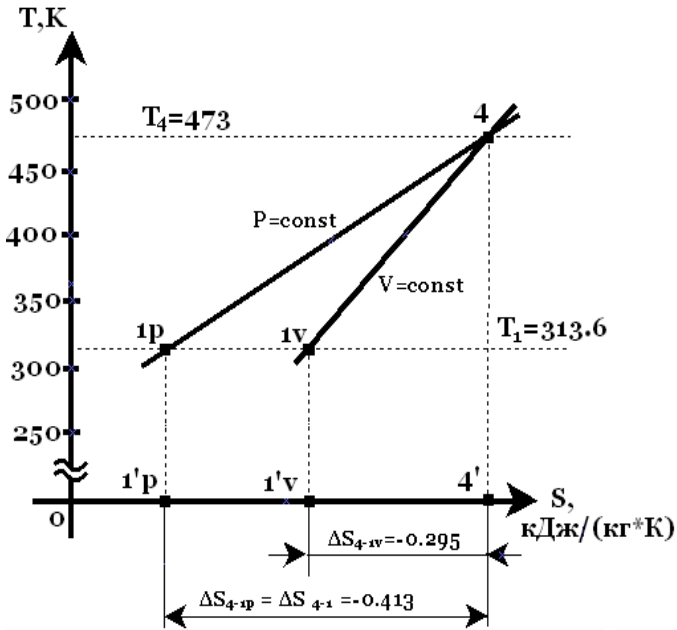


Рисунок 4.8 – Схема розрахунку процесу 4 – 1 в $T-S$ координатах

Показник політропи n для ізобарного процесу 4 – 1 знайдемо в такий спосіб

$$n = \frac{c_p - c_p}{c_p - c_v} = \frac{\Delta S_{4-1p} - \Delta S_{4-1p}}{\Delta S_{4-1p} - \Delta S_{4-1v}} = \frac{0}{\Delta S_{4-1p} - \Delta S_{4-1v}} = 0.$$

Отже в $T-S$ діаграмі графічне визначення показника політропи n змісту не має, тому що в чисельнику дробі 0.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кириллин В.А, Сычов В.В. Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 416 с.
2. Вукалович М.П.,Новиков И.И. Термодинамика. Москва: Машиностроение,1972. 672 с.
3. Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка. Київ: Техніка, 2001. 320 с.
4. Малишев В.В, Кретов В.В., Гладка Т.М. Технічна термодинаміка та теплопередача. Київ: Університет «Україна», 2015. 258 с.
5. Вяла А., Благовістна В., Меняйлов С. Молекулярна фізика й термодинаміка. Київ: НАУ-друк, 2010. 192 с.
6. Воловік П.М. Фізика для університетів. Київ:Перун,2005. 864с.
7. Константінов С.М., Панов Є.М. Теоретичні основи теплотехніки. Київ: «Золоті Ворота», 2012. 592 с.
8. Чепурний М.М., Ткаченко С.Й. Основи технічної термодинаміки. Вінниця: «Поділля-2000», 2004. 352 с.
9. Константінов С.М. Технічна термодинаміка. Київ: «Політехніка» НТУУ «КПІ», 2001. 368 с.
10. Буляндра О. Ф, Драганов Б. Х. , Федорів В. Г. і ін. Теплотехніка. Київ:Вища школа, 1998. 334с.
11. Драганов Б.Х.. Теплотехніка. Київ : ІНКОС, 2005. 504 с.
12. Беляев Н.М. Термодинамика. Київ: Вища школа, 1987. 344 с.
13. Юдаев Б.Н. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче. Москва: Высшая школа, 1967. 344 с.
14. Крутов В.И. Задачник по технической термодинамике и теории теплообмена. Москва: Высшая школа, 1986. 383 с.
15. Андрианова Т.Н. Сборник задач по технической термодинамике. Москва:Высшая школа, 1972. 240 с.
16. Дрыжаков Е.В., ИсаевС.И., Кожин И.А. и др. Техническая термодинамика /под ред. В.И. Крутова . Москва: Высшая школа, 1981.439 с.
17. Дубровська В.В., Шкляр В.І. Термодинаміка та теплообмін: навч. посіб. Київ: НТУУ«КПІ», Вид-во «Політехніка», 2016. 152 с.

