

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

# **ТЕПЛОТЕХНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ**

## **РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПАРОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ**

### **Рекомендації до виконання розрахункової роботи**

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра  
за освітньою програмою «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології»  
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Укладач: М.М. Шовкалюк

Електронне мережеве навчальне видання

Київ  
КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО  
2024

УДК 697.1

Укладач: *Шовкалюк Марина Михайлівна, канд. техн. наук, доц.*

Рецензент: *Яценко Олена Ігорівна, д-р філософії*

Відповідальний редактор: *Бориченко Олена Володимирівна, канд. техн. наук, доц.*

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 4 від 01.02.2024 р.)  
за поданням вченої ради навчально-наукового інституту ІЕЕ  
(протокол № 7 від 28 грудня 2023 р.)*

Теплотехнічне обладнання та енергоефективні технології виробництва теплової енергії. Розрахунок енергетичної ефективності паротурбінної установки [Електронний ресурс] : рек. до виконання розрахунк. роботи : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Системи забезпечення споживачів електричною енергією» спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: М.М.Шовкалюк – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 35 с.

У представленому посібнику викладено основні положення щодо виконання розрахункової роботи навчальної дисципліни «Теплотехнічне обладнання та енергоефективні технології виробництва теплової енергії». Метою видання є закріплення знань, отриманих у процесі вивчення дисципліни, отримання практичного досвіду визначення параметрів у розрахункових точках циклу ПТУ, проведення розрахунків енергетичних характеристик роботи енергетичного обладнання ПТУ та аналіз ефективності її експлуатації. Навчальне видання до виконання розрахункової роботи містить вказівки до виконання розрахунків та включає індивідуальні завдання, приклад вирішення та необхідні додатки. Навчальне видання призначене для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка за освітньою програмою «Системи забезпечення споживачів електричною енергією».

УДК 697.1

Реєстр. № НП 23/24-272. Обсяг 1,7 авт. арк.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056  
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів  
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024

## **ЗМІСТ**

|                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ВСТУП.....</b>                                                    | <b>4</b>  |
| <b>1 ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ.....</b>                                   | <b>5</b>  |
| <b>1.1 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ .....</b>                                   | <b>5</b>  |
| <b>1.2 ПТУ, ЩО ПРАЦЮЄ ЗА ЦИКЛОМ РЕНКІНА .....</b>                    | <b>6</b>  |
| <b>1.2.1 СХЕМА УСТАНОВКИ .....</b>                                   | <b>6</b>  |
| <b>1.2.2 РОЗРАХУНКОВІ ЗАЛЕЖНОСТІ.....</b>                            | <b>9</b>  |
| <b>1.2.2.1 ПИТОМІ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....</b>                            | <b>9</b>  |
| <b>1.2.2.2 ЕНЕРГЕТИЧНІ БАЛАНСИ.....</b>                              | <b>11</b> |
| <b>1.3 ЦИКЛ З ПРОМІЖНИМ ПЕРЕГРІВОМ ПАРИ.....</b>                     | <b>14</b> |
| <b>1.4 ЦИКЛ З РЕГЕНЕРАТИВНИМ ПІДГРІВОМ ЖИВИЛЬНОЇ ВОДИ .....</b>      | <b>17</b> |
| <b>2 ЗАВДАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ ТА ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ .....</b> | <b>21</b> |
| <b>2.1 МЕТА ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ .....</b>                         | <b>21</b> |
| <b>2.2 ПРИКЛАД ПРОВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКІВ.....</b>                       | <b>24</b> |
| <b>2.3 ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ РОБОТИ.....</b>                          | <b>29</b> |
| <b>КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ .....</b>                                    | <b>31</b> |
| <b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....</b>                                 | <b>32</b> |
| <b>ДОДАТОК А.....</b>                                                | <b>33</b> |
| <b>ДОДАТОК Б .....</b>                                               | <b>35</b> |

## ВСТУП

Навчальне видання створено для виконання розрахункової роботи «Розрахунок енергетичної ефективності паротурбінної установки». В процесі виконання розрахункової роботи студенти повинні виконати розрахунки енергетичних характеристик і балансів циклу паротурбінної установки, що працює за циклом Ренкіна. Видання містить вказівки до виконання розрахунків та включає індивідуальні завдання, приклад вирішення та необхідні додатки.

Метою видання є закріплення знань, отриманих у процесі вивчення дисципліни «Теплотехнічне обладнання та енергоефективні технології виробництва теплової енергії», отримання практичного досвіду визначення параметрів у розрахункових точках циклу ПТУ, проведення розрахунків енергетичних характеристик роботи енергетичного обладнання ПТУ та аналіз ефективності її експлуатації.

Матеріал навчального видання дозволить розвинути самостійну, пізнавальну діяльність студентів, що ґрунтується на вміннях застосовувати знання на практиці.

Навчальне видання містить:

- теоретичні відомості;
- завдання на розрахункову роботу,
- вимоги до оформлення роботи,
- приклад вирішення завдань,
- вказівки по роботі з  $h-s$  -діаграмою,
- індивідуальні завдання,
- контрольні запитання,
- список використаної літератури.

Навчальне видання призначене для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка за освітньою програмою «Системи забезпечення споживачів електричною енергією».

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

## 1.1 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ

Паротурбінні установки слугують для перетворення теплоти згорання природного палива в роботу і використовують в якості робочого тіла пару (зазвичай водяну пару). Електростанції, що працюють за циклом Ренкіна, називають конденсаційними (КЕС); суттєвим їх недоліком є значні втрати теплоти з охолоджуючою водою в конденсаторі. Для підвищення ефективності використання теплоти використовують комбіноване виробництво електричної і теплової енергії (теплофікацію). Електростанції, що здійснюють теплофікацію промислових підприємств та житлових мікрорайонів, називаються ТЕЦ (теплоелектроцентралями). ТЕЦ від КЕС відрізняються тим, що в них встановлені теплофікаційні турбіни, що працюють з протитиском або з теплофікаційними відборами пари. Турбіна з протитиском працює за вільним тепловим і вимушеним електричним графіком [1].

На сучасних конденсаційних електричних станціях електрична енергія виробляється на базі конденсаційних турбін типу К різними методами [1-3]: конденсаційним (цикл Ренкіна, цикл з проміжним перегрівом пари); конденсаційним і комбінованим на базі регенеративного підігріву конденсату (регенеративний цикл). Цикли з проміжним перегрівом пари (при правильному виборі параметрів пари в проміжному пароперегрівачі), регенеративний та їх поєднання мають більш високий ККД, ніж цикл Ренкіна [2].

В якості основного циклу зазвичай застосовують *цикл Ренкіна*, який має ряд особливостей: можливість використання перегрітої пари, отриманої в ізобарному процесі підведення теплоти; повна конденсація відпрацьованої пари в ізобарно-ізотермічному відведенні теплоти; підвищення тиску рідини (води) за допомогою насоса.

## 1.2 ПТУ, ЩО ПРАЦЮЄ ЗА ЦИКЛОМ РЕНКІНА

### 1.2.1 СХЕМА УСТАНОВКИ

Спрощена схема паротурбінної установки (ПТУ), що працює за циклом Ренкіна, зображена на рис. 1. Вода під підвищеним тиском надходить до парогенератору, який умовно можна представити з трьох складових елементів: водяного економайзера, що призначений для підігріву води до стану кипіння; котельної установки, що слугує для отримання сухої насиченої пари; пароперегрівача – для отримання перегрітої пари необхідної температури.

Перелічені процеси відбуваються за рахунок теплоти ( $q_1$ ), що виділяється під час спалювання органічного палива з нижчою робочою теплотою згорання  $Q_{\text{н}}^p$  в парогенераторі. Після парогенератора пара з заданими параметрами надходить у турбіну, де, адіабатно розширюючись, виконує роботу ( $l$ ). На валу турбіни знаходиться електрогенератор. Відпрацьована в турбіні пара, що має тиск і температуру значно нижче, ніж перед турбіною, надходить до конденсаційної установки, що є теплообмінним апаратом, призначеним для перетворення вологої насиченої пари на воду. Теплота ( $q_2$ ), що виділяється під час конденсації пари, відводиться за рахунок охолоджувальної води. Після конденсаційної установки вода має практично температуру насичення. Після живильного насосу відбувається адіабатне підвищення тиску, після чого вода знову надходить до парогенератору.

