

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 парового 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 парового 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. 28 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

Вступ.....	4
1 Зміст розрахунково-графічної роботи та пояснювальної записки.....	5
2 Тематика завдання.....	6
3 Умови завдання.....	7
4 Методичні вказівки до розрахунку.....	9
4.1 Розрахунок p, v, t в основних точках циклу.....	9
4.2 Визначення u, h, s в основних точках циклу.....	11
4.3 Визначення $q_{\text{пр}}, \Delta u, \Delta h, \Delta s, l_{\text{пр}}$ для кожного процесу	13
4.4 Побудова парового циклу в координатах $p - v$; $T - S$; $h - S$	15
4.5 Визначення підведеної q_1 та відведеної q_2 теплоти у циклі, роботи циклу $l_{\text{ц}}$, термічного ККД циклу η_t , середнього індикаторного тиску p_i	18
4.6 Визначення параметрів заданої точки розрахунковим шляхом та за допомогою h, s - діаграми.....	19
Перелік посилань.....	21
Додаток А.....	23
Додаток Б.....	24
Таблиця Б.1 - дані до завдання.....	24

ВСТУП

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

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

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

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

1 ЗМІСТ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ ТА ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ

Розрахунково-графічна робота виконується у вигляді розрахунково-пояснювальної записки та оформлюється на форматних аркушах А4 з одного боку.

Розрахунково-пояснювальна записка повинна містити:

- титульний лист (Додаток А);
- реферат - стисле викладання змісту та результатів виконаної роботи;
- зміст;
- умови завдання, де описуються цикл та послідовні термодинамічні процеси, що складають цей цикл, здійснюється початковий аналіз вихідних даних і надається графічна ілюстрація циклу, що розраховується;
- розрахункова частина включає наступні розділи:
 - 1) в першому розділі здійснюється визначення термічних параметрів робочого тіла в основних точках циклу;
 - 2) у другому розділі визначаються - термічні параметри робочого тіла;
 - 3) у третьому розділі здійснюється розрахунок параметрів, що відповідають термодинамічному аналізу циклів теплових двигунів;
 - 4) у четвертому розділі будується цикл ПТУ в координатах $p-v$, $T-S$, $h-S$;
 - 5) у п'ятому розділі визначаються сумарні та економічні показники циклу;
 - 6) у шостому розділі визначаються параметри відзначеної точки;
- висновки;
- перелік джерел посилань.

2 ТЕМАТИКА ЗАВДАННЯ

За призначенням теплові машини поділяються на теплові двигуни (теплові установки) та холодильні установки. Тепловими двигунами називаються безупинно працюючі пристрої, в яких відбувається перетворення теплоти в роботу.

Сучасна стаціонарна теплоенергетика базується в основному на парових теплосилових установках (ПТУ). Теплосилові станції, як відомо, дають більше 80% енергії, що виробляється в нашій країні. В сучасних ПТУ широко використовується енергія органічного та ядерного палива.

В топках ПТУ хімічна енергія органічного палива перетворюється у теплову енергію продуктів згоряння. В паровому котлі відбувається передача теплоти від продуктів згоряння робочому тілу (вода, пара). Перегріта пара надходить в турбіну, де енергія пари перетворюється спочатку у кінетичну енергію потоку, а потім в кінетичну енергію обертання ротора турбіни. В електричному генераторі механічна енергія перетворюється в електричну (ротор турбіни і ротор генератора встановлюються на одному валу).

В ПТУ джерелом теплоти високої температури - тепловіддавачем є газоподібні продукти згоряння палива. Джерелом теплоти низької температури - теплоприймачем - охолоджуюча вода, що циркулює по трубках конденсатора, а робочим тілом є вода, що у паровому котлі перетворюється в насичену пару, а потім у пароперегрівачі – в перегріту пару. Особливістю ПТУ є фазове перетворення робочого тіла в циклі.

Процеси підведення і відведення теплоти в реальних циклах ПТУ являються необоротними внаслідок великого температурного перепаду між температурою робочого тіла і тепловіддавачем (продуктами згоряння палива), а також робочого тіла і теплоприймачем, тобто навколишнім середовищем.

3 УМОВИ ЗАВДАННЯ

Водяна пара масою 1 кг здійснює прямий термодинамічний цикл, який складається з чотирьох послідовних термодинамічних процесів.

Дані, необхідні для розрахунку, залежно від варіанту, наведені в Додатку Б.

Необхідно:

1. Визначити за допомогою h – S діаграми або таблиць термодинамічних властивостей води та водяної пари, а також відповідних залежностей параметри стану робочого тіла: p , Па; v , м³/кг; T , К у характерних точках циклу. Результати занести в таблицю 4.1.

2. Визначити за допомогою h – S діаграми або таблиць термодинамічних властивостей води та водяної пари, а також відповідних залежностей термічні параметри стану робочого тіла: u , кДж/кг; h , кДж/кг; S , кДж/(кг·К) в характерних точках циклу. Результати занести в таблицю 4.2.

