

**621.7**  
**Б 307**

**Міністерство освіти і науки України**  
**Запорізька державна інженерна академія**

---



**В. І. Бахтін**  
**А. А. Кузьменко**

## **ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА**

**Методичні вказівки**  
**до виконання розрахунково-графічної роботи**  
**«Розрахунок газового циклу»**

*для студентів ЗДІА*  
*спеціальності 144 «Теплоенергетика»*

Міністерство освіти і науки України  
Запорізька державна інженерна академія

## **ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА**

**Методичні вказівки  
до виконання розрахунково-графічної роботи  
«Розрахунок газового циклу»**

*для студентів ЗДІА  
спеціальності 144 «Теплоенергетика»*

*Рекомендовано до видання  
на засіданні кафедри ТГЕ,  
протокол № 8 від 18.12.2017р.*

Запоріжжя  
ЗДІА  
2018

УДК 621.7  
Б 307

*В. І. Бахтін, к.т.н., доцент*  
*А. А. Кузьменко, доцент*

***Відповідальний за випуск:*** *зав. кафедри ТГЕ,*  
*д.т.н., професор І. Г. Яковлева*

**Бахтін В. І.**  
Б 307      Технічна термодинаміка: методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи «Розрахунок газового циклу» для студентів ЗДІА спеціальності 144 «Теплоенергетика» / Бахтін В. І., Кузьменко А. А.; Запоріж. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2018. – 38 с.

## ЗМІСТ

<b>Загальні вказівки.....</b>	<b>4</b>
<b>1. Зміст розрахунково-графічної роботи і пояснювальної записки.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Тематика завдання.....</b>	<b>5</b>
<b>3. Умова завдання.....</b>	<b>5</b>
<b>4. Методичні вказівки до розрахунку.....</b>	<b>6</b>
<b>5. Додаток 1. Титульний лист роботи.....</b>	<b>28</b>
<b>6. Додаток 2. Таблиця 1.п – Дані до завдання.....</b>	<b>29</b>
Додаток 2. Таблиця 1.п – Дані до завдання.....	30
Додаток 2. Таблиця 1.п – Дані до завдання.....	31
<b>7. Додаток 3. Таблиця 2.п – Теплоємність повітря по С.Л. Ривкину.....</b>	<b>32</b>
<b>8. Додаток 4. Таблиця 3. п – Розрахункові залежності для параметрів процесів циклу.....</b>	<b>33</b>
Додаток 4. Таблиця 3. п – Розрахункові залежності для параметрів процесів циклу.....	34
Додаток 4. Таблиця 3. п – Розрахункові залежності для параметрів процесів циклу.....	35
Додаток 4. Таблиця 3. п – Розрахункові залежності для параметрів процесів циклу.....	36
<b>9. Список рекомендуємої літератури.....</b>	<b>37</b>

## ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ

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

При вивчанні дисципліни позитивним моментом є придбання студентами навичок використання теоретичних основ курсу при рішенні 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 здійснюваних технічних розрахунків, розширення знань в області термодинамічних циклів теплових двигунів, а також удосконалювання 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) введення, у якому описуються цикл і термодинамічні процеси, що складають цикл, представляються початковий аналіз вихідних даних і графічна ілюстрація циклу;
  - д) розрахункова частина, що включає два основних розділа, які виконуються відповідно до завдання.
- 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;
- е) виводи;
  - ж) список використаної літератури.

### 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. УМОВА ЗАВДАННЯ

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

#### Потрібно:

1. Розрахувати основні термодинамічні параметри стану робочого тіла ( $p, Pa; v, m^3/kg; T, K$ ) в характерних точках циклу;

2. Для кожного із процесів визначити:

зміну внутрішньої енергії  $\Delta u, кДж/кг$ ; ентальпії  $\Delta h, кДж/кг$ ; ентропії  $\Delta S, кДж/(кг \cdot K)$ ; роботу процесу  $l, кДж/кг$ ; наявну роботу  $l_n, кДж/кг$ ; теплоту процесу  $q, кДж/кг$ ; значення показника політропи  $n$ ; коефіцієнтів  $a = \Delta u / q_1$  і  $b = l / q_1$ .

3. Визначити сумарні кількості теплоти: підведеною,  $q_1$  і відведеної  $q_2$  в циклі; роботу циклу  $l_{ц}$ ; наявну роботу циклу  $l_n$ ; термічний ККД циклу  $\eta_t$ .

4. Побудувати цикл в координатах:  $lg p - lg v$ .

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

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

6. Використовуючи  $p, v$  - і  $T, S$  - діаграми, графічно визначити величини, зазначені у п.2 і п.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 згорання 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 зворотних термодинамічних циклах.

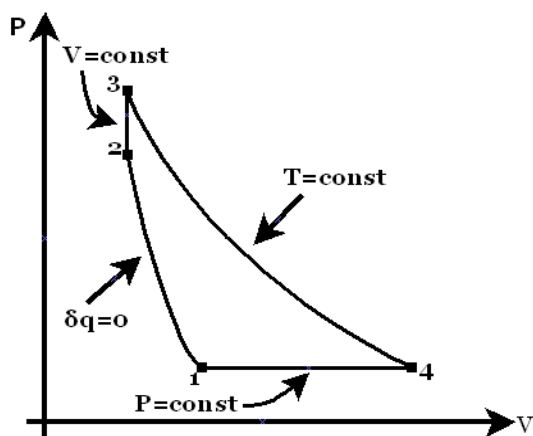
Таким чином, при розрахунках будемо вважати повітря ідеальним газом, а його властивості не залежними від температури. Прийmemo газу постійну  $R_n$  рівною **287 Дж / (кг · К)**.