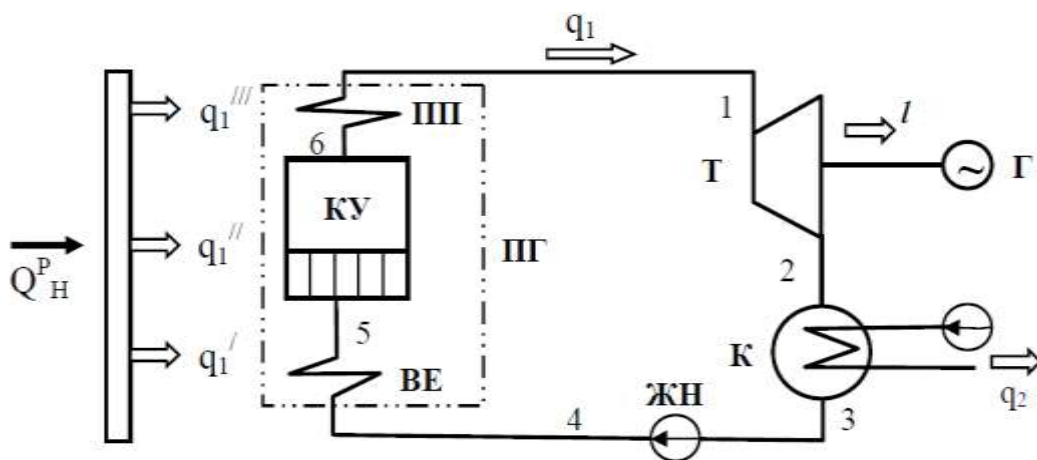


Рисунок 1 — Схема ПТУ, що працює за циклом Ренкіна [5]

### **Позначення:**

Т – турбіна;

Г – електрогенератор;

К – конденсаційна установка;

ЖН – живильний насос;

ВЕ – водяний економайзер;

КУ – котельна установка;

ПП – пароперегрівач;

ПГ – парогенератор.

### **Параметри в точках:**

Т.1 – ПП (перегріта пара);

Т.2 – ВНП ( $0 < x < 1$ , волога насичена пара);

Т.3 – КВ ( $x=0$ , кипляча вода);

Т.4 – НВ (недогріта вода);

Т.5 – КВ ( $x=0$ , кипляча вода);

Т.6 – СНП ( $x=1$ , суха насичена пара).

### **Процеси циклу:**

1-2 – адіабатне розширення пари в турбіні ( $q=0$ );

2-3 – відведення теплоти в конденсаційній установці ( $p=\text{const}$ ,  $t=\text{const}$ ,  $t_3 \approx t_n(p_2)$ );

3-4 – адіабатне підвищення тиску в насосі ( $v_3=v_4$ ,  $p_4 > p_3$ );

4-5-6-1 – підведення теплоти в парогенераторі ( $p=\text{const}$ ,  $p_4=p_5=p_6=p_1$ );

4-5 – нагрів води в економайзері,  $t_4 < t_n(p_2)$ ,  $t_5 = t_n(p_1)$ ;

5-6 – процес пароутворення ( $p=\text{const}$ ,  $t=\text{const}$ ;  $p_5=p_6=p_1$ ,  $t_5=t_6=t_n(p_1)$ );

6-1 – процес утворення перегрітої пари.

Нижче на рис. 2 на  $p$ - $v$  і  $T$ - $s$  діаграмах показані вищезазначені процеси для 1 кг робочого тіла у вигляді циклу 1-2-3-4-5-6-1.

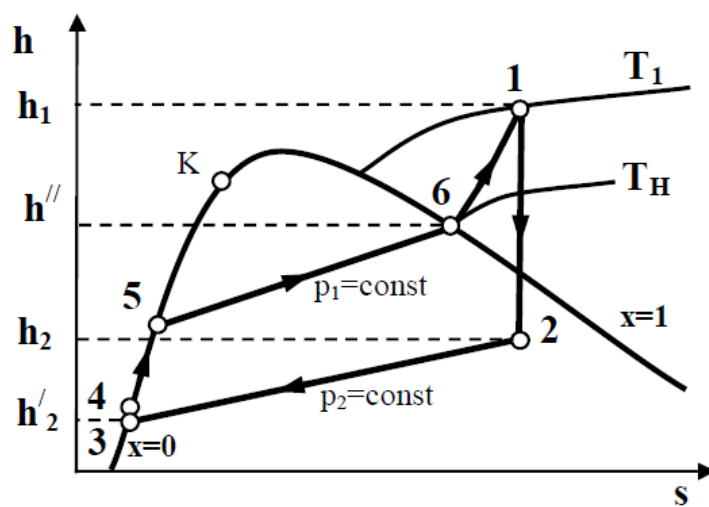
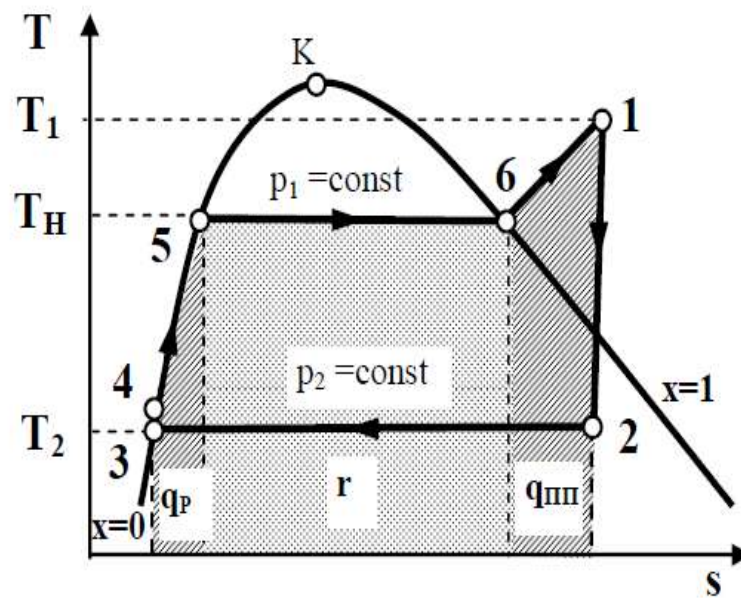
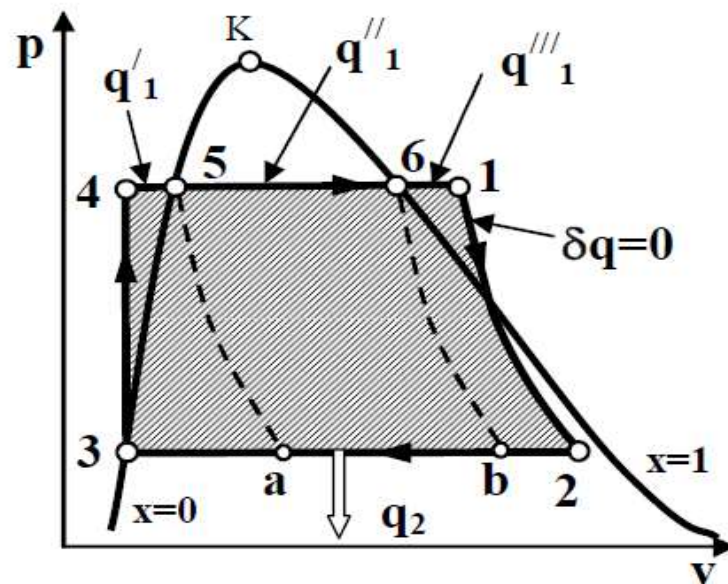


Рисунок 2 — Цикл ПТУ в  $p$ - $v$   $T$ - $s$  і  $h$ - $s$  діаграмах [5]

## 1.2.2 РОЗРАХУНКОВІ ЗАЛЕЖНОСТІ

### 1.2.2.1 ПИТОМІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1) Теплота підводу(процес 4-1) в парогенераторі, кДж/кг:

$$q_1 = \Delta h = h_1 - h_4 = h_1 - h'_2, \quad (1)$$

$$h_4 \approx h'_2 = h_3,$$

де  $q_1 = q'_1 + q''_1 + q'''_1$  – теплота, що підводиться парогенераторі, кДж/кг;

$h_1$  – ентальпія перегрітої пари на вході в турбіну, кДж/кг;

$h_4$  – ентальпія живильної води на вході в парогенератор, кДж/кг;

$h'_2 = c_{\phi} \cdot t_2$  – ентальпія конденсату з параметрами  $p_2$ ,  $t_2$  на виході з конденсаційної установки, кДж/кг;

$h_3$  – ентальпія робочого тіла після конденсаційної установки, кДж/кг.