Додаток А

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА
ПО ТЕХНІЧНІЙ ТЕРМОДИНАМІЦІ

Тема: РОЗРАХУНОК ГАЗОВОГО ЦИКЛУ

Варіант № _____

Завдання видане
202__ р.

«__» _____

Строк здачі виконаного завдання
202__р.

«__» _____

Завдання захищене
202__р.

«__» _____

Оцінка _____

Виконав ст. гр.

(підпис)

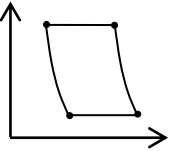
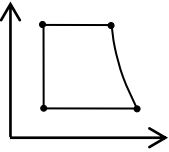
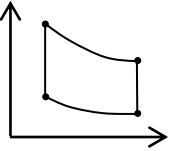
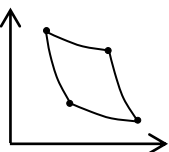
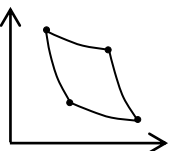
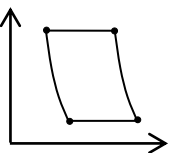
Прийняв (вчене звання, ступінь)

(підпис)

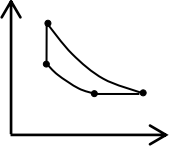
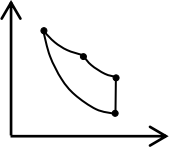
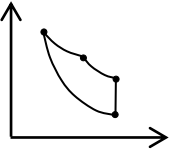
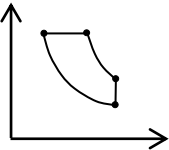
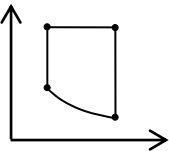
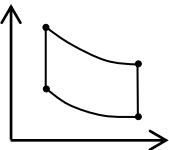
Запоріжжя, _____р

Додаток Б

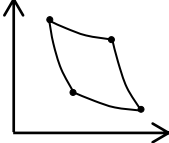
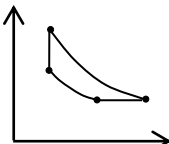
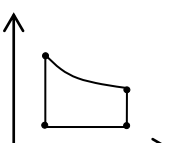
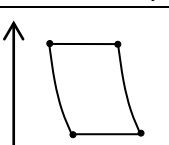
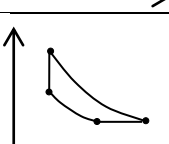
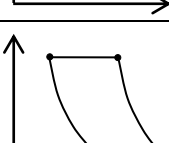
Таблиця Б.1 – Дані до завдання

№ вар.	Схема циклу	Задані параметри у основних точках циклу: p , МПа; v , м ³ /кг; T , К				Тип процесу і показник політропи			
						1–2	2–3	3–4	4–1
1		$p_1 = 0,4$	$p_2 = 0,9$	$v_2 = 0,09$	$v_3 = 0,16$	T	p	S	p
2		$p_1 = 0,15$	$v_1 = 1,5$	$\varepsilon = v_1 / v_2 = 6,5$	$\kappa = 0,4$	p	v	p	$n = 1,26$
3		$p_1 = 0,09$	$T_1 = 283$	$v_2 = 0,5$	$T_3 = 503$	T	v	S	v
4		$p_1 = 1,2$	$v_2 = 0,3$	$p_3 = 0,15$	$T_4 = 298$	T	$n = 1,3$	T	$n = 1,3$
5		$p_1 = 2,0$	$v_2 = 0,15$	$p_3 = 0,10$	$T_4 = 243$	T	S	T	S
6		$p_1 = 0,2$	$v_1 = 0,4$	$p_2 = 1,0$	$T_3 = 1473$	$n = 1,25$	p	T	p