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

#### 4. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО РОЗРАХУНКУ

Як приклад, приводимо розрахунок циклу, який представлений на рис. 1, із заданими наступними параметрами в характерних точках:

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



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 ( $p = \text{const}$ );

Рис. 1 – термодинамічний цикл

4.1. Визначимо температуру робочого тіла в т. 1 ( $T_1$ ):

$$T_1 = \frac{p_1 \cdot v_1}{R_v} = \frac{0,30 \cdot 10^6 \times 0,3}{287,1} = 313,5 \text{ К} = 40,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

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

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

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

Визначимо показник політропи  $n$  для кожного із процесів з наступно-

го 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:

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

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

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

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

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{n-1}}, \quad (4.2); \quad \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{n}{n-1}}, \quad (4.3)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}, \quad (4.4)$$

4.3. Для т. 2 дано:  $p_2 = 1,0 \text{ МПа}$ . Необхідно визначити:  $v_2$  і  $T_2$

Для визначення питомого об'єму  $v_2$  використаємо рівняння зв'язку параметрів в адіабатному процесі 1 – 2:



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

Для визначення абсолютної температури  $T_2$  робочого тіла в т. 2, використаємо рівняння Клапейрона:

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

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

Для визначення абсолютного тиску  $p_3$  використаємо рівняння зв'язку параметрів в ізохорному процесі 2 – 3:

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

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  $v_4$  використаємо рівняння зв'язку параметрів в ізотермічному процесі 3 – 4:

$$v_4 = \frac{v_3 \times p_3}{p_4} = \frac{0,127 \times 1,07}{0,30} = 0,453 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

Результати розрахунку термодинамічних параметрів стану в точках газового циклу представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

	$p, \text{ МПа}$	$v, \text{ м}^3 / \text{кг}$	$T, \text{ К}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$
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. Визначимо величини питомої роботи розширення (стискування)  $l$ , питомої наявної роботи  $l_n$ , коефіцієнтів  $a$  і  $b$ , підведеної (відведеної) питомої теплоти процесів  $q$ , зміни питомій внутрішньої енергії  $\Delta u$  в процесах, змі-

ни питомої ентальпії  $\Delta h$  в процесах, зміни питомій ентропії  $\Delta S$  в процесах:

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

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

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

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

$$q_{1-2} = 0 \text{ кДж / кг};$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$l_{2-3} = 0 \text{ кДж / кг};$$

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

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

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

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

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

$$\Delta s_{3-4} = R_{\hat{a}} \cdot \ln\left(\frac{v_4}{v_3}\right) = 287,1 \cdot \ln\left(\frac{0,453}{0,127}\right) = 0,365 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{К)};$$

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

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

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

$$\alpha_{3-4} = \frac{\Delta u_{3-4}}{q_{3-4}} = \frac{0}{172,81} = 0; \quad b_{3-4} = \frac{l_{3-4}}{q_{3-4}} = \frac{172,81}{172,81} = 1,0.$$

#### 4.4.4. Процес 4 – 1 (ізобарний, $n = 0$ )

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

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

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

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

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

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

$$\alpha_{4-1} = \frac{\Delta u_{4-1}}{q_{4-1}} = \frac{-114,52}{-160,3} = 0,714; \quad b_{4-1} = \frac{l_{4-1}}{q_{4-1}} = \frac{-45,78}{-160,3} = 0,286.$$

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

Таблиця 2

	$n$	$c$ , кДж / (кг · К)	$\alpha$	$b$	$\Delta u$ , кДж/кг	$\Delta h$ , кДж/кг	$\Delta s$ , 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	$\frac{\pm \infty}{\pm \infty}$	0,718	1,0	0	$\frac{21,97}{-45,81}$	$\frac{30,75}{-63,98}$	$\frac{0,048}{0,051}$	$\frac{21,97}{16,82}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{-8,89}{-}$
3 – 4	$\frac{1,0}{1,0}$	$\infty$	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	$\frac{0}{0}$	1,005	0,714	0,286	$\frac{-114,52}{45,81}$	$\frac{-160,3}{64,11}$	$\frac{-0,413}{-0,051}$	$\frac{-160,3}{-16,82}$	$\frac{-45,78}{-59,58}$	$\frac{0}{0}$
					$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0,13}$	$\frac{0}{0,0008}$	$\frac{34,48}{22,82}$	$\frac{34,48}{25,15}$	$\frac{34,35}{25,15}$

4.5. Визначимо сумарну кількість підведеної теплоти  $q_1$ , відведеної теплоти  $q_2$  в газовому циклі, роботу циклу  $l$ , наявну роботу  $l_n$ , термічний ККД циклу  $\eta_t$ , індикаторний тиск  $p_i$ :

4.5.1. Визначимо кількість підведеної теплоти  $q_1$ :

$$q_1 = q_{2-3} + q_{3-4} = 21,97 + 172,81 = 194,78 \text{ кДж / кг};$$

4.5.2. Визначимо кількість відведеної теплоти  $q_2$ :

$$q_2 = q_{4-1} = -160,3 \text{ кДж / кг};$$

4.5.3. Визначимо корисну роботу циклу  $l$ :

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

4.5.4. Визначимо термічний ККД газового циклу  $\eta_t$ :

$$\eta_{\delta} = \frac{l}{q_1} = \frac{34,48}{194,78} = 0,177;$$

4.5.5. Визначимо індикаторний тиск  $p_i$ :

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

4.6. Будуємо газовий цикл в координатах  $(\lg p - \lg v)$

4.6.1. Як відомо, в логарифмічних координатах процеси  $1 - 2$ ;  $2 - 3$ ;  $3 - 4$ ;  $4 - 1$  будуть представляти собою прямі лінії. Значення основних термодинамічних параметрів  $p$ ,  $v$  і їх логарифмів, взяті із таблиці 1, представлені в таблиці 3, а газовий цикл в координатах  $(\lg p - \lg v)$  представлений на рис. 2.