*Утворення перегрітої пари* у парогенераторі складається з трьох процесів, а саме:

- нагрів води до температури насичення у водяному економайзері:

$$q_{45} = q'_1 = h_5 - h_4; \quad (2)$$

- пароутворення в котельній установці:

$$q_{56} = q''_1 = h_6 - h_5 = h'' - h' = T(s_6 - s_5); \quad (3)$$

- перегрів пари відносно температури насичення в пароперегрівачі:

$$q_{61} = q'''_1 = h_1 - h_6; \quad (4)$$

де  $q_{45} = q'_1$  – теплота, що підводиться до робочого тіла у водяному економайзері, кДж/кг;

$q_{56} = q''_1$  – теплота, що підводиться до робочого тіла у котельній установці, кДж/кг;

$q_{61} = q'''_1$  – теплота, що підводиться до робочого тіла в пароперегрівачі, кДж/кг;

$h_5$  – ентальпія робочого тіла на виході з економайзера,  $h_5 = h'(p_1)$ , кДж/кг;

$h_6$  – ентальпія робочого тіла на виході з котельної установки,  $h_6 = h''(p_1)$ , кДж/кг;

$T$  – абсолютна температура робочого тіла в котельній установці,  
 $T = T_5 = T_6 = T_n(p_1)$ , К;

$s_5, s_6$  – ентропія робочого тіла відповідно на вході та виході з котельної установки, кДж/(кг·К).

2) Теплота відводу ( процес 2-3) в конденсаційній установці, кДж/кг:

$$|q_2| = h_2 - h'_2, \quad (5)$$

де  $h_2$  – ентальпія робочого тіла на виході з турбіни та вході в конденсаційну установку, кДж/кг.

3) Робота циклу, кДж/кг:

$$l_u = l_{турб} - l_{нас},$$

де  $l_{турб} = h_1 - h_2$  – робота, яку виконує пара в турбіні («+»), кДж/кг;

$l_{нас} = h'_2 - h_4$  – робота підвищення тиску в насосі («-»), кДж/кг;

$l_{нас} \leq l_{турб}$ , приймаємо  $l_{нас} \approx 0 \Rightarrow h_4 \approx h'_2$ ,

тоді

$$l_u = l_{турб} = h_1 - h_2. \quad (6)$$

4) Термічний ККД ПТУ:

$$\eta_t = \frac{l_{турб}}{q_1} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h'_2} < 1. \quad (7)$$

5) Зміна ентропії робочого тілу в конденсаційній установці, кДж/(кг·К):

$$\Delta s_k = \frac{q_2}{T_2} = \frac{h_2 - h'_2}{T_2}, \quad (8)$$

де  $T_2$  – абсолютна температура робочого тіла в конденсаційній установці,

$$T_2 = T_3 = T_n(p_2), \text{ К.}$$

6) Теплота пароутворення, кДж/кг:

$$r = h'' - h' = h_6 - h_5, \quad (9)$$

7) Ентальпію пари після розширення в турбіні для реального циклу  $h_{2\partial}$ , кДж/кг, знаходимо графічно за допомогою  $h$ - $s$  діаграми.

Знаючи відносний внутрішній ККД проточної частини турбіни  $\eta_{oi}$ , можна визначити значення ентальпії в точці  $2\partial$ :

$$\eta_{oi} = \frac{l_{\partial}}{l_{турб}} = \frac{h_1 - h_{2\partial}}{h_1 - h_2} \Rightarrow h_{2\partial},$$

де  $l_{\partial}$  – питома робота турбіни реального циклу (дійсна робота), кДж/кг.

Для того, щоб визначити параметри на виході з турбіни для реального процесу, потрібно графічно визначити точку  $2\partial$ . З цією метою проводимо ізоентропу і знаходимо перетин ліній  $h_{2\partial}$  і  $P_2 \Rightarrow$  точка  $2\partial$ .

На робочій  $h$ - $s$  діаграмі можна показати лише частину циклу, що відповідає перегрітій і насиченій парі при великих значеннях ступеню сухості  $x$  (див. рис.3).

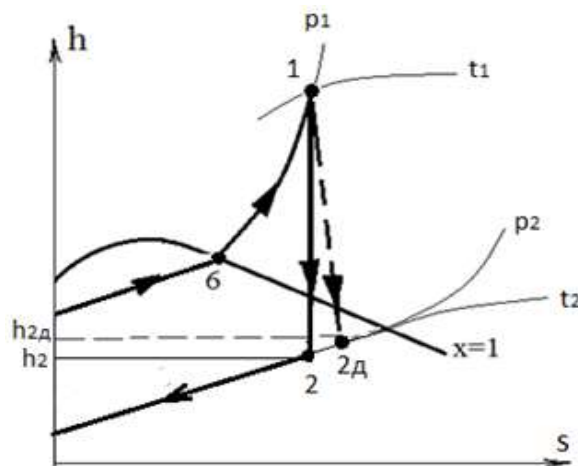


Рисунок 3 — Графічне знаходження ентальпії пари після турбіни для реального процесу

### 1.2.2.2 ЕНЕРГЕТИЧНІ БАЛАНСИ

**1) Енергетичний баланс турбіни:**

$$D \cdot l_{турб} \cdot \eta_{оел} = N_{ел}, \quad (10)$$

де

$D$  – витрата пари на турбіну, кг/с;

$N_{ел}$  – потужність електрогенератора, кВт;

$\eta_{оел}$  – відносний електричний ККД:

$$\eta_{оел} = \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_z, \quad (11)$$

де

$\eta_{oi}$  – внутрішній відносний ККД проточної частини турбіни;

$\eta_m$  – механічний ККД, який враховує витрати на тертя в підшипниках та ін.;

$\eta_z$  – ККД електрогенератора.

Питома витрата пари  $d$ , кг/кДж, з рівняння (10):

$$d = \frac{D}{N_{ел}} = \frac{1}{l_{турб} \cdot \eta_{оел}}. \quad (12)$$

Аналіз одиниць виміру рівняння (13):  $\left[ \frac{кг \cdot с}{с \cdot кДж} = \frac{кг}{кДж} \right]$ .

У випадку, якщо прийняти  $\eta_{оел}=1$ , останнє рівняння приймає вигляд:

$$d = \frac{1}{l_{турб}} = \frac{1}{h_1 - h_2}. \quad (13)$$

**2) Енергетичний баланс парогенератора:**

$$B \cdot Q_n^p \cdot \eta_{пг} = D \cdot q_1, \quad (14)$$

де

$B$  – витрата палива, кг/с;

$Q_n^p$  – нижча робоча теплота згорання 1 кг палива, кДж/кг;

$\eta_{пг}$  – ККД парогенератора.

Витрата пари на турбіну,  $D$ , кг/с визначаємо з рівняння (10):

$$D = \frac{N_{ел}}{l \cdot \eta_{оел}}. \quad (15)$$

Підставляючи отримане значення з рівняння (15) в рівняння (14), отримуємо:

$$B \cdot Q_n^p \cdot \eta_{ПГ} = \frac{N_{ел}}{l \cdot \eta_{оел}} \cdot q_1.$$

Так як:

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} \Rightarrow \frac{q_1}{l} = \frac{1}{\eta_t},$$

тоді:

$$B \cdot Q_n^p \cdot \eta_{ПГ} = \frac{N_{ел}}{l \cdot \eta_{оел}} \Rightarrow B \cdot Q_n^p \cdot \eta_{ПГ} \cdot \eta_{оел} \cdot \eta_t = N_{ел}.$$

### **3) Енергетичний баланс ПТУ:**

$$B \cdot Q_n^p \cdot \eta_{уст} = N_{ел}, \quad (16)$$

де

$\eta_{уст}$  – ККД паротурбінної установки:

$$\eta_{уст} = \eta_{ПГ} \cdot \eta_t \cdot \eta_{оел} = \eta_{ПГ} \cdot \eta_t \cdot (\eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_e) \quad (17)$$