3. Для кожного із процесів визначити зміну питомих: внутрішньої енергії Δu , кДж/кг; ентальпії Δh , кДж/кг; ентропії, ΔS , кДж/(кг·К); питому теплоту q_{np} , кДж/кг; роботу процесу l_{np} кДж/кг. Результати занести в таблицю 4.3.

4. Побудувати цикл у координатах: $p - v$, $T - S$, $h - S$.

5. Визначити сумарні кількості питомої підведеної теплоти q_1 , кДж/кг; відведеної теплоти q_2 , кДж/кг, у циклі; питому роботу циклу l_u , кДж/кг; термічний коефіцієнт корисної дії (ККД) циклу η_c ; середній індикаторний тиск p_i , кПа.

6. Для відзначеної точки за допомогою $h - S$ діаграми або таблиць визначити V_x , h_x , u_x , S_x , r_x , а також зовнішню і внутрішню теплоту паротворення ψ , ρ . Результати занести у таблицю 4.4.

Для полегшення розрахунків і їхнього аналізу пропонується роботу паротурбінної установки деякою мірою ідеалізувати. Ця ідеалізація полягає у тому, що:

- цикл робочого тіла є замкненим, а маса робочого тіла однакова для всіх періодів робочого процесу, тобто допускається, що робоче тіло за час одного циклу повертається у початковий стан, а не викидається в атмосферу;

- процес згоряння палива замінюється підведенням теплоти q_1 , кДж/кг, до робочого тіла від деякого фіктивного гарячого джерела теплоти;

- механічні втрати на тертя, гідравлічні втрати, а також втрати в навколишнє середовище відсутні, тому можна допустити, що цикл ПТУ є оборотним.

4 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО РОЗРАХУНКУ

В якості прикладу надано розрахунок парового циклу з заданими наступними параметрами: $p_1 = 0,7$ МПа; $v_2 = 5,0 \text{ м}^3/\text{кг}$; $x_1 = 0,91$; $x_3 = 0,93$ і наступними термодинамічними процесами, з яких складається даний цикл:

1-2 $\rightarrow T = \text{const}$, при цьому процес починається в області вологої насиченої пари, а закінчується в області перегрітої пари;

2 – 3 → $v = const$, при цьому початок процесу в області перегрітої пари, а кінець - в області вологої насиченої пари;

3–4 → $p = const$, весь процес в області вологої насиченої пари;

4 – 1 → $\bar{S} = const$, весь процес в області вологої насиченої пари.

Ескіз термодинамічного парового циклу представлено на рисунку 4.1.

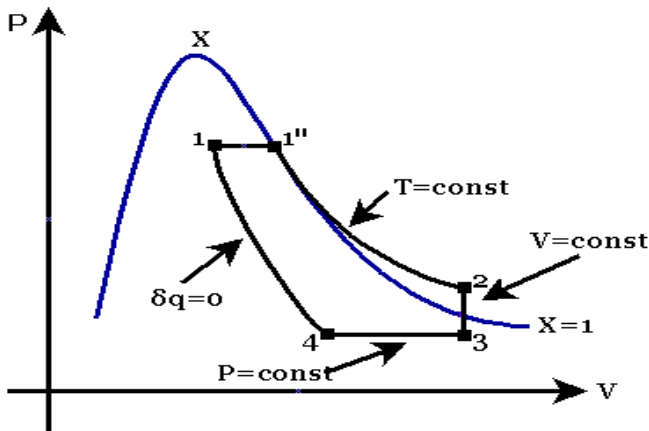


Рисунок 4.1 - Ескіз термодинамічного парового циклу

4.1 Розрахунок p , v , T в основних точках циклу

Розрахунок p , v , T в основних точках циклу проведемо, використовуючи h , S - діаграму водяної пари, таблиці параметрів насиченої водяної пари, а також співвідношення для визначення цих параметрів в області вологої насиченої та перегрітої пари (Додаток В).

Точка 1

Дано: $p_1 = 0,7$ МПа; $x_1 = 0,91$. Визначити v_1, T_1 .

$$v_1 = v'' \cdot x_1 + v'(1 - x_1) = 0,2728 \cdot 0,91 + 0,0011081 (1 - 0,91) = 0,248 \text{ м}^3/\text{кг},$$

де v'', v' - питомі об'єми відповідно сухої пари та води на лінії насичення, беруться з таблиці [4]; x_1 - міра сухості пари.

З таблиці [4] беремо відповідні p_1 , значення температури $t_1 = 164,96$ °С $T_1 = 438,1$ К.

Точка 2

Дано: $t_1 = 164,96$ °С ; $T_1 = 438,1$ К; $v_2 = 5,0$ м³/кг. Визначити p_2 .

Так як процес 1-2 ізотермічний, то маємо: $\frac{p_2}{p_1} = \frac{v''}{v_2}$, отже

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{v''}{v_2} = 0,7 \cdot \frac{0,2728}{5,0} = 0,0382 \text{ МПа},$$

де p'_1 - тиск в т.1 на лінії насичення сухої пари, що дорівнює p_1 .