Таблиця 3

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

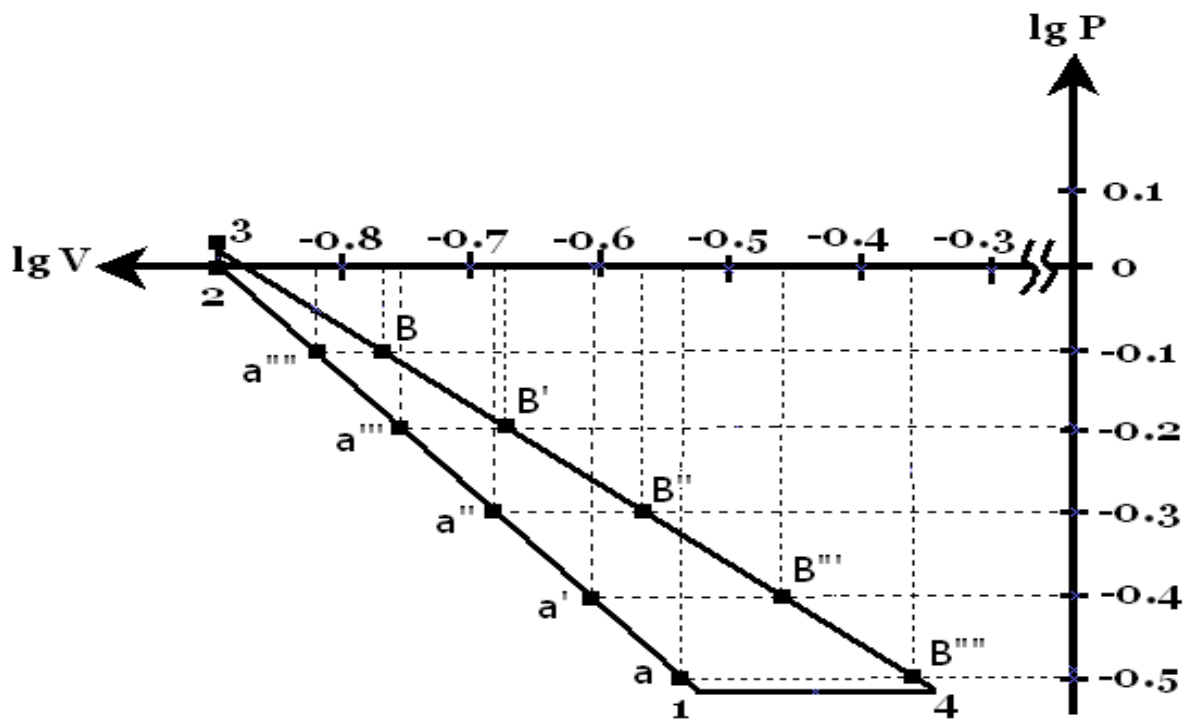


Рис. 2 Термодинамічний цикл в координатах  $lg p - lg v$

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

Для цих проміжних точок 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. 2) і  $p - v$  (рис. 3).

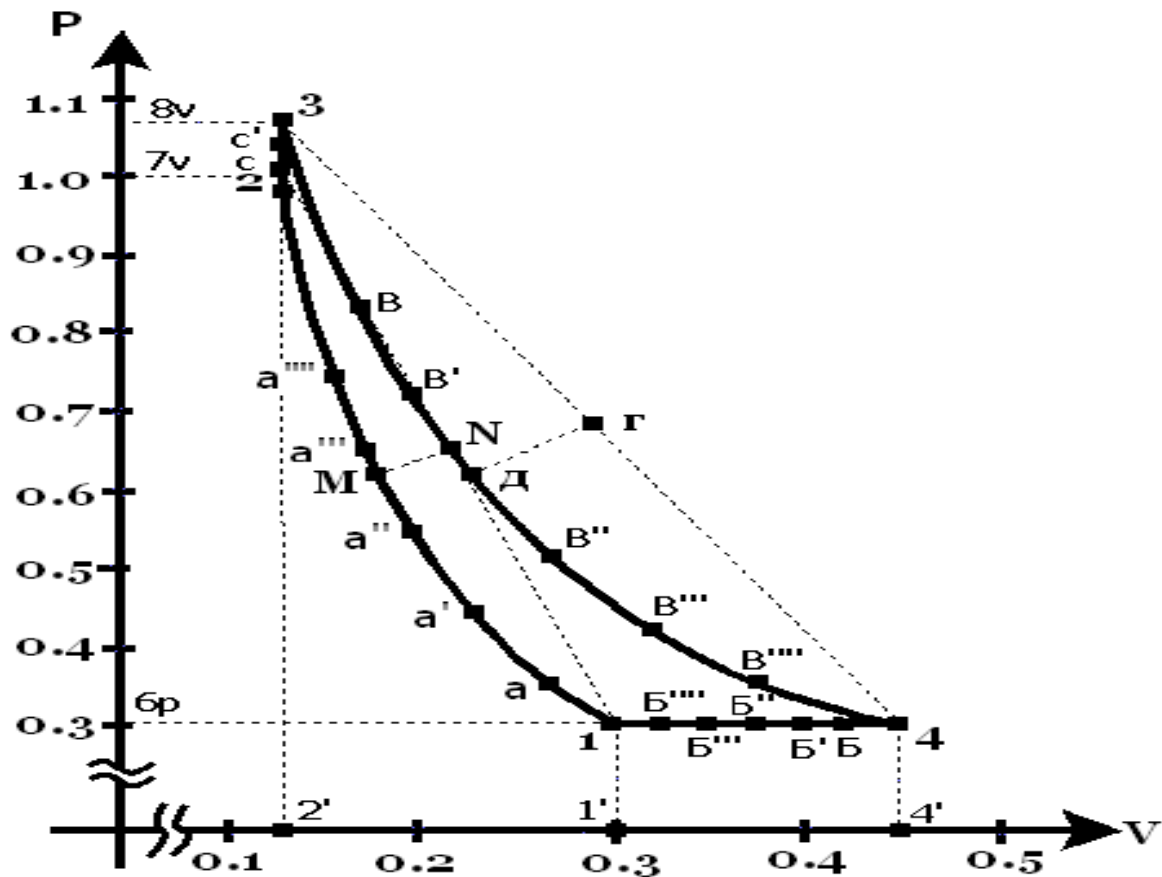
За результатами таблиць 4; 5 будуюмо  $p, v$  - діаграму газового циклу, представлену на рис. 3 (для найбільшої точності подальших розрахунків доцільно рис. 3 зробити на міліметровому папері).

Таблиця 4

Процес 1 - 2	т.1	т. a	т. a'	т. a''	т. a'''	т. a''''	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 5

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

Рис. 3 Термодинамічний цикл в координатах  $p - v$ 

4.8. Для коректної побудови газового циклу в координатах  $(T - S)$  розіб'єм процеси  $2 - 3$ ;  $4 - 1$  (рис. 3) на довільну кількість проміжних точок ( $c, c', B, B', B'', B''', B''''$ ) при певних їх значеннях знайдемо величини основних термодинамічних параметрів  $p, v$  і їх логарифмів, абсолютні температури в цих точках і відповідні значення зміни ентропії, представлені в таблицях 6 і 7.