Питома витрата палива, кг/кДж:

$$b = \frac{B}{N_{ел}} = \frac{1}{Q_n^p \cdot \eta_{уст}}. \quad (18)$$

### 1.3 ЦИКЛ З ПРОМІЖНИМ ПЕРЕГРІВОМ ПАРИ [2]

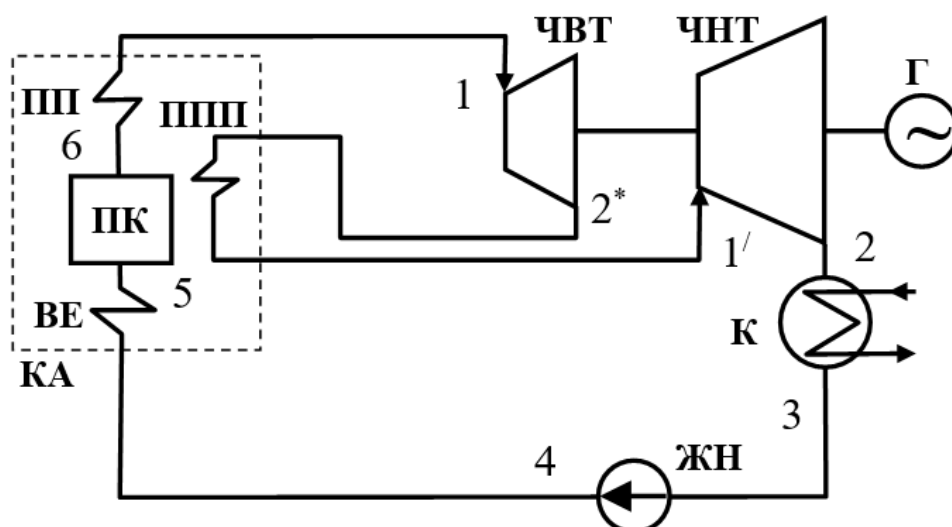


Рисунок 4 — Схема циклу з проміжним перегрівом пари [2]

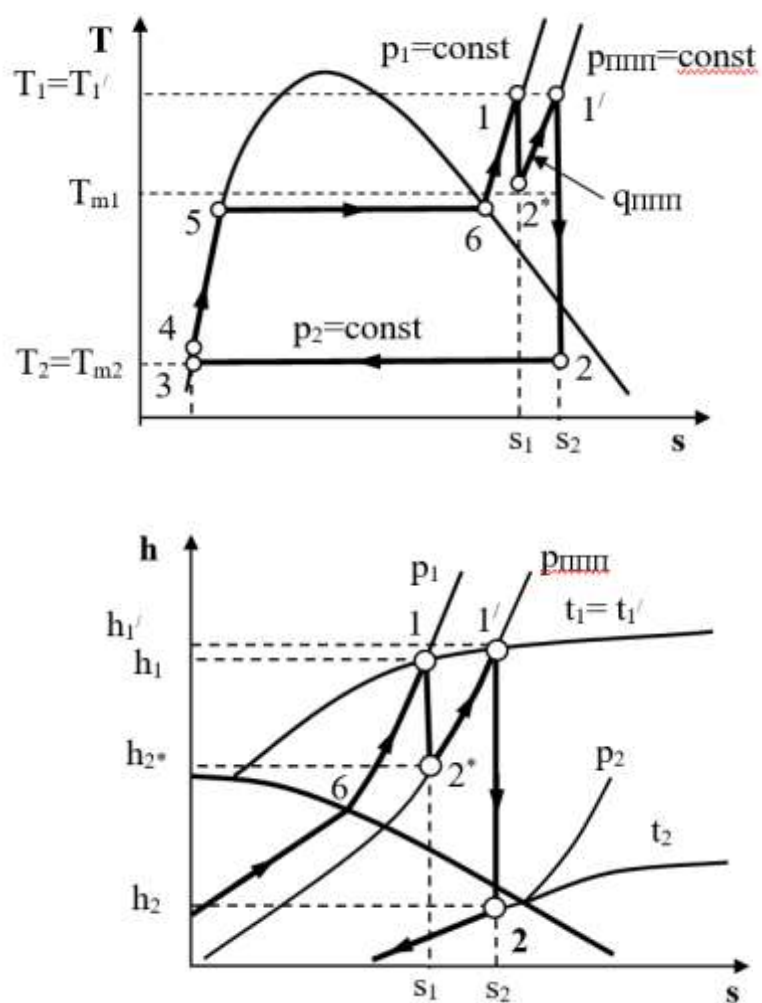


Рисунок 5 — Цикл з проміжним перегрівом пари в  $T$ - $s$ ,  $h$ - $s$  діаграмах [2]

### **Параметри в робочих точках циклу [2]**

Для визначення ККД циклу з проміжним перегрівом пари (рис. 4) необхідно знайти параметри робочого тіла в характерних точках циклу.

За відомими значеннями тиску -  $p_1$  і температури  $t_1$  визначаємо параметри в точці 1, використовуючи  $h - s$  діаграму (рис. 5):

$$(h_1, s_1) = f(p_1, t_1).$$

Оскільки процес розширення пари 1-2\* в частині високого тиску (ЧВТ) турбіни ізоентропний, то положення точки 2\* знаходимо на перетині лінії  $s_1 = \text{const}$  з лінією тиску в проміжному пароперегрівачі  $p_{\text{ППП}}$  та визначаємо параметри робочого тіла на виході з ЧВТ (на вході в проміжний пароперегрівач):

$$h_{2^*} = f(p_{\text{ППП}}, s_{2^*} = s_1).$$

Процес перегріву пари в проміжному пароперегрівачі 2\*-1' відбувається при  $p_{\text{ППП}} = \text{const}$  до заданої температури  $t_{1'}$ , знаходимо точку 1' і визначаємо параметри пари:

$$(h_{1'}, s_{1'}) = f(p_{\text{ППП}}, t_{1'}).$$

Процес 1'-2 розширення пари в частині низького тиску (ЧНТ) турбіни ізоентропний, положення точки 2 знаходимо на перетині лінії  $s_{1'} = \text{const}$  з лінією тиску в конденсаторі  $p_2$  та визначаємо параметри робочого тіла на виході з турбіни (на вході в конденсатор):

$$h_2 = f(t_2, s_2 = s_{1'}).$$

За відомою температурою в конденсаторі  $t_2$  визначаємо параметри в точці 3 за таблицею [6] або з рівняння:

$$h_3 = h_2' = c_p \cdot t_2 = 4,19 \cdot t_2.$$

### ***Енергетичні характеристики циклу [2]***

Кількість теплоти, яка підведена в КА до робочого тіла в циклі з проміжним перегрівом пари:

$$q_1 = (h_1 - h_2') + (h_{1'} - h_{2*}). \quad (19)$$

Кількість теплоти, яка відведена від робочого тіла в конденсаторі:

$$q_2 = (h_2 - h_2'). \quad (20)$$

Корисна робота, яка отримана в циклі дорівнює:

$$l = (h_1 - h_{2*}) + (h_{1'} - h_2). \quad (21)$$

Термічний ККД циклу з проміжним перегрівом пари:

$$\eta_t^{IIII} = \frac{l}{q_1} = \frac{(h_1 - h_{2*}) + (h_{1'} - h_2)}{(h_1 - h_2') + (h_{1'} - h_{2*})}. \quad (22)$$

## 1.4 ЦИКЛ З РЕГЕНЕРАТИВНИМ ПІДГРІВОМ ЖИВИЛЬНОЇ ВОДИ

[2]

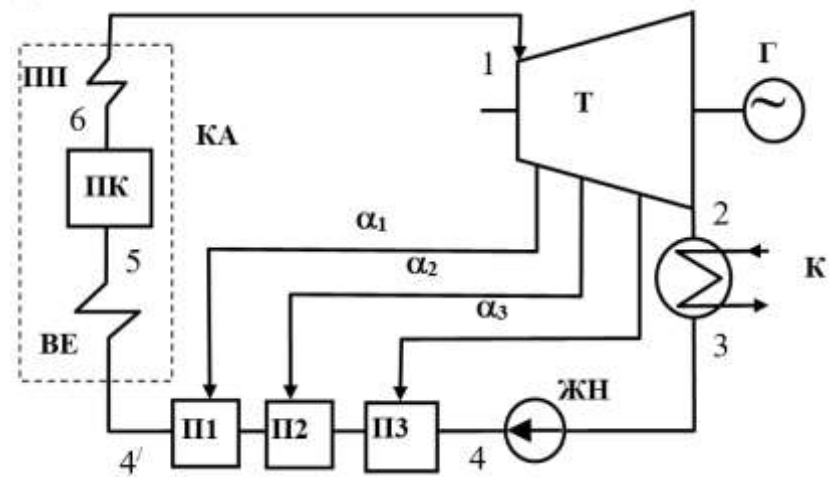


Рисунок 6 — Схема циклу з регенеративним підігрівом живильної води [2]

