

**Методичні вказівки  
до виконання контрольних робіт  
з дисципліни «Технічна термодинаміка»  
(частина 2)  
для студентів напряму підготовки  
«Теплоенергетика» заочної форми навчання**

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**Методичні вказівки  
до виконання контрольних робіт  
з дисципліни «Технічна термодинаміка»  
(частина 2)  
для студентів напряму підготовки  
«Теплоенергетика» заочної форми навчання**

Вінниця  
ВНТУ  
2016

Рекомендовано до друку Методичною радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 8 від 23.04.2015 р.)

Рецензенти :

**С. М. Василенко**, доктор технічних наук, професор

**А. М. Власенко**, кандидат технічних наук, доцент

Методичні вказівки до виконання контрольних робіт з дисципліни «Технічна термодинаміка» (частина 2) для студентів напряму підготовки «Теплоенергетика» заочної форми навчання / Уклад. О. П. Остапенко. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 50 с.

В методичних вказівках викладено програму вивчення дисципліни