Точка 3

Дано: $v_2 = v_3 = 5,0$ м³/кг; $x_3 = 0,93$. Визначити p_3, T_3 .

З h, S - діаграми знаходимо $p_3 = 0,03$ МПа. З таблиці [4] беремо відповідне p_3 значення температур $t_3 = 69,12$ °С ; $T_3 = 342,3$ К.

Точка 4

Дано: $p_4 = p_3 = 0,03$ МПа; $t_4 = t_3 = 69,12$ °С ; $T_4 = 342,3$ К.

Визначити v_4 .

З h, S - діаграми знаходимо $v_4 = 4,1$ м³/кг.

Результати визначення зведемо у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 - Результати розрахунку основних параметрів

Точки	p , МПа	v , м ³ /кг	T , К
1	0,7	0,248	438,1
2	0,0382	5,0	438,1
3	0,030	5,0	342,3
4	0,030	4,1	342,3

4.2 Визначення u , h , S в основних точках циклу

Визначення u , h , S в основних точках циклу проведемо, використовуючи h , S - діаграму водяної пари, таблиці параметрів насиченої водяної пари, а також співвідношення для розрахунків цих параметрів в області вологої насиченої та перегрітої пари (див. Додаток В).

Точка 1

Дано: $p_1 = 0,7$ МПа; $v_1 = 0,248$ м³/кг; $T_1 = 438,1$ К; $\chi_1 = 0,91$.
Визначити: h_1 , u_1 , S_1 .

$$h_1 = h'_1 + r \cdot \chi_1 = 697,2 + 2067 \cdot 0,91 = 2578,2 \text{ кДж/кг},$$

де h'_1 - ентальпія води на лінії насичення, береться з таблиці [4];
 r - теплота пароутворення, також як і h' беремо з таблиці [4], при цьому обидві величини вибирають згідно тиску p_1 .

$$u_1 = h_1 - p_1 \cdot v_1 = 2578,2 - 0,7 \cdot 10^3 \cdot 0,248 = 2404,6 \text{ кДж/кг};$$

$$S_1 = S' + (S'' - S') \cdot \chi_1 = 1,992 + (6,709 - 1,992) \cdot 0,91 = 6,28 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)},$$

де S' , S'' - відповідно питомі ентропії води і сухої пари на лінії насичення, беремо із таблиці [4].

Точка 2

Дано: $p_2 = 0,382$ МПа; $v_2 = 5,0$ м³/кг; $T_2 = 438,1$ К. Визначити: h_2 ; u_2 ; S_2 .
З h , S - діаграми беремо значення питомої ентальпії т.2 $h_2 = 810$ кДж/кг

$$u_2 = h_2 - p_2 \cdot v_2 = 810 - 0,382 \cdot 10^3 \cdot 5,0 = 2619 \text{ кДж/кг}.$$

З h , S -діаграми беремо значення питомої ентропії т.2 $S_2 = 8,11$ кДж/(кг·К).

Точка 3

Дано: $p_3 = 0,03$ МПа; $v_3 = 5,0$ м³/кг; $T_3 = 342,3$ К; $x_3 = 0,93$.

Визначити: h_3 ; u_3 ; S_3

$$h_3 = h'_3 + r \cdot x_3 = 289,3 + 2336 \cdot 0,93 = 2461,8 \text{ кДж/кг},$$

де h'_3 - ентальпія води на лінії насичення, беремо із таблиці[4];

$$h'_3 = 289,3 \text{ кДж/кг}.$$

$$u_3 = h_3 - p_3 \cdot v_3 = 2461,8 - 0,03 \cdot 10^3 \cdot 5,0 = 2311,8 \text{ кДж/кг};$$

$$S_3 = S' + (S'' - S') \cdot x_3 = 0,9441 + (7,769 - 0,9441) \cdot 0,93 = 7,29 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Точка 4

Дано: $p_4 = 0,03$ МПа; $v_4 = 4,1$ м³/кг; $T_4 = 342,3$ К. Визначити:

h_4 ; u_4 ; S_4 . З h , S - діаграми беремо значення питомої ентальпії т.4; $h_4 = 2115$ кДж/кг.

$$u_4 = h_4 - p_4 \cdot v_4 = 2115 - 0,03 \cdot 10^3 \cdot 4,1 = 1992 \text{ кДж/кг};$$

$$S_4 = S_1 = 6,28 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Результати визначення термічних параметрів робочого тіла в основних точках зведемо у таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку калориметричних параметрів

Точки	u , кДж/кг	h , кДж/кг	S , кДж/(кг·К)
1	2404,6	2578,2	6,28
2	2619,0	2810,0	8,11
3	2311,8	2461,8	7,29
4	1992,0	2115,0	6,28

4.3 Визначення $q_{пр}$, Δu , Δh , ΔS , $l_{пр}$ для кожного процесу

Визначимо $q_{пр}$, Δu , Δh , ΔS , $l_{пр}$ для кожного процесу парового циклу наступним чином.