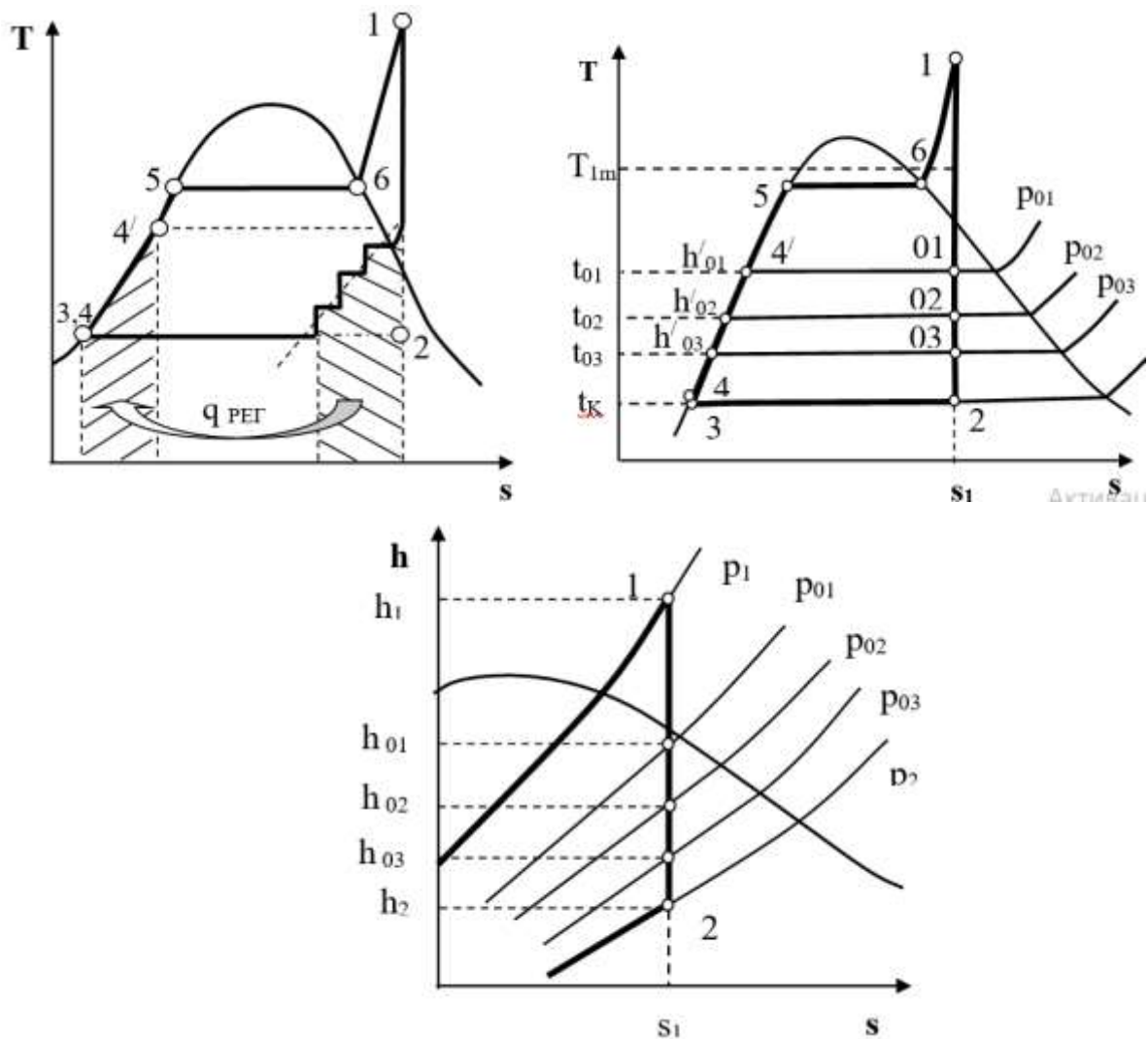


Рисунок 7 — Цикл з регенеративним підігрівом живильної води в  $T$ - $s$ ,  $h$ - $s$  діаграмах [2]

Розглянемо регенеративний цикл з трьома підігрівачами живильної води (рис. 6).

Положення точок 1, 2 та 3 визначаємо згідно методики розрахунку циклу Ренкіна та знаходимо параметри робочого тіла в цих точках [2]:

точка 1 –  $(h_1, s_1) = f(p_1, t_1)$ ;

точка 2 –  $h_2 = f(p_2, s_2 = s_1)$ ;

точка 3 –  $h_3 = h'_2 = f(p_2 \text{ або } t_2)$ .

Вважаючи, що процес розширення пари в турбіні адіабатний, за відомими значеннями тиску в відборах турбіни знаходимо параметри пари у відповідних відборах точки: 01, 02 і 03 на перетині  $s_1 = \text{const}$  та  $p_{0i} = \text{const}$  [2]:

$$h_{01} = f(p_{01}, s_1), \quad h_{02} = f(p_{02}, s_1), \quad h_{03} = f(p_{03}, s_1).$$

Робота пари, яка виконується в турбіні, повинна визначатися в залежності від кількості відібраної пари в  $i$ -ому відборі  $D_{0i}$  [2]:

– до першого відбору розширюється і виконує роботу 1 кг пари:

$$l_1 = h_1 - h_{01}; \quad (23)$$

– між першим і другим –  $(1 - \alpha_1)$  кг пари:

$$l_2 = (h_{01} - h_{02})(1 - \alpha_1), \quad (24)$$

де  $\alpha_1 = D_{01}/D$  – частка пари, що йде з турбіни в підігрівач П1 у першому відборі;

– між другим і третім –  $(1 - \alpha_1 - \alpha_2)$  кг пари:

$$l_3 = (h_{02} - h_{03})(1 - \alpha_1 - \alpha_2), \quad (25)$$

де  $\alpha_2 = D_{02}/D$  – частка пари, що йде з турбіни в підігрівач П2 у другому відборі;

– між третім відбором і конденсатором –  $(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3)$  кг пари:

$$l_4 = (h_{03} - h_2)(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3), \quad (26)$$

де

$\alpha_3 = D_{03}/D$  - частка пари, що йде з турбіни в підігрівач ПЗ у третьому відборі.

У випадку іншої кількості відборів складаються аналогічні рівняння для кожної частини турбіни [2].

Загальна робота, яка виконана в циклі дорівнює [2]:

$$\begin{aligned} l &= l_1 + l_2 + l_3 + l_4 = h_1 - h_{01} + (h_{01} - h_{02})(1 - \alpha_1) + \\ &+ (h_{02} - h_{03})(1 - \alpha_1 - \alpha_2) + (h_{03} - h_2)(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3) = \\ &= (h_1 - h_2) - \alpha_1(h_{01} - h_2) - \alpha_2(h_{02} - h_2) - \alpha_3(h_{03} - h_2) \end{aligned} \quad (27)$$

Частку пари, що йде з турбіни у підігрівач визначають з теплового балансу змішуючих теплообмінників (рис.8). Розрахунки проводимо за спрощеною методикою без врахування зміни ентальпії в насосах [2].