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

а) Визначаємо значення температур:

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

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

б) Визначимо зміни ентропії між т. 2 і т. 3 для проміжних крапок:

$$\Delta S_{2-\tilde{n}} = c_v \cdot \ln\left(\frac{T_{\tilde{n}}}{T_2}\right) = 0,718 \cdot \ln\left(\frac{455,7}{442,4}\right) = + 0,021 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$$

$$\Delta S_{2-\tilde{n}'} = c_v \cdot \ln\left(\frac{T_{\tilde{n}'}}{T_2}\right) = 0,718 \cdot \ln\left(\frac{464,5}{442,4}\right) = + 0,035 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$$

Таблиця 6

	$p$ , МПа	$lg p$	$v$ , $m^3 / кг$	$lg v$	$T$ , К	$\Delta S$ , кДж / (кг · К)
<b>т. 2</b>	<b>1,00</b>	<b>0,0</b>	<b>0,127</b>	<b>- 0,896</b>	<b>442,4</b>	
<b>т. с</b>	<b>1,03</b>	<b>0,013</b>	<b>0,127</b>	<b>- 0,896</b>	<b>455,7</b>	$\Delta S_{1-c} = + 0,021$
<b>т. с'</b>	<b>1,05</b>	<b>0,021</b>	<b>0,127</b>	<b>- 0,896</b>	<b>464,5</b>	$\Delta S_{1-c'} = + 0,035$
<b>т. 3</b>	<b>1,07</b>	<b>0,029</b>	<b>0,127</b>	<b>- 0,896</b>	<b>473,0</b>	$\Delta S_{1-4} = + 0,048$

**Процес 4–1 (ізобарний,  $n = 0$ )**

в) Визначаємо значення температур:

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

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

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



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

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

г) Визначимо зміни ентропії між т. 4 і т. 1 для проміжних крапок:

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

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

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

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

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

Таблиця 7

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

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

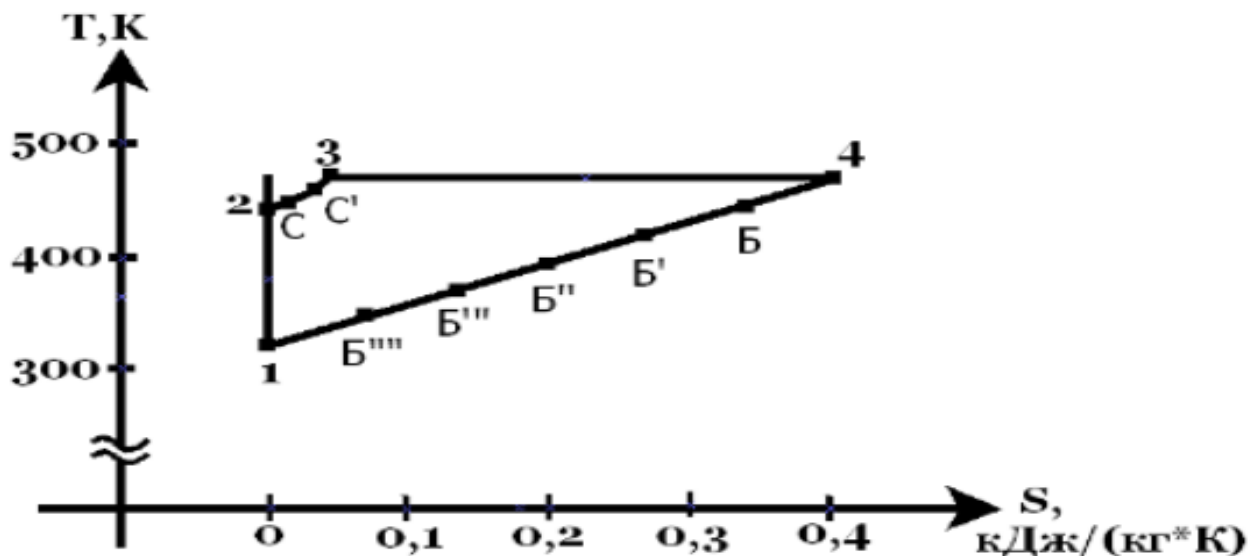


Рис. 4 Термодинамічний цикл в координатах  $T - S$

5. Визначення величин основних термодинамічних параметрів графічним способом.

Використовуючи  $p, v$  - і  $T, S$  - діаграми, графічно визначимо величини, визначені в п. 2 і п. 3 і представлені в таблиці 2 і порівняємо результати графічного й аналітичного розрахунків.

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

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

### Процес 1 - 2 адіабатний

#### а) Робота розширення:

Площа, 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  $I - N - 2$  на діаграмі циклу (рис. 3), ця площа може бути представлена як різниця площ прямокутної трапеції пл.  $(I - N - 2 - 2' - 1' - 1)$  і сегменту пл.  $(I - M - 2 - N - 1)$ .

Тому буде справедливим наступний запис для площі еквівалентної роботи розширення в процесі  $I - 2$ :

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

де:  $F_{l_{1-2}}$  - площа на  $p, v$  діаграмі еквівалентна роботі розширення  $l_{1-2}$  в процесі  $1 - 2$ ,  $\text{мм}^2$ ;  $(1 - 1')$ ;  $(2 - 2')$ ;  $(I - N - 2)$ ;  $(M - N)$  – довжини відрізків на  $p, v$  - діаграмі (рис.3) для процесу  $1 - 2$ ,  $\text{мм}$ .

Масштаб  $p, v$  - діаграми визначаємо наступним чином;

10 мм ординати діаграми відповідають **0,1 МПа** тиску, 1 мм відповідно – **0,01 МПа = 10000 Н/м<sup>2</sup>**.

20 мм абсциси діаграми відповідають **0,1 м<sup>3</sup>/кг** питомого об'єму, 1 мм відповідно – **0,005 м<sup>3</sup>/кг**.

Таким чином, маємо:

$$M_{p,v} = p \cdot v = 10000 \text{ Н/м}^2 \cdot 0,005 \text{ м}^3 / \text{кг} = 50 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{мм}^2), \text{ тобто} \\ 1 \text{ мм}^2 = 50 \text{ Дж} / \text{кг}$$

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

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

**б) Наявна робота:**

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

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

### Процес 2 - 3 ізохорний

а) Робота розширення:  $l_{2-3} = 0$ ;  $F_{l_{2-3}} = 0$

б) Найвна робота:

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

Звідки:  $l_{i(2-3)} = F_{l_{i(2-3)}} \cdot \dot{I}_{p,v} = 178,5 \cdot 50 = -8,93 \text{ кДж / кг}$

### Процес 3 - 4 ізотермічний

а) Робота розширення:

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

Звідки:  $l_{(3-4)} = F_{l_{(3-4)}} \cdot \dot{I}_{p,v} = 3442,5 \cdot 50 = 172,13 \text{ кДж / кг}$ ,

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

б) Найвна робота:

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

Звідки:  $l_{i(3-4)} = F_{l_{i(3-4)}} \cdot \dot{I}_{p,v} = 3456,0 \cdot 50 = 172,8 \text{ кДж / кг}$

### Процес 4 - 1 ізобарний

### а) Робота розширення:

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

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

Так як процес  $4-1$  - стискання, то  $dv$  має знак мінус, отже і  $l_{4-1}$  також має знак мінус.