Продовження таблиці Б.1

№ вар.	Схема циклу	Задані параметри у основних точках циклу: p , МПа; v , м ³ /кг; T , К				Тип процесу і показник політропи			
						1-2	2-3	3-4	4-1
		$p_1 = 0,15$	$v_1 = 0,6$	$T_2 = 423$	$p_3 = 1,8$	$n = 1,3$	v	$n = 1,3$	p
8		$p_1 = 0,19$	$v_1 = 0,6$	$T_3 = 593$	$p_3 = 0,8$	$n = 1,2$	T	$n = 1,2$	v
9		$p_1 = 4,0$	$T_1 = 583$	$p_2 = 2,0$	$v_3 = 0,2$	T	S	v	S
10		$p_1 = 0,4$	$v_1 = 0,3$	$p_2 = 2,0$	$T_3 = 1283$	S	p	S	v
11		$v_1 = 0,6$	$T_1 = 313$	$v_2 = 0,26$	$p_3 = 0,8$	$n = 1,23$	v	p	v
12		$p_1 = 0,09$	$T_1 = 363$	$\varepsilon = v_1 / v_2 = 6,0$	$q_{2-3} = 850$ кДж / кг	S	v	S	v

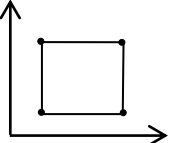
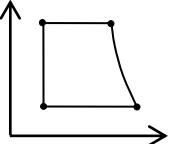
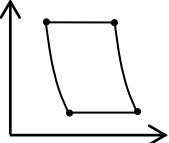
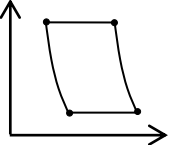
Продовження таблиці Б.1

№ вар.	Схема циклу	Задані параметри у основних точках циклу: p , МПа; v , м ³ /кг; T , К				Тип процесу і показник політропи			
						1-2	2-3	3-4	4-1
13		$p_1 = 5,8$				$T_1 = 650$	$v_2 = 0,14$	$T_3 = 420$	T
14		$p_1 = 0,4$	$v_1 = 0,4$	$p_2 = 0,9$	$T_3 = 723$	S	v	T	p
15		$p_1 = 0,14$	$T_1 = 290$	$v_2 = 0,15$	$p_3 = 1,0$	P	v	$n = 1,31$	v
16		$p_1 = 0,18$	$v_1 = 0,6$	$p_2 = 3,0$	$T_3 = 893$	$n = 1,2$	p	$n = 1,2$	p
17		$p_1 = 0,16$	$v_1 = 0,8$	$v_2 = 0,3$	$T_3 = 773$	S	v	T	p
18		$p_1 = 0,09$	$T_1 = 373$	$p_2 = 4,0$	$q_{2-3} = 950$ кДж / кг	S	p	S	p

Продовження таблиці Б.1

№ вар.	Схема циклу	Задані параметри у основних точках циклу: p , МПа; v , м ³ /кг; T , К				Тип процесу і показник політропи			
						1–2	2–3	3–4	4–1
19		$p_1 = 0,9$				$v_1 = 0,2$	$p_2 = 2,0$	$p_3 = 1,5$	S
20		$p_1 = 0,13$				$T_1 = 358$	$\varepsilon = v_1 / v_2 = 4,0$	$q_{2-3} = 1000$ кДж / кг	S
21		$p_1 = 1,5$	$T_1 = 583$	$T_3 = 288$	$\rho = v_3 / v_2 = 3,0$	T	S	T	S
22		$p_1 = 0,2$	$T_1 = 293$	$p_2 = 2,6$	$T_3 = 1073$	S	p	T	p
23		$p_1 = 0,16$	$T_1 = 333$	$p_2 = 1,6$	$T_3 = 1473$	T	p	S	v
24		$v_1 = 1,0$	$T_1 = 358$	$\varepsilon = v_1 / v_2 = 10,0$	$q_{2-3} = 900$ кДж / кг	S	p	T	v