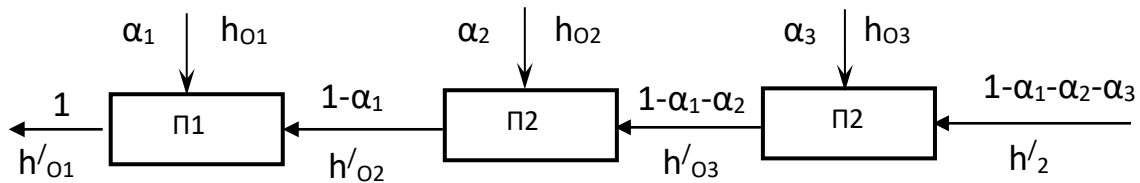


Рисунок 8 — Тепловий баланс підігрівачів живильної води [2]

Складаємо теплові баланси підігрівачів та розв'язуємо систему рівнянь для знаходження частки пари, що йде з турбіни у відповідні підігрівачі:  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  і  $\alpha_3$  [2]:

$$\begin{cases} h'_{01} = \alpha_1 \cdot h_{01} + (1 - \alpha_1) \cdot h'_{02} \\ (1 - \alpha_1) \cdot h'_{02} = \alpha_2 \cdot h_{02} + (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \cdot h'_{03} \\ (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \cdot h'_{03} = \alpha_3 \cdot h_{03} + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3) \cdot h'_2 \end{cases} \Rightarrow \quad (28)$$

$$\alpha_1 = \frac{h'_{01} - h'_{02}}{h_{01} - h'_{02}}; \quad (29)$$

$$\alpha_2 = (1 - \alpha_1) \frac{h'_{02} - h'_{03}}{h_{02} - h'_{03}}; \quad (30)$$

$$\alpha_3 = (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \frac{h'_{03} - h'_2}{h_{03} - h'_2}. \quad (31)$$

Енергетичні характеристики [2]:

$$q_1 = (h_1 - h'_{01}). \quad (32)$$

$$q_2 = (h_2 - h'_2)(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3), \quad (33)$$

$$\eta_t^{PEF} = \frac{l}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1}. \quad (34)$$

## 2 ЗАВДАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ ТА ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ

### 2.1 МЕТА ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

**Мета розрахункової роботи:** набуття навичок виконання розрахунків енергетичних характеристик та балансів циклу паротурбінної установки, що працює за циклом Ренкіна.

Індивідуальні варіанти для виконання роботи наведено в додатку 1.

Номер варіанту кожному студенту надається викладачем.

Видача індивідуального завдання – 10 тиждень, термін здачі та захист – 13 тиждень.

**Завдання розрахунку:** побудувавши цикл ПТУ і зазначивши основні параметри в робочих точках, визначити:

1) Параметри на вході та виході з турбіни:

- тиск,
- температуру,
- питомий об'єм,
- ентальпію,
- ентропію,
- внутрішню енергію;

2) Параметри робочого тіла після конденсаційної установки:

- тиск,
- температуру,
- питомий об'єм,
- ентальпію,
- ентропію,
- внутрішню енергію;

3) Роботу пари в турбіні;

- 4) Термічний ККД циклу;
- 5) Температуру пароутворення;
- 6) Теплоту процесу пароутворення;
- 7) Параметри, при яких пара в турбіні стає сухою насиченою:
  - температуру,
  - тиск,
  - ентальпію;
- 8) Параметри на вході в пароперегрівач:
  - температуру,
  - тиск,
  - ентальпію;
- 9) Ентропію пари в котельному агрегаті, якщо:
  - парні варіанти  $x=0,9$ г;
  - непарні варіанти  $x=0,85$ ;
- 10) Зміну ентропії робочого тіла в конденсаторі;
- 11) Теплоту, що підводиться:
  - парні варіанти з 1 по 15 – у економайзері;
  - непарні варіанти з 1 по 15 – у пароперегрівачі;
  - парні варіанти з 16 по 30 – у котельному агрегаті;
  - непарні варіанти з 16 по 30 – у парогенераторі;
- 12) Зміну внутрішньої енергії пари в турбіні;
- 13) Питому витрату умовного палива;

***Графічні завдання:***

- 14) Показати графічно на  $hs$ -діаграмі значення ентропії пари після турбіни, якщо відомий внутрішній відносний ККД проточної частини турбіни  $\eta_{oi}$  (див. завдання на розрахунок);
- 15) Зобразити в  $T-s$  координатах цикл та показати графічно кількість теплоти, необхідної для нагріву 1кг робочого тіла:
  - парні варіанти з 1 по 15: у економайзері;

- непарні варіанти з 1 по 15: у паровому котлі;
- парні варіанти з 16 по 30: у пароперегрівачі;
- непарні варіанти з 16 по 30: від стану на виході з конденсатора до стану на вході в турбіну.

16) Зобразити в  $p-v$  координатах цикл та показати:

- варіанти з 1 по 10: роботу турбіни ;
- варіанти з 11 по 20: роботу насосу;
- варіанти з 21 по 30: роботу циклу.

Результати розрахунків звести до таблиці 1.

Таблиця 1 — Результати розрахунку

| Номера точок<br>на діаграмі | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------------------------|---|---|---|---|---|---|
| Параметри                   |   |   |   |   |   |   |
| $p$ , МПа                   |   |   |   |   |   |   |
| $t$ , °С                    |   |   |   |   |   |   |
| $v$ , м <sup>3</sup> /кг    |   |   |   |   |   |   |
| $h$ , кДж/кг                |   |   |   |   |   |   |
| $s$ , кДж/кг·К              |   |   |   |   |   |   |

## 2.2 ПРИКЛАД ПРОВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКІВ

### Вихідні дані:

Пара надходить в турбіну ПТУ з такими параметрами: тиск  $p_1 = 100$  бар та температурі  $t_1 = 510^\circ\text{C}$ , де розширюється до тиску  $p_2 = 0,05$  бар.  
 $Q_{\mu}^p = 30000 \text{ кДж/кг}$  - нижча робоча теплота згорання палива.

### Визначити:

1. Температуру пари після розширення в турбіні.
2. Технічну роботу, виконану 1 кг пари в турбіні.
3. Питому теплоту, підведену в парогенераторі.
4. Тиск, при якому пара в турбіні стає сухою насиченою.
5. Температуру процесу пароутворення.
6. Ентальпію пари в парогенераторі при ступені сухості  $x = 0,5$ .
7. Теплоту пароутворення.
8. Зміну внутрішньої енергії в процесі пароутворення.
9. Питому витрату умовного палива.
10. Ентальпію та температуру пари після турбіни, якщо внутрішній відносний ККД проточної частини турбіни  $\eta_{oi} = 0,9$ .
11. Зобразити в  $T$ - $s$  координатах цикл ПТУ та кількість теплоти, відведеної від робочого тіла в конденсаційній установці, за умови, якщо внутрішній відносний ККД проточної частини турбіни  $\eta_{ol} = 1$ .

Результати звести до таблиці 1.

## Вирішення завдання

|                             |                                                                                                                                          |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $p_1=100$ бар;              | 1) На $h$ - $s$ діаграмі на перетині $p_1$ и $t_1$ знаходимо точку 1.                                                                    |
| $t_1 = 510^\circ\text{C}$ ; | Будуємо лінію процесу: так як процес адіабатний ( $q=0$ ), то $s=\text{const}$ . На перетині променю процесу та $p_2$ знаходимо точку 2. |
| $p_2=0,05$ бар.             | За $h$ - $s$ діаграмою знаходимо температуру пари після розширення в турбіні $t_2=35^\circ\text{C}$ .                                    |
|                             | За $h$ - $s$ діаграмою можна також визначити також значення ентальпій в точках 1 та 2:<br>$h_1=3410$ кДж/кг, $h_2=2020$ кДж/кг.          |

2) Технічна робота, виконана одним кг пари в турбіні визначається за формулою:

$$l_{\text{турб}} = h_1 - h_2,$$

$$l_{\text{турб}} = h_1 - h_2 = 3410 - 2020 = 1390 \text{ кДж/кг.}$$

3) Питома теплота, підведена в парогенераторі, визначається за формулою:

$$q_1 = h_1 - h'_2,$$

де

$h'_2 = c_{\theta} \cdot t_2 = 4,187 \cdot 35 = 146$  кДж/кг – ентальпія конденсату на виході з конденсаційної установки.

$$\text{Тоді } q_1 = 3410 - 146 = 3264 \text{ кДж/кг.}$$

4) Тиск, при якому пара в турбіні стає сухою насиченою.

Відповідну точку знаходимо за  $h$ - $s$  діаграмою на перетині променю процесу  $s=\text{const}$  з верхньої пограничною кривою  $x=1$  –  $m.A$ .

Знаходимо тиск у цій точці:

$$p_a=9 \text{ бар.}$$

5) Температуру процесу пароутворення знаходимо двома способами:

а) за  $h$ - $s$  діаграмою знаходимо температуру насичення при тиску  $p_1$ :

$$t_{n1}=t_n(p_1)=310\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

б) за  $p_1$  за таблицею 2 [2]:  $t_{n1}=t_n(p_1)=311\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

6) Ентальпію пари в парогенераторі при ступені сухості  $x = 0,5$ .

Стан робочого тіла в даній точці – волога насичена пара (ВНП). Для цього стану ентальпія визначається за формулою:

$$h_x = h''x + h'(1 - x),$$

де

$h'', h'$  - відповідно ентальпія сухої насиченої пари (СНП) та ентальпія киплячої води (КВ) при даному тиску, кДж/кг.