Процес 1-2. Ізотермічний

$$q_{1-2} = T_1 \cdot (S_2 - S_1) = 438,1 \cdot (8,11 - 6,28) = 801,7 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta u_{1-2} = u_2 - u_1 = 2619 - 2404,6 = 214,4 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta h_{1-2} = h_2 - h_1 = 2810 - 2578,2 = 231,8 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta S_{1-2} = S_2 - S_1 = 8,11 - 6,28 = 1,83 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)};$$

$$l_{1-2} = q_{1-2} - \Delta u_{1-2} = 801,7 - 214,4 = 587,3 \text{ кДж/кг}.$$

Процес 2-3. Ізохорний

$$q_{2-3} = \Delta u_{2-3} = u_3 - u_2 = 2311,8 - 2619 = -307,2 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta h_{2-3} = h_3 - h_2 = 2461,8 - 2810 = -348,2 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta S_{2-3} = S_3 - S_2 = 7,29 - 8,11 = -0,82 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)};$$

$$l_{2-3} = 0.$$

Процес 3-4. Ізобарний

$$q_{3-4} = \Delta h_{3-4} = h_4 - h_3 = 2115 - 2461,8 = -346,8 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta u_{3-4} = u_4 - u_3 = 1992 - 2311,8 = -319,8 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta S_{3-4} = S_4 - S_3 = 6,28 - 7,29 = -1,01 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)};$$

$$l_{3-4} = q_{3-4} - \Delta u_{3-4} = -346,8 + 319,8 = -27,0 \text{ кДж/кг}.$$

Процес 4-1. Адіабатний

$$q_{4-1} = 0;$$

$$\Delta u_{4-1} = u_1 - u_4 = 2404,6 - 1992 = 412,6 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta h_{4-1} = h_1 - h_4 = 2578,2 - 2115 = 463,2 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta S_{4-1} = 0;$$

$$l_{4-1} = -\Delta u_{4-1} = -412,6 \text{ кДж/кг}.$$

Результати розрахунку q , Δu , Δh , ΔS , l зведемо в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 - Результати розрахунку параметрів процесів циклу

Процеси	Δu , кДж/кг	Δh , кДж/кг	ΔS , кДж/(кг·К)	q , кДж/кг	l , кДж/кг
1 - 2	214,4	231,8	1,83	801,7	587,3
2 - 3	-307,2	-348,2	-0,82	-307,2	0
3 - 4	-319,8	-346,8	-1,01	-346,8	-27,0
4 - 1	412,6	463,2	0	0	-412,6
Сума	0	0	0	147,6	147,7

4.4 Побудова парового циклу в координатах $p - v$; $T - S$; $h - S$

4.4.1 В координатах $p - v$ паровий цикл представлений на рисунку 4.2.

В координатах $p - v$, як виходить із завдання, процес 1-2 ізотермічний. Отже в області вологої насиченої пари він зображується відрізком горизонтальної прямої (1-1''), яка, як звісно, є одночасно і ізобарою. В області перегрітої пари вона переходить в гіперболічну криву (1''-2), більш рівну, ніж рівнобока гіпербола (ізотерма ідеального газу).

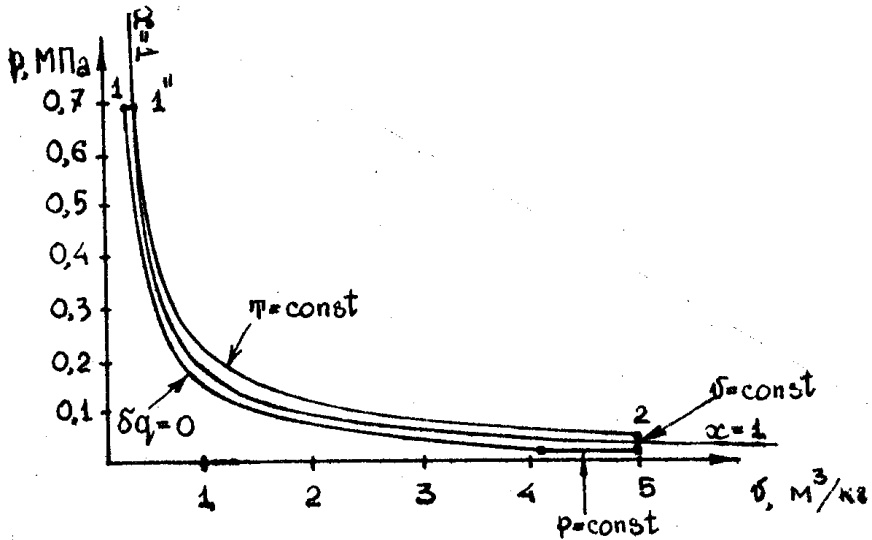


Рисунок 4.2 - Паровий цикл в координатах $p - v$

Процес 2–3 - ізохорний, тому він зображується відрізком вертикальної прямої (2 – 3).