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

Розраховані значення  $l$  і  $l_n$  графічним способом зведемо у табл. 2 в знаменники відповідних колонок.

Для кожного процесу, що становить цикл, дамо схему в  $T-S$  координатах і графічним методом визначимо  $\Delta u$ ,  $\Delta h$ ,  $q$ ,  $n$ .

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  $\partial q = T \cdot dS$ . Тому що абсолютна температура  $T$  - величина завжди позитивна, то знак  $\partial q$  визначається знаком  $dS$ . Якщо  $dS$  має знак плюс і  $\partial q$  також буде мати знак плюс і навпаки.

2. Знак  $\Delta u$  визначається з вираження  $du = c_v \cdot dT$ . Тому що  $c_v$  - величина позитивна, то знак  $\Delta u$  визначається знаком  $dT$ . Температура зменшується, значить  $dT$  має знак мінус і  $\Delta u$  також має знак мінус і навпаки.

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

### Процес 1-2 (адіабаний)

При визначенні  $\Delta u$ ,  $\Delta h$  і  $n$  процесу  $1-2$  необхідно додатково нанести процеси ізобарний і ізохорний.

Наступним чином визначим зміну ентропії для ізобарного ( $2-2_p$ ) та ізохорного ( $2-2_v$ ) процесів в інтервалі зміни температур адіабатного процесу  $1-2$ :

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

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

$T-S$  – діаграма для розрахунку  $\Delta u$ ,  $\Delta h$  і  $n$  в процесі  $1-2$  представлений на рис. 5

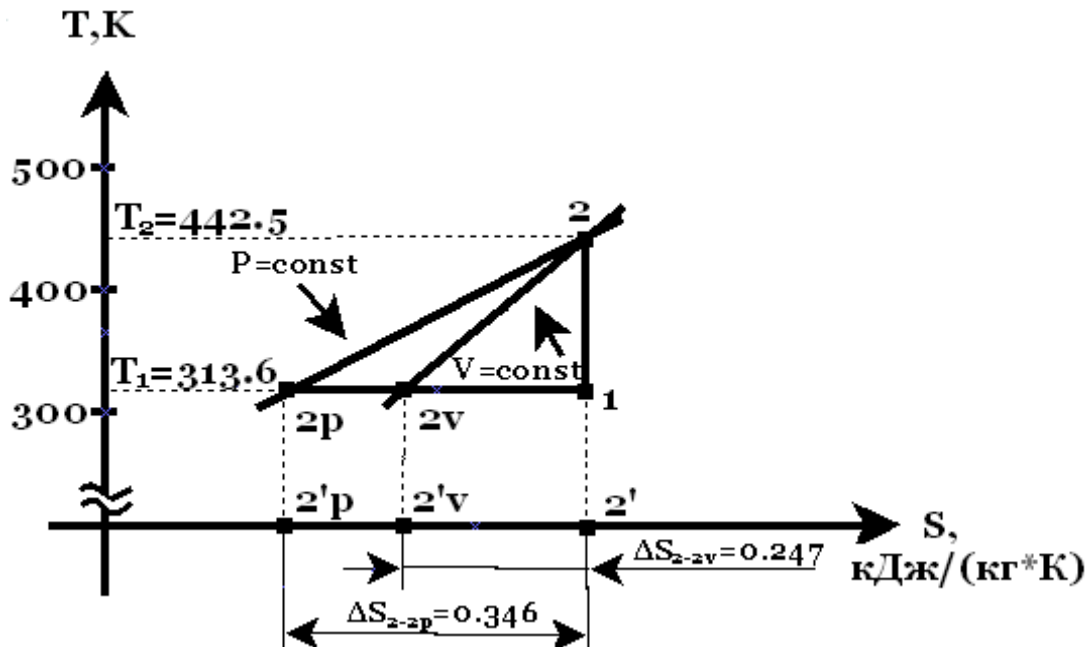


Рис. 5 – Схема розрахунку процесу  $1-2$  в  $T-S$  координатах

Як видно з рис. 5 процес  $1-2$  є адіабатним. Площа під ізохорою  $2-2_v$  еквівалентна зміні внутрішньої енергії в процесі  $1-2$ .

Таким чином, маємо:

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

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 рис. 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. 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  $1 - 2_v$  і дає чисельне значення.

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 ліво-руч від т. 1, то  $n > 1$ , а якщо праворуч,  $0 < n < 1$ . 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:

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

### 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 ( $\Delta u_{2-3}$ ) цього ж процесу.

При визначенні  $\Delta u$ ,  $\Delta h$  і  $n$  процесу 2–3 необхідно додатково нанести процеси ізобарний і ізохорний.

Наступним чином визначим зміну ентропії для ізобарного (3–3<sub>p</sub>) та ізохорного (3–3<sub>v</sub>) процесів в інтервалі зміни температур ізохорного процесу 2–3:

$$\Delta S_{2-3} = \Delta S_{v(3v-3)} \quad \text{з табл. 2 дорівнює } 0,048 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{К)}$$

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

$T-S$  – діаграма для розрахунку  $\Delta u$ ,  $\Delta h$  і  $n$  в процесі 2–3 представлені на рис. 6