Продовження таблиці Б.1

№ вар.	Схема циклу	Задані параметри у основних точках циклу: p , МПа; v , м ³ /кг; T , К				Тип процесу і показник політропи			
						1–2	2–3	3–4	4–1
25		$p_1 = 1,0$	$v_1 = 0,08$	$p_2 = 1,2$	$T_3 = 423$	v	p	v	p
26		$p_1 = 4,0$	$T_1 = 483$	$T_2 = 533$	$p_3 = 2,0$	p	$n = 1,2$	p	v
27		$p_1 = 0,1$	$v_1 = 0,9$	$T_2 = 500$	$v_3 = 0,5$	S	p	T	p
28		$p_1 = 0,15$	$T_1 = 223$	$p_3 = 0,55$	$T_3 = 483$	$n = 1,2$	p	$n = 1,2$	p

Типи процесів: $p \rightarrow p = \text{const}$ - ізобарний;

$v \rightarrow v = \text{const}$ - ізохорний;

$T \rightarrow T = \text{const}$ - ізотермічний;

$S \rightarrow \partial q = 0$ - адіабатний

Для політропних процесів задане значення показника політропи

n .

Додаток В

Таблиця В.1 – Теплоємність повітря по С.Л. Ривкіну

$t,$ °C	$T,$ К	$c_p,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$c_v,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$k = \frac{c_p}{c_v}$	$t,$ °C	$T,$ К	$c_p,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$c_v,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$k = \frac{c_p}{c_v}$
-50	223	1,013	0,726	1,395	140	413	1,013	0,726	1,395
-40	233	1,013	0,726	1,395	160	433	1,017	0,730	1,393
-30	243	1,013	0,726	1,395	180	453	1,022	0,735	1,390
-20	253	1,009	0,722	1,398	200	473	1,026	0,739	1,388
-10	263	1,009	0,722	1,398	250	523	1,038	0,751	1,382
0	273	1,005	0,718	1,400	300	573	1,047	0,760	1,378
10	283	1,005	0,718	1,400	350	623	1,059	0,772	1,372
20	293	1,005	0,718	1,400	400	673	1,068	0,781	1,367
30	303	1,005	0,718	1,400	500	773	1,093	0,806	1,356
40	313	1,005	0,718	1,400	600	873	1,114	0,827	1,347
50	323	1,005	0,718	1,400	700	973	1,135	0,848	1,338
60	333	1,005	0,718	1,400	800	1073	1,156	0,869	1,330
70	343	1,009	0,722	1,398	900	1173	1,172	0,885	1,324
80	353	1,009	0,722	1,398	1000	1273	1,185	0,898	1,320
90	363	1,009	0,722	1,398	1100	1373	1,198	0,911	1,315
100	373	1,009	0,722	1,398	1200	1473	1,210	0,923	1,311
120	393	1,009	0,722	1,398					

Додаток Г

Таблиця Г.1 – Розрахункові залежності для параметрів процесів циклу

ПОЛІТРОПНИЙ ПРОЦЕС	
$p \cdot v^n = \text{const}; \quad n \text{ ом } -\infty \text{ до } +\infty$	
Питома робота розширення процесу, l_n , кДж / кг	$l_n = \frac{1}{n-1} \cdot (p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2) = \frac{R}{n-1} \cdot (T_1 - T_2) =$ $= \frac{p_1 \cdot v_1}{n-1} \cdot \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) = \frac{p_1 \cdot v_1}{n-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}\right] =$ $= \frac{p_1 \cdot v_1}{n-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right] = \frac{R \cdot T_1}{n-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}\right] =$ $= \frac{R \cdot T_1}{n-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]$
Питома теплота процесу, q_n , кДж / кг	$q_n = c_n \cdot (T_2 - T_1) = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot (T_2 - T_1)$
Питома наявна робота, l_{in} , кДж / кг	$l_{in} = l_n \cdot n$
Зміна питомої внутрішньої енергії, Δu_n , кДж/кг	$\Delta u_n = c_v \cdot (T_2 - T_1)$
Зміна питомої ентальпії, Δh_n , кДж/кг	$\Delta h_n = c_p \cdot (T_2 - T_1)$
Зміна питомої ентропії, ΔS_n , кДж / (кг · К)	$\Delta S_n = c_n \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$