Процес 3-4 - ізобарний. Отже він зображується горизонтальною прямою (3 – 4).

Процес 4-1 -адиабатний. На p,v -діаграмі адиабатний процес представляє з себе криву, яка являється нерівнобічною гіперболою. Як звісно, значення показника адиабати різні для перегрітої та вологої насиченої пари. В області вологої насиченої пари показник адиабати k знаходимо з формули

$$k = 1,035 + 0,1 \cdot x.$$

При цьому значення міри сухості вологої пари при його розширенні приймається при початковому, а при стисненні - в кінцевому стані процесу.

Для адиабати, яка починається або закінчується на верхній прикордонній кривій сухої пари $x = 1,0; k = 1,135$.

Для адіабати, яка повністю розташована в області перегрітої пари $k = 1,3$. Тому на p, v – діаграмі на лінії сухої пари адіабата має перегин.

4.4.2 В координатах $T - S$ паровий цикл представлений на рисунку 4.3

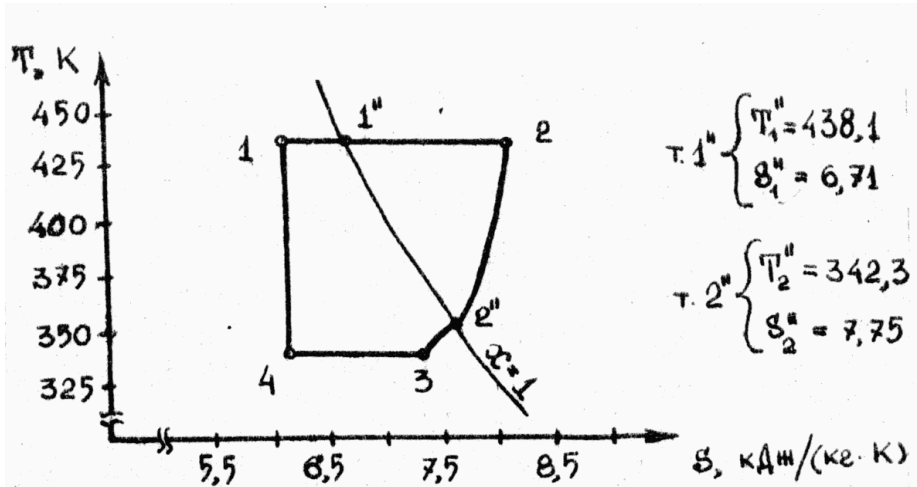


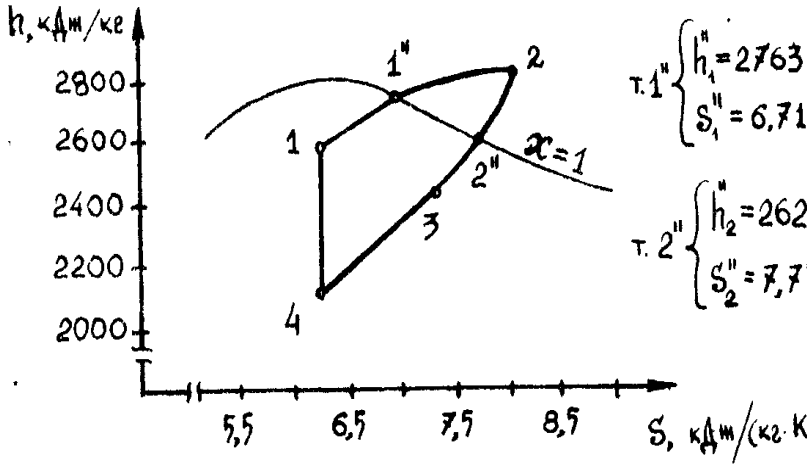
Рисунок 4.3 - Цикл в координатах $T - S$

Як виходить із завдання процес 1-2 – ізотермічний. Отже він цілком зображується відрізком горизонтальної прямої - (1-2).

Процес 2-3 - ізохорний, тому що в області вологої насиченої пари цей процес зображується кривою лінією спрямованою випуклістю вверх (3-2''), а в області перегрітої пари - випуклістю до низу (2''-2).

Процес 3-4 ізобарний. В області вологої насиченої пари ізобара, як звісно, є одночасно і ізотермою, тому що в цій області процес зображується прямою горизонтальною лінією (3-4). Якщо би процес продовжувався в області перегрітої пари, то він відображався би кривою, яка піднята уверх і спрямована випуклістю донизу.

Процес 4-1 - адіабатний. Отже на діаграмі він відображається відрізком вертикальної прямої (4-1), оскільки протікає при незмінності ентропії.

Рисунок 4.4 - Цикл в координатах h - S

4.4.3 в координатах h - S цикл відображається на рисунку 4.4.