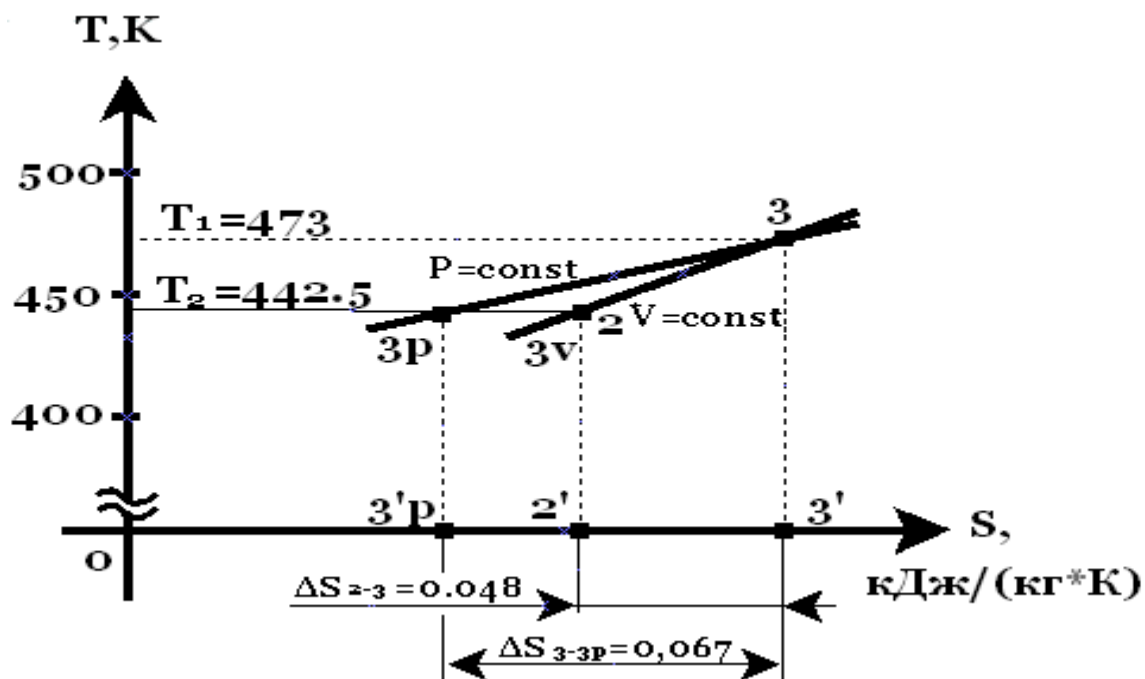


Рис. 6 – Схема розрахунку процесу 2–3 в  $T-S$  координатах

Як видно з рис. 6 процес 2–3 є ізохорним. Площа під ізохорою 2–3<sub>v</sub> еквівалентна зміні внутрішньої енергії в процесі 2–3.

Таким чином, маємо:



$$\Delta u_{1-2} = \ddot{v} (3 - 3_v - 2' - 3' - 3) = \left[ \frac{(2' - 3_v) + (3' - 3)}{2} \right] \cdot (2' - 3') = \Delta S_{v(3-3_v)} \cdot \left( \frac{T_2 + T_3}{2} \right) =$$

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

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

$$\Delta h_{1-2} = n l (3 - 3_p - 3'_p - 3' - 3) = \left[ \frac{(3_p - 3'_p) + (3' - 3)}{2} \right] \cdot (3'_p - 3') = \Delta S_{p(2-2_p)} \cdot \left( \frac{T_2 + T_3}{2} \right) =$$

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

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

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 немає, тому що в знаменнику дробі нуль.

### Процес ізотермічний (3 - 4)

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

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

$\Delta S_{3-4}$  беремо з табл.. 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  $\Delta u$ ,  $\Delta h$  і  $n$  в процесі 3–4 представлені на рис. 7

Показник політропи  $n$  для ізотермічного процесу 1–2 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:

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

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

Тому провести ізохору і ізобару для ізотермічного процесу 3–4 неможна.

Отже, підставивши відповідно значення  $c_{i3} = \Delta S_{3-4}$ ;  $c_p = \Delta S_{4p}$ ;  $c_v = \Delta S_{4v}$  у формулу (4,1), маємо:

$$n = \frac{c_{i3} - c_p}{c_{i3} - c_v} = \frac{\Delta S_{3-4} - \Delta S_{4p}}{\Delta S_{3-4} - \Delta S_{4v}} = \frac{\Delta S_{3-4}}{\Delta S_{3-4}} = 1$$

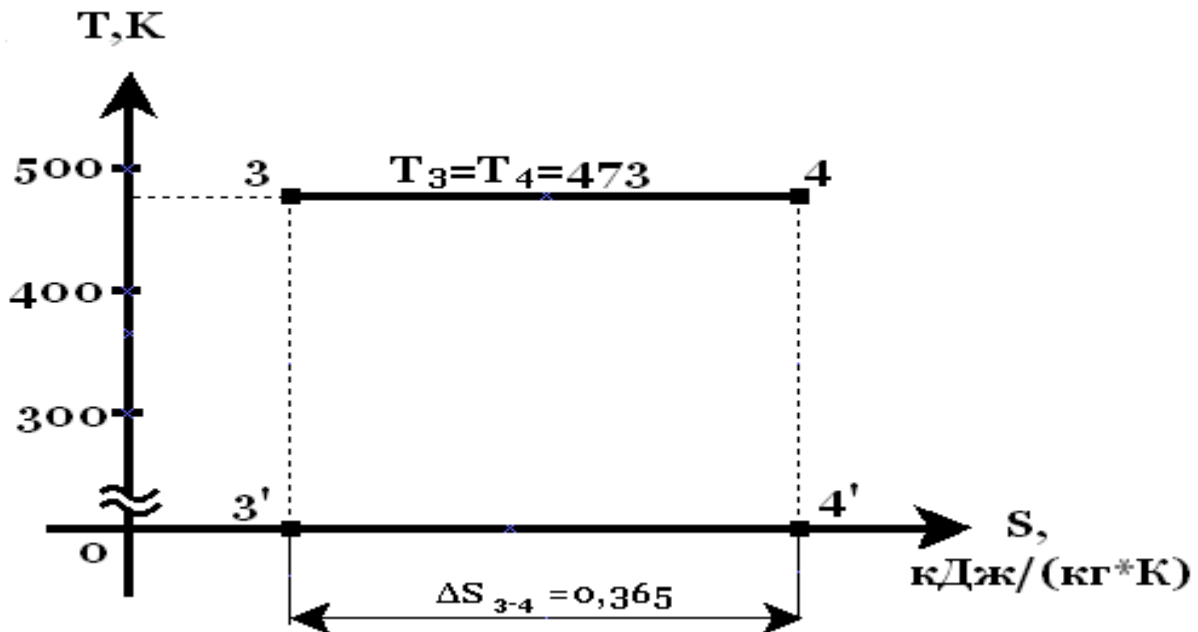


Рис. 7 – Схема розрахунку процесу 3 – 4 в  $T - S$  координатах

### 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

$$q_{4-1} = \Delta h_{4-1} = n l (4 - 1 - 1' - 4' - 4) = \left[ \frac{(1 - 1') + (4 - 4')}{2} \right] \cdot (1' - 4') =$$

$$= \Delta S_{4-1} \cdot \frac{T_4 + T_1}{2} = -0,413 \cdot \left( \frac{473,0 + 313,5}{2} \right) = -162,4 \text{ кДж / кг}$$