За  $h$ - $s$ -діаграмою на перетині верхньої пограничної кривої  $x=1$  та ізобари  $p_1=\text{const}$  знаходимо точку  $m.6$  (стан - СНП):

$$h'' = h_6 = 2760\text{ кДж/кг}.$$

У точці 5 робоче тіло знаходиться у стані кипляча вода (КВ), тому:

$$h' = h_5 = c_{\text{в}} \cdot t_5 = c_{\text{в}} \cdot t_{1n} = 4,187 \cdot 310 = 1297\text{ кДж/кг},$$

де  $t_5$  – температура робочого тіла на виході з економайзера,  $h_5 = h'(p_1)$ , кДж/кг.

Таким чином:

$$h_x = h''x + h'(1 - x) = 2760 \cdot 0,5 + 1297(1 - 0,5) = 2029\text{ кДж/кг}.$$

7) Теплота пароутворення:

$$r = h'' - h' = h_6 - h_5 = 2760 - 1297 = 1463\text{ кДж/кг}.$$

8) Зміна внутрішньої енергії в процесі пароутворення:

$$\Delta u_{6-5} = (h'' - p_1 v'') - (h' - p_1 v'),$$

де  $v'', v'$  – відповідно питомий об'єм сухої насиченої пари (СНП) та питомий об'єм киплячої води (КВ) при даному тиску,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;

$p_1$  – тиск робочого тіла у процесі пароутворення, що відбувається у котельній установці,  $\text{кПа}$ .

За табл. 2 [2] по  $p_1=100$  бар знаходимо:

$$v' = 0,0014526 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad v'' = 0,018 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Тоді:

$$\begin{aligned} \Delta u_{6-5} &= (h'' - p_1 v'') - (h' - p_1 v') = (2760 - 100 \cdot 10^5 / 10^3 \cdot 0,018) - \\ &- (1297 - 100 \cdot 10^5 / 10^3 \cdot 0,0015) = 2580 - 1283 = 1297 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

9) Питома витрата умовного палива на виробництво 1 кВт електроенергії:

$$b = \frac{B}{N_{\text{ел}}} = \frac{1}{Q_n^p \cdot \eta_{\text{уст}}} = \frac{1}{Q_n^p \cdot \eta_{\text{III}} \cdot \eta_t \cdot \eta_{\text{оел}}},$$

де

$Q_n^p = 30000 \text{ кДж/кг}$  - нижча робоча теплота згорання палива;

$\eta_{\text{III}}=1$  – коефіцієнт корисної дії парогенератора (приймаємо по замовчуванню);

$\eta_{\text{оел}}=1$  – відносний електричний ККД.

Термічний ККД адіабатного процесу розширення пари в турбіні:

$$\eta_t = \frac{l_{\text{турб}}}{q_1} = \frac{1390}{3264} = 0,43.$$

Тоді:

$$b = \frac{1}{Q_n^p \cdot \eta_{\text{уст}}} = \frac{1}{Q_n^p \cdot 1 \cdot \eta_t \cdot 1} = \frac{1}{30000 \cdot 0,43} = 7,7 \cdot 10^{-5} \text{ кг/кДж}.$$

10) Визначимо ентальпію та температуру пари після турбіни, якщо внутрішній відносний ККД проточної частини турбіни  $\eta_{oi} = 0,9$ .

Термічний ККД реального процесу розширення пари в турбіні:

$$\eta_{oi} = \frac{l_{\partial}}{l_{\text{мyрб}}} = \frac{h_1 - h_{2\partial}}{h_1 - h_2} = \frac{h_1 - h_{2\partial}}{l_{\text{мyрб}}} \Rightarrow$$

$$h_{2\partial} = h - \eta_{oi} l_{\text{мyрб}} = 3410 - 0,9 \cdot 1390 = 2159 \text{ кДж/кг}.$$

Температура в точці 2 $\partial$  дорівнює температурі насичення при тиску  $p_2$ :

$$t_{2\partial} = t_2 = t_2(p_2) = t_{2н} = 35^\circ\text{C}.$$

11) Кількість теплоти, відведеної від робочого тіла в конденсаторі за умови  $\eta_{oi} = 1$  графічно зображується на  $T$ - $s$  діаграмі.

$q_2$  – площа під кривою процесу 2-3 на вісь абсцис (див. рис. 9).

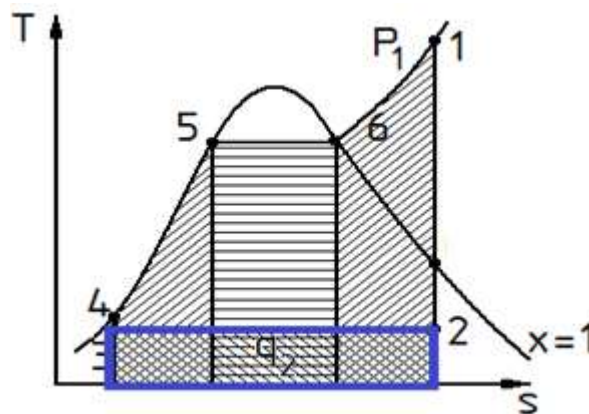


Рисунок 9 — Зображення кількості теплоти в  $T$ - $s$  координатах

Відповідно:

- площа під кривою 4-5 на вісь абсцис – це кількість теплоти, підведеної до робочого тіла у водяному економайзері;
- площа під кривою 5-6 на вісь абсцис – це кількість теплоти, підведеної до робочого тіла у котельній установці;
- площа під кривою 6-7 на вісь абсцис – це кількість теплоти, підведеної до робочого тіла у пароперегрівачі.

## 2.3 ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ РОБОТИ

Розрахункова робота оформлюється на аркушах А4 із рамками. Рисунки наводяться по тексту відповідно до змісту, нумерація рисунків наскрізна. Номер сторінки вказується знизу посередині сторінки, нумерація сторінок наскрізна.

### *Зміст роботи*

1. Титульний аркуш;
2. Лист зауважень керівника;
3. Завдання на роботу згідно варіанту;
4. Зведена таблиця відповідей згідно індивідуального завдання;
5. Схема установки з нанесеними параметрами робочого тіла у характерних точках циклу (вказати термічні ( $p$ ,  $t$ ,  $v$ ) і калоричні ( $h$ ,  $s$ ) параметри);
6. Зображення циклу в  $T$ - $s$ ,  $p$ - $v$  і  $h$ - $s$  –діаграмах;
7. Теоретичні відомості:
  - 1) призначення ПТУ, опис основних елементів схеми;
  - 2) фазові перетворення робочого тіла в циклі;
  - 3) схема перетворень видів енергії;
  - 4) термодинамічні процеси ПТУ: опис процесів підведення і відведення теплоти; виконання паром роботи і здійснення зовнішньої роботи над робочим тілом;
8. Виконання завдання;
9. Висновки;
10. Література;
11. Додаток:  $h$ - $s$  - діаграма з нанесеним циклом (т.1, т.2, т.2д, т.6).

*Перший аркуш* – титульний (не нумерується). Приклад оформлення титульного аркушу наведено у додатках.

*Другий аркуш* роботи повинен мати заголовок «Зауваження керівника» із нанесеними лініями для рукописного внесення зауважень, аркуш не нумерується.

*Третій аркуш* роботи – завдання на роботу згідно варіанту ( нумерація починається з цієї сторінки).

*Четвертий аркуш* роботи - зведена таблиця відповідей на завдання 1.

*П'ятий аркуш* роботи – схема ПТУ, що працює за циклом Ренкіна (рис. 1) з нанесеними параметрами робочого тіла.

*Шостий аркуш* роботи – зображення циклу в  $T-s$  ,  $p-v$  і  $h-s$  діаграмах.

*Сьомий аркуш* роботи – теоретичні відомості.

*Восьмий і наступні аркуші* роботи - відповіді на запитання згідно варіанту. Оформлення відповідей повинно включати необхідний пояснювальний текст, формули для розрахунків, підставлені значення, результат розрахунку та одиниці виміру. За необхідності окремо треба навести переведення одиниць виміру (кПа в бар, тощо).