Із завдання виходить, що процес 1-2 ізотермічний, тому в області вологої пари він має собою нахилену пряму, яка одночасно є ізобарою (1-1''), а в області перегрітої пари – криву, спрямовану випуклістю доверху (1''-2). Ця крива повинна підійматися з ліво праворуч та по мірі віддалення від прикордонної кривої асимптотично наближатися до горизонталі.

Процес 2-3 - ізохорний. Отже, в області вологої насиченої пари процес зображується кривою, вельми близькою до похилої прямої (3-2''), а в області перегрітої пари - кривою, спрямованою випуклістю донизу (2''- 2).

Процес 3-4 – ізобарний. Тому він в області вологої насиченої пари відображається похилою прямою (3-4), яка одночасно є і ізотермою. В області перегрітої пари вона б перейшла у криву, звернену випуклістю донизу.

Процес 4-1 - адіабатний. Отже, на діаграмі він відображається відрізком вертикальної прямої (4-1), оскільки проходить при незмінності ентропії.

4.5 Визначення підведеної q_1 та відведеної q_2 теплоти у циклі, роботи циклу l_u , термічного ККД циклу η_t , середнього індикаторного тиску p_i

Підведена теплота в даному паровому циклі ,кДж/кг

$$q_1 = q_{1-2} = 801,7.$$

Відведена теплота в даному паровому циклі ,кДж/кг

$$q_2 = q_{2-3} + q_{3-4} = (-307,2) + (-346,8) = -654.$$

Питому роботу циклу знаходимо так ,кДж/кг

$$l_u = q_1 - q_2 = 801,7 - 654 = 147,7.$$

Термічний ККД циклу знаходимо наступним чином

$$\eta = \frac{l_u}{q_1} = \frac{147,7}{801,7} = 0,184.$$

Середній індикаторний тиск знаходимо наступним чином ,кПа

$$p_i = \frac{l_u}{v_{max} - v_{min}} = \frac{147,7}{(5,0 - 0,248)} = 31,8.$$

4.6 Визначення параметрів заданої точки розрахунковим шляхом та за допомогою h, S – діаграми

Для позначеної точки 4 (на схемі дана в прямокутнику) за допомогою таблиці водяної пари, та по h, S -діаграмі знайдемо та порівняємо $v_x, u_x, h_x, S_x, r_x, \psi_x, \rho_x$.

Для точки 4, розміщеної в області вологої насиченої пари на ізобарі з тиском $P_4=0,03$ МПа, із таблиці[4] маємо

$$T_4 = 342,3 \text{ K}; \quad t_4 = 69,12 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad v' = 0,00102 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad v'' = 5,226 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$h' = 289,3 \text{ кДж/кг}; \quad h'' = 2625 \text{ кДж/кг}; \quad r = 2336 \text{ кДж/кг};$$

$$S'' = 0,9441 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)}; \quad S' = 7,769 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)}.$$

Отже знаходимо

$$x = \frac{v_4 - v'}{v'' - v'} = (4,1 - 0,00102) / (5,226 - 0,00102) = 0,784;$$

$$h_4 = h' + x \cdot (h'' - h') = 289,3 + 0,784 \cdot (2625 - 289,3) = 2120,5 \text{ кДж/кг};$$

$$S_4 = S' + x \cdot (S'' - S') = 0,9441 + 0,784 \cdot (7,769 - 0,9441) = 6,29 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)};$$

$$r_4 = x \cdot r = 0,784 \cdot 2336 = 1831,4 \text{ кДж / кг};$$

$$u_4 = h_4 - p_4 \cdot v_4 = 2120,5 - 0,03 \cdot 10^3 \cdot 4,1 = 1997,5 \text{ кДж/кг};$$

$$\psi_4 = x \cdot \psi = 0,784 \cdot 156,75 = 122,89 \text{ кДж/кг};$$

$$\psi = l'' = p_4 \cdot (v'' - v') = 0,03 \cdot 10^3 \cdot (5,226 - 0,00102) = 156,75 \text{ кДж/кг},$$

$$\rho_4 = r_4 - \psi_4 = 1831,4 - 122,89 = 1708,5 \text{ кДж/кг}.$$

Результати розрахунку зведемо в таблицю 4.4. А також до цієї таблиці зведемо ці ж параметри, які визначені за допомогою h , S - діаграми.

Таблиця 4.4 - Зведена таблиця параметрів т.4

Параметри	Розрахункові	З діаграми
v_4 , кДж/кг	4,10	4,0
h_4 , кДж/кг	2120,5	2120
u_4 , кДж/кг	1997,5	2000
S_4 , кДж/(кг·К)	6,29	6,29
r_4 , кДж/кг	1831,4	-
ψ_4 , кДж/кг	156,75	-
ρ_4 , кДж/кг	1708,5	-

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. Ривкин С.Л.,Александров А.А.Термодинамические свойства воды и водяного пара:справочник. Москва: Энергоатомиздат, 1984. 80 с.
5. Вяла А., Благовістна В., Меньяйлов С. Молекулярна фізика й термодинаміка. Київ: НАУ-друк, 2010. 192 с.
6. Воловік П.М. Фізика для університетів. Київ:Перун,2005. 864с.
7. Константинов 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. Константинов 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. Беляєв 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 тепломассообмена. 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., КожинОВ 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.