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

Під ізохорою 4 – 1<sub>v</sub> площа (4 – 1<sub>v</sub> – 1'<sub>v</sub> – 4' – 4) зміні еквівалентна внутрішній енергії процесу 4 – 1

$T - S$  – діаграма для розрахунку  $\Delta u$ ,  $\Delta h$  і  $n$  в процесі 4 – 1 представлені на рис. 8

$$\Delta u_{4-1} = n l (4 - 1_v - 1'_v - 4' - 4) = \left[ \frac{(1'_v - 1_v) + (4' - 4)}{2} \right] \cdot (1'_v - 4'_v) = \Delta S_{4-1} \cdot \frac{T_1 + T_4}{2} =$$

$$= -0,295 \cdot \left( \frac{313,5 + 473,0}{2} \right) = -116,02 \text{ кДж/кг}$$

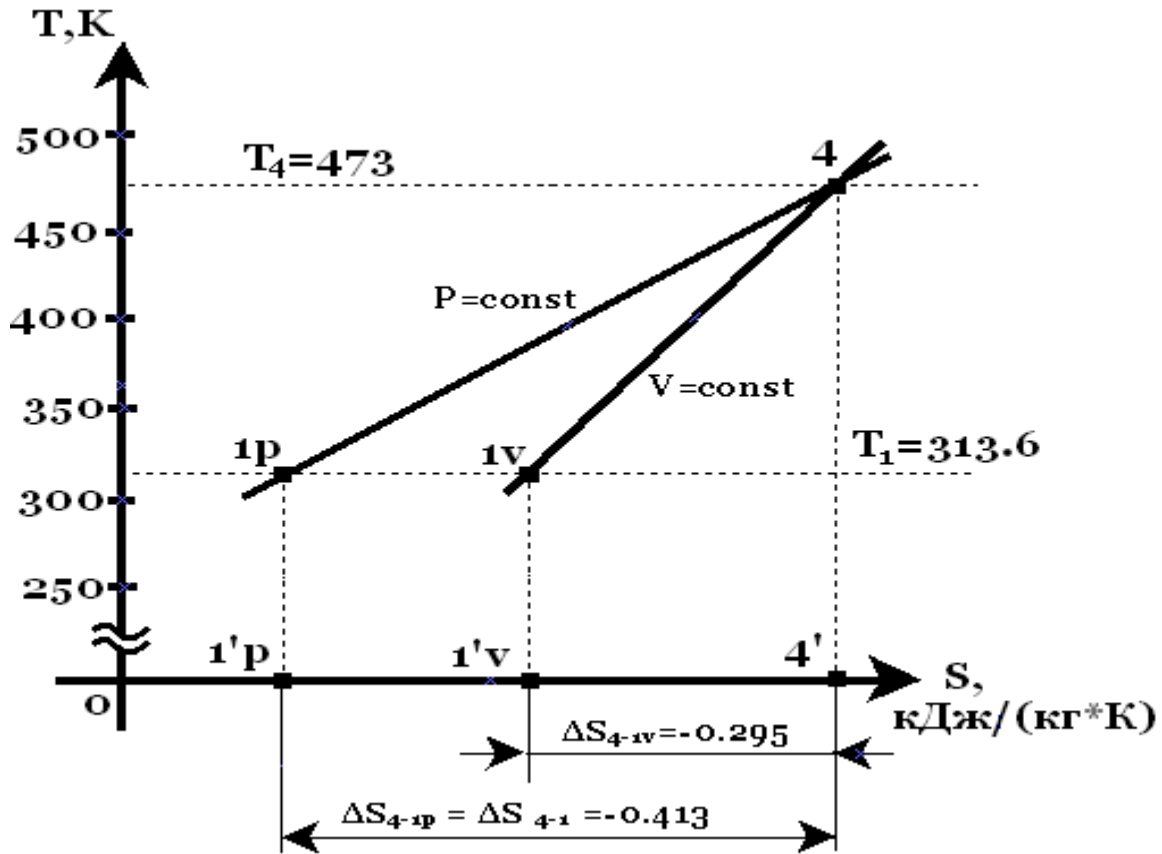


Рис. 8 – Схема розрахунку процесу  $4-1$  в  $T-S$  координатах

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 немає, тому що в чисельнику дробі  $0$ .

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКА ДЕРЖАВНА ІНЖЕНЕРНА АКАДЕМІЯ  
КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ

РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА  
ПО ТЕХНІЧНІЙ ТЕРМОДИНАМІЦІ

Тема: РОЗРАХУНОК ГАЗОВОГО ЦИКЛУ

Варіант № \_\_\_\_\_

Завдання видане «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_\_ р.

Строк здачі виконаного завдання «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Завдання захищене «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Оцінка \_\_\_\_\_

Виконав(а) ст. гр. ТЕ- (підпис) \_\_\_\_\_

Прийняв: (вчене звання, ступінь) (підпис) \_\_\_\_\_

Запоріжжя, \_\_\_\_\_ р

Таблиця 1.п – Дані до завдання

№ вар.	Схема циклу	Задані параметри у основних точках циклу: $p$ , МПа; $v$ , м <sup>3</sup> /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		$p_1 = 0,15$	$v_1 = 1,5$	$\epsilon = v_1/v_2 = 6,5$	$\kappa = 0,4$	$p$	$v$	$p$	$n = 1,26$
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		$p_1 = 0,2$	$v_1 = 0,4$	$p_2 = 1,0$	$T_3 = 1473$	$n = 1,25$	$p$	$T$	$p$
7		$p_1 = 0,15$	$v_1 = 0,6$	$T_2 = 423$	$p_3 = 1,8$	$n = 1,3$	$v$	$n = 1,3$	$P$
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		$p_1 = 0,4$	$v_1 = 0,3$	$p_2 = 2,0$	$T_3 = 1283$	$S$	$p$	$S$	$v$