Відповіді на питання 15, 16, 17 повинні супроводжуватись пояснювальним текстом і графічним зображенням.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що представляє собою економайзер? Який процес там відбувається?
2. Який стан робочого тіла в кожній точці циклу?
3. Як розрахувати роботу циклу? Покажіть її графічно у  $p-v$  діаграмі.
4. Як розрахувати теплоту, що підводиться? Покажіть її у  $T-s$  діаграмі.
5. Як розрахувати теплоту, що відводиться? Покажіть її у  $T-s$  діаграмі.
6. Як розрахувати термічний ККД циклу?
7. Що враховують  $\eta_{oi}$ ,  $\eta_{oel}$ ,  $\eta_{ПГ}$ ,  $\eta_m$ ?
8. Опишіть цикл Ренкіна та вкажіть основні елементи.
9. Як визначити температуру на виході з економайзера?
10. Як розрахувати зміну ентропії в конденсаційній установці?
11. У якій послідовності відбувалася побудова точки 2d?
12. Опишіть конструкцію парогенератора.
13. Намалюйте процес у  $p-v$  і  $T-s$  діаграмах.
14. Як розрахувати параметри на вході в пароперегрівач? Покажіть графічно теплоту, що підводиться в цьому елементі.
15. Як розрахувати питому витрату палива?
16. Порядок визначення теплоти пароутворення, одиниці виміру.
17. Як визначити зміну внутрішньої енергії під час пароутворення?
18. Як визначити параметри, при яких пара в турбіні стає сухою насиченою.
19. Покажіть графічно теплоту, що підводиться у економайзері.
20. Покажіть графічно теплоту, що підводиться у котельній установці.
21. Покажіть графічно теплоту, що підводиться у пароперегрівачі.
22. Покажіть графічно роботу насоса та турбіни.
23. Особливості паросилових установок, що працюють за циклом Карно.
24. Переваги та недоліки установок, що працюють за циклом Карно.
25. Які аспекти аналізуються під час визначення впливу початкових і кінцевих параметрів реального і ідеального циклу Ренкіна?

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Розрахунок енергетичної ефективності циклу ПТУ [Текст]: метод. вказівки до викон. розрахункової роботи з дисципліни «Основи теплотехніки» для студ. напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» спец. «Електротехнічні системи електроспоживання»/ Уклад.: М.М. Шовкалюк, Б.В.Дейко – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 28 с.

2. Джерела енергії. Визначення ефективності роботи енергетичного обладнання ПТУ. Розрахункова робота [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальностей 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. І. Дешко, В. В. Дубровська, В. І. Шкляр. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,64 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 47 с.

3. Шкляр В.І. Джерела енергії: підручник / В.І. Шкляр, В.В. Дубровська – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 337 с.

4. Драганов Б. Х. Теплотехніка : підручник /Б. Х. Драганов, А. А. Долінський, А. В. Міщенко, Є. М. Письменний. – Київ: «Інкос», 2005. – 504 с.

5. Дослідження роботи паротурбінної установки [Текст] : метод. рек. до викон. лабор. роботи для студ. напрямів підготовки «Електротехніки та електротехнології» й «Теплоенергетика» / Уклад.: В.В. Дубровська, В.І.Шкляр, В.В. Задвернюк – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 44 с.

6. Ривкін С.Л., Олександров А.А. Термодинамічні властивості води та водяної пари: Довідник, 1984. – 80 с.

## ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

| №  | Вихідні дані      |                   |                   |
|----|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1  | $p_1=100$ бар     | $t_1=510$ °C      | $p_2=0,05$ бар    |
| 2  | $p_1=50$ бар      | $t_2=50$ °C       | $x_2=0,85$        |
| 3  | $p_6=20$ бар.     | $p_2=0,05$ бар    | $x_2=0,9$         |
| 4  | $t_1=530$ °C      | $p_1=50$ бар      | $t_2=30$ °C       |
| 5  | $t_1=540$ °C      | $p_2=0,05$ бар    | $x_2=0,85$        |
| 6  | $t_6=250$ °C      | $t_1=480$ °C      | $p_2=0,046$ бар   |
| 7  | $t_1=500$ °C      | $p_1=60$ бар      | $p_2=0,04$ бар    |
| 8  | $p_1=24$ бар      | $t_2=40$ °C       | $x_2=0,9$         |
| 9  | $p_6=6$ бар       | $p_2=0,05$ бар    | $x_2=0,95$        |
| 10 | $t_1=530$ °C      | $p_1=70$ бар      | $t_2=30$ °C       |
| 11 | $t_1=420$ °C      | $p_2=0,01$ МПа    | $x_2=0,806$       |
| 12 | $t_5=210$ °C      | $t_1=450$ °C      | $p_2=0,06$ бар    |
| 13 | $t_5=311$ °C      | $t_1=510$ °C      | $t_2=33$ °C       |
| 14 | $p_1=50$ бар      | $p_2=12$ кПа      | $h_2=2230$ кДж/кг |
| 15 | $p_6=20$ бар      | $h_1=3600$ кДж/кг | $p_2=0,05$ бар    |
| 16 | $t_2=50$ °C       | $h_1=3440$ кДж/кг | $p_1=50$ бар      |
| 17 | $p_1=20$ бар.     | $x_2=0,9$         | $p_2=0,05$ бар    |
| 18 | $p_1=50$ бар      | $t_2=30$ °C       | $x_2=0,83$        |
| 19 | $p_1=40$ бар      | $t_2=35$ °C       | $x_2=0,85$        |
| 20 | $h_1=3600$ кДж/кг | $p_1=40$ бар      | $p_2=0,046$ бар   |
| 21 | $p_1=60$ бар      | $h_2=2080$ кДж/кг | $p_2=0,046$ бар   |
| 22 | $t_1=560$ °C      | $p_1=60$ бар      | $x_2=0,9$         |
| 23 | $t_1=500$ °C      | $p_2=0,05$ бар    | $x_2=0,95$        |
| 24 | $t_1=530$ °C      | $h_2=2080$ кДж/кг | $x_2=0,85$        |
| 25 | $p_1=54$ бар      | $t_1=420$ °C      | $t_2=45$ °C       |
| 26 | $t_1=450$ °C      | $p_2=0,06$ бар    | $h_2=2250$ кДж/кг |
| 27 | $p_1=100$ бар     | $t_1=510$ °C      | $p_2=0,045$ бар   |
| 28 | $h_6=2800$ кДж/кг | $t_1=490$ °C      | $p_2=0,12$ бар    |
| 29 | $p_1=20$ бар      | $t_1=550$ °C      | $p_2=0,05$ бар    |
| 30 | $p_1=50$ бар      | $h_2=2240$ кДж/кг | $p_2=0,12$ бар    |

***Інші вихідні дані:***

- 1) Внутрішній відносний ККД проточної частини турбіни  $\eta_{oi}$  прийняти:
  - парні варіанти - 0,85;
  - непарні варіанти - 0,9;
- 2) ККД парогенератору  $\eta_{пг}$  прийняти:
  - парні варіанти - 0,92;
  - непарні варіанти - 0,87;
- 3) Відносний електричний ККД  $\eta_{о\text{ ел}}$  прийняти:
  - парні варіанти - 0,97;
  - непарні варіанти - 0,96;
- 4) Нижчу робочу теплоту згорання палива  $Q_n^p$  прийняти:
  - варіанти 1÷10: 30500 кДж/кг;
  - варіанти 11÷20: 31000 кДж/кг;
  - варіанти 21÷30: 31500 кДж/кг.

## Зразок оформлення титульного аркуша

Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"  
Навчально-науковий Інститут енергозбереження і енергоменеджменту

**РОЗРАХУНКОВА РОБОТА**  
**«Розрахунок енергетичної ефективності паротурбінної**  
**установки»**  
**з навчальної дисципліни**  
**«Теплотехнічне обладнання та енергоефективні технології**  
**виробництва теплової енергії»**

для студентів спеціальності  
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
за освітньою програмою  
«Системи забезпечення споживачів електричною енергією».  
спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання»  
(денна/заочна форма навчання)

**Варіант № \_\_\_\_\_**

**Виконав:**

студент групи \_\_\_\_\_ дата \_\_\_\_\_  
група дата

\_\_\_\_\_ підпис прізвище ім'я по-батькові

**Керівник:**

\_\_\_\_\_ наук. ступінь, посада, прізвище, ім'я, по-батькові

Захищена \_\_\_\_\_ Оцінка \_\_\_\_\_  
дата підпис прізвище, ім'я, по-батькові керівника

Київ – 20\_\_