18. Малишев В.В., Крєтов В.В., Гладка Т.М. Технічна термодинаміка та теплопередача. Київ: Університет «Україна», 2015. 258 с.

Додаток А

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

РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА
ПО ТЕХНІЧНІЙ ТЕРМОДИНАМІЦІ

Тема: РОЗРАХУНОК ПАРОВОГО ЦИКЛУ

Варіант № _____

Завдання видане «___» _____ 202__ р.

Строк здачі виконаного завдання «___» _____ 202__ р.

Завдання захищене «___» _____ 202__ р.

Оцінка _____

Виконав _____ ст. _____ гр.
(підпис) _____

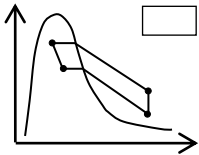
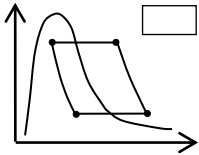
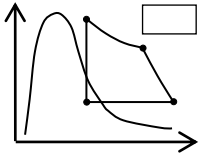
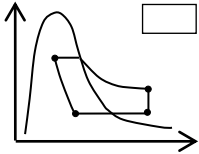
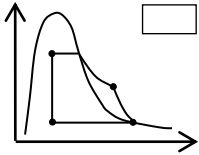
—

Прийняв (вчене звання, ступінь) _____ (підпис) _____

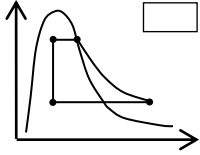
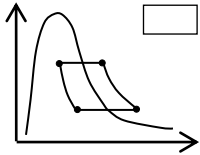
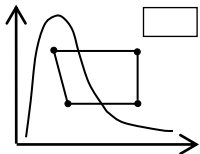
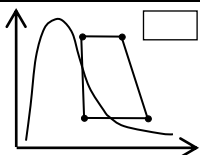
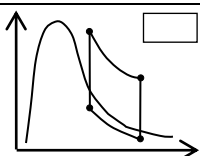
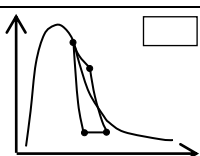
Запоріжжя, _____ р.

Додаток Б

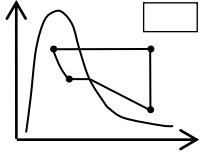
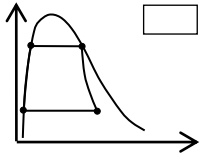
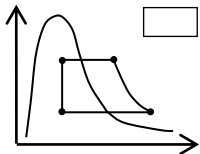
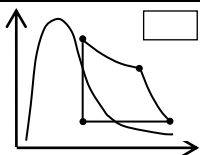
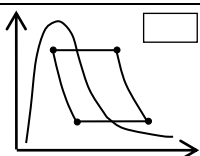
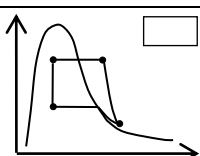
Таблиця Б-1 – Дані до завдання

№ вар.	Схема циклу	Задані параметри в основних точках циклу: p , МПа, v , м ³ /кг, T , К				Тип процесу			
						1-2	2-3	3-4	4-1
1		$p_1 = 8,0$	$v_1 = 0,02$	$p_2 = 4,0$	$p_4 = 6,8$	T	V	T	S
2		$p_1 = 1,2$	$x_1 = 0,95$	$T_2 = 613$	$p_3 = 0,2$	p	S	p	S
3		$p_1 = 1,5$	$T_1 = 523$	$p_2 = 1,1$	$p_4 = 0,8$	T	S	p	V
4		$p_2 = 0,5$	$T_3 = 433$	$v_3 = 0,5$	$x_4 = 0,79$	T	V	p	S
5		$p_1 = 2,5$	$v_2 = 0,115$	$p_4 = 1,4$	$x_1 = 0,98$	T	S	p	V

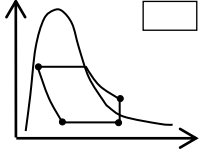
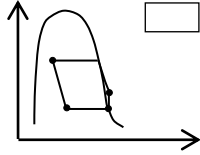
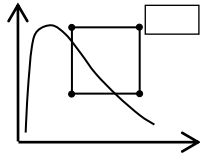
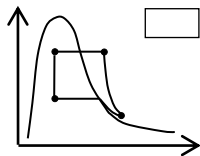
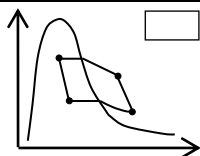
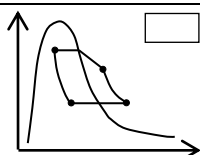
Продовження таблиці Б.1