Додаток 2

Продовження таблиці 1.п – Дані до завдання

№ вар.	Схема циклу	Задані параметри у основних точках циклу: $p$ , МПа; $v$ , м <sup>3</sup> /кг; $T$ , К				Тип процесу і показник політропи			
		1-2	2-3	3-4	4-1				
11		$v_1 = 0,6$	$T_1 = 313$	$v_2 = 0,26$	$p_3 = 0,8$	$n = 1,23$	$v$	$p$	$v$
12		$p_1 = 0,09$	$T_1 = 363$	$\epsilon = v_1 / v_2 = 6,0$	$q_{2-3} = 850$ кДж / кг	$S$	$v$	$S$	$v$
13		$p_1 = 5,8$	$T_1 = 650$	$v_2 = 0,14$	$T_3 = 420$	$T$	$S$	$T$	$S$
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	$S$	$p$	$S$	$p$
19		$p_1 = 0,9$	$v_1 = 0,2$	$p_2 = 2,0$	$p_3 = 1,5$	$S$	$T$	$S$	$v$
20		$p_1 = 0,13$	$T_1 = 358$	$\epsilon = v_1 / v_2 = 4,0$	$q_{2-3} = 1000$ кДж / кг	$S$	$p$	$S$	$v$

Додаток 2  
Продовження таблиці 1.п – Дані до завдання

№ вар.	Схема циклу	Задані параметри у основних точках циклу: $p$ , МПа; $v$ , м <sup>3</sup> /кг; $T$ , К				Тип процесу і показник політропи			
		1-2	2-3	3-4	4-1				
21		$p_1 = 1,5$	$T_1 = 583$	$T_3 = 288$	$\rho = v_2 / v_1 = 3,0$	$T$	$S$	$T$	$S$
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		$v_1 = 1,0$	$T_1 = 358$	$\epsilon = v_1 / v_2 = 10,0$	$q_{2-3} = 900$ кДж / кг	$S$	$p$	$T$	$v$
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:  $p \rightarrow p = const$  – ізобарний;  
 $v \rightarrow v = const$  – ізохорний;  
 $T \rightarrow T = const$  – ізотермічний;  
 $S \rightarrow \delta q = 0$  – адіабатний

Для політропних процесів задане значення показника політропи  $n$ .



Таблиця 2.п – Теплоємність повітря по С.Л. Ривкину

$t,$ °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						

Таблиця 3. п – Розрахункові залежності для параметрів процесів циклу

<b>ПОЛІТРОПНИЙ ПРОЦЕС</b>	
$p \cdot v^n = const; \quad n \text{ ом } -\infty \text{ до } +\infty$	
<b>Питома робота розширення процесу,</b>  <i><math>l_n</math>, кДж/кг</i>	$l_i = \frac{1}{n-1} \cdot (p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2) = \frac{R}{n-1} \cdot (T_1 - T_2) =$ $= \frac{p_1 \cdot v_1}{n-1} \cdot \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) = \frac{p_1 \cdot v_1}{n-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}\right] =$ $= \frac{p_1 \cdot v_1}{n-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right] = \frac{R \cdot T_1}{n-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}\right] =$ $= \frac{R \cdot T_1}{n-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]$
<b>Питома теплота процесу,</b> <i><math>q_n</math>, кДж/кг</i>	$q_i = c_i \cdot (\theta_2 - \theta_1) = \tilde{n}_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot (T_2 - T_1)$
<b>Питома наявна робота,</b> <i><math>l_{on}</math>, кДж/кг</i>	$l_{ii} = l_i \cdot n$
<b>Зміна питомої внутрішньої енергії,</b> <i><math>\Delta u_n</math>, кДж/кг</i>	$\Delta u_i = c_v \cdot (T_2 - T_1)$
<b>Зміна питомої ентальпії,</b> <i><math>\Delta h_n</math>, кДж/кг</i>	$\Delta h_i = c_p \cdot (T_2 - T_1)$
<b>Зміна питомої ентропії,</b> <i><math>\Delta S_n</math>, кДж/(кг·К)</i>	$\Delta S_i = \tilde{n}_i \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$

Таблиця 3. п – Розрахункові залежності для параметрів процесів циклу

	<b>ІЗОХОРНИЙ ПРОЦЕС</b>	<b>ІЗОБАРНИЙ ПРОЦЕС</b>
	$v = const; \quad n = \pm \infty$	$p = const; \quad n = 0$
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	$q_v = \Delta u_v =$ $= c_v \cdot (\dot{O}_2 - \dot{O}_1)$	$q_p = \Delta h_p =$ $= c_p \cdot (\dot{O}_2 - \dot{O}_1)$
Питома наявна робота, $l_o$ , кДж / кг	$l_{iv} = v \cdot (p_1 - p_2)$	$l_{op} = 0$
Зміна питомої внутрішньої енергії, $\Delta u$ , 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, $\Delta h$ , кДж / кг	$\Delta h_v = c_p \cdot (T_2 - T_1)$	$\Delta h_p = q_p =$ $= c_p \cdot (\dot{O}_2 - \dot{O}_1)$
Зміна питомої ентропії, $\Delta S$ , кДж / (кг · К)	$\Delta S_v = \tilde{n}_v \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) =$ $= c_v \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$	$\Delta S_p = \tilde{n}_p \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) =$ $= R \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$

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

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

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЄМОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кириллин В.А. Техническая термодинамика. – 4-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1983.- 416 с.
2. Беляев Н.М. Термодинамика. – К.: Вища шк., 1987. – 344 с.
3. Юдаев Б.Н. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче. – М.: Высш. шк., 1967. – 344 с.
4. Крутов В.И. Задачник по технической термодинамике и теории тепломассообмена. – М.: Высш. шк., 1986. – 383 с.

*Методичне видання*

**В. І. Бахтін**  
*к.т.н., доцент*  
**А. А. Кузьменко**  
*доцент*

## **ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА**

**Методичні вказівки**  
**до виконання розрахунково-графічної роботи**  
**«Розрахунок газового циклу»**  
*для студентів ЗДІА*  
*спеціальності 144 «Теплоенергетика»*

Підписано до друку 01.03.2018р. Формат 60x84 1/32. Папір офсетний.  
Умовн. друк. арк. 2,1. Наклад 1 прим.  
Внутрішній договір № 21/18

Запорізька державна інженерна академія  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів  
видавничої справи ДК № 2958 від 03.09.2007 р.

Віддруковано друкарнею  
Запорізької державної інженерної академії  
з оригінал-макету авторів

69006, м. Запоріжжя, пр. Соборний, 226  
ЗДІА