Продовження таблиці Г.1

	ІЗОХОРНИЙ ПРОЦЕС $v = \text{const}; \quad n = \pm \infty$	ІЗОБАРНИЙ ПРОЦЕС $p = \text{const}; \quad n = 0$
Питома робота розширення процесу, l , кДж / кг	$l_v = 0$	$l_p = p \cdot (v_2 - v_1) =$ $= R \cdot (T_2 - T_1)$
Питома теплота процесу, q , кДж / кг	$q_v = \Delta u_v =$ $= c_v \cdot (T_2 - T_1)$	$q_p = \Delta h_p =$ $= c_p \cdot (T_2 - T_1)$
Питома наявна робота l_i , кДж / кг	$l_{iv} = v \cdot (p_1 - p_2)$	$l_{ip} = 0$
Зміна питомої внутрішньої енергії, Δu , кДж / кг	$\Delta u_v = q_v =$ $= c_v \cdot (T_2 - T_1)$	$\Delta u_p = c_v \cdot (T_2 - T_1)$
Зміна питомої ентальпії, Δh , кДж / кг	$\Delta h_v = c_p \cdot (T_2 - T_1)$	$\Delta h_p = q_p =$ $= c_p \cdot (T_2 - T_1)$
Зміна питомої ентропії, ΔS , кДж / (кг · К)	$\Delta S_v = c_v \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) =$ $= c_v \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$	$\Delta S_p = c_p \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) =$ $= R \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$

Продовження таблиці Г.1

АДІАБАТНИЙ ПРОЦЕС	
$p \cdot v^k = \text{const}; \quad 1,3 < k < 1,67$	
Питома робота розширення процесу, l , кДж / кг	$l_s = \frac{1}{k-1} \cdot (p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2) = \frac{R}{k-1} \cdot (T_1 - T_2) =$ $= \frac{p_1 \cdot v_1}{k-1} \cdot \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) = \frac{p_1 \cdot v_1}{k-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}\right] =$ $= \frac{p_1 \cdot v_1}{k-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] = \frac{R \cdot T_1}{k-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}\right] =$ $= \frac{R \cdot T_1}{k-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]$
Питома теплота процесу, q , кДж / кг	$q_s = 0$
Питома наявна робота, l_i , кДж / кг	$l_{is} = l \cdot k$
Зміна питомої внутрішньої енергії, Δu , кДж / кг	$\Delta u_s = -l_s$
Зміна питомої ентальпії, Δh , кДж / кг	$\Delta h_s = c_p \cdot (T_2 - T_1) = k \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) =$ $= -k \cdot l_s$
Зміна питомої ентропії, ΔS , кДж / (кг · К)	$\Delta S_s = 0$

Продовження таблиці Г.1

ІЗОТЕРМІЧНИЙ ПРОЦЕС	
$T =$	$p \cdot v = \text{const}; \quad n = 1.0$
Питома робота розширення процесу, l , кДж / кг	$l_T = q_T = R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) =$ $= p_1 \cdot v_1 \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = p_1 \cdot v_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$
Питома теплота процесу, q , кДж / кг	$l_T = q_T = R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) =$ $= p_1 \cdot v_1 \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = p_1 \cdot v_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$ $= p_1 \cdot v_1 \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = p_1 \cdot v_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$
Питома наявна робота, l_i , кДж / кг	$l_{iT} = l_T = q_T$
Зміна питомої внутрішньої енергії, Δu , кДж / кг	$\Delta u_T = 0$
Зміна питомої ентальпії, Δh , кДж / кг	$\Delta h_T = 0$
Зміна питомої ентропії, ΔS , кДж / (кг · К)	$\Delta S_T = R \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = R \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$