№ вар.	Схема циклу	Задані параметри в основних точках циклу: p , МПа, v , м ³ /кг, T , К				Тип процесу			
		1- 2	1- 2	1- 2	1- 2	1- 2	1- 2	1- 2	1- 2
6		$p_1 = 2,0$	$x_1 = 0,93$	$p_3 = 1,5$	—	p	T	p	V
7		$p_1 = 1,9$	$x_1 = 0,94$	$T_2 = 513$	$p_3 = 0,4$	p	T	p	S
8		$p_1 = 1,9$	$x_1 = 0,85$	$v_2 = 0,14$	$p_3 = 1,5$	p	V	p	S
9		$p_1 = 0,8$	$T_1 = 493$	$T_2 = 996$	$T_4 = 363$	p	S	V	S
10		$v_1 = 0,025$	$T_1 = 713$	$v_2 = 0,2$	$x_3 = 0,8$	T	V	S	V
11		$p_1 = 2,7$	$v_2 = 0,3$	$p_4 = 0,25$	—	T	S	p	S

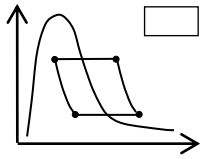
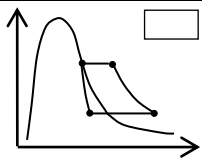
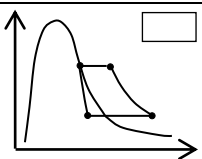
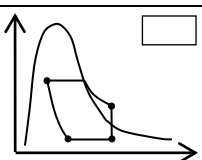
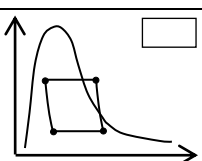
Продовження таблиці Б.1

№ вар.	Схема циклу	Задані параметри в основних точках циклу: p , МПа, v , м ³ /кг, T , К				Тип процесу			
		1- 2	2- 3	3- 4	4- 1	1- 2	2- 3	3- 4	4- 1
12		$p_1 = 0,9$	$x_1 = 0,9$	$v_2 = 0,3$	$T_4 = 433$	p	S	T	S
13		$p_1 = 1,2$	$p_3 = 0,12$	—	—	p	S	p	—
14		$p_1 = 0,2$	$v_1 = 0,6$	$T_3 = 573$	$p_2 = 0,3$	V	p	S	p
15		$p_1 = 1,6$	$T_1 = 528$	$p_2 = 1,3$	$p_4 = 1,1$	T	S	p	V
16		$v_1 = 0,12$	$x_1 = 0,96$	$T_2 = 613$	$T_3 = 493$	p	S	p	S
17		$v_1 = 0,2$	$x_1 = 0,97$	$T_2 = 473$	$p_4 = 0,8$	p	S	T	V

Продовження таблиці Б.1

№№ вар.	Схема циклу	Задані параметри в основних точках циклу: p , МПа, v , м ³ /кг, T , К				Тип процесу			
		1- 2	2- 3	3- 4	4- 1	1- 2	2- 3	3- 4	4- 1
18		$p_1 = 0,9$	$x_1 = 0,95$	$v_2 = 3,0$	$x_3 = 0,98$	T	V	p	S
19		$p_1 = 1,0$	$x_1 = 0,92$	$p_3 = 0,5$	—	T	S	p	S
20		$p_1 = 0,7$	$x_1 = 0,82$	$p_2 = 0,9$	$T_3 = 613$	V	p	V	p
21		$p_1 = 0,4$	$x_1 = 0,93$	$T_2 = 573$	$p_4 = 0,2$	p	S	T	V
22		$T_1 = 479$	$p_3 = 0,12$	$T_3 = 433$	$x_4 = 0,81$	T	S	T	S
23		$T_1 = 523$	$x_1 = 0,88$	$p_2 = 0,9$	$p_3 = 0,5$	T	S	p	S

Продовження таблиці Б.1

№ вар.	Схема циклу	Задані параметри в основних точках циклу: p , МПа, V , м ³ /кг, T , К				Тип процесу			
						1- 2	2- 3	3- 4	4- 1
24		$p_1 = 1,2$	$x_1 = 0,96$	$T_2 = 615$	$p_3 = 0,16$	p	T	p	S
25		$p_1 = 3,2$	$T_2 = 633$	$p_3 = 0,9$	—	p	T	p	S
26		$p_1 = 1,0$	$T_2 = 693$	$p_3 = 0,15$	—	p	S	p	S
27		$p_1 = 0,7$	$x_1 = 0,91$	$V_2 = 5,0$	$x_3 = 0,93$	T	V	p	S
28		$p_1 = 1,7$	$x_1 = 0,87$	$T_2 = 590$	$p_4 = 0,19$	p	S	p	S

Типи процесів:

- $p \rightarrow p = \text{const};$
- $V \rightarrow V = \text{const};$
- $T \rightarrow T = \text{const};$
- $S \rightarrow \delta q = 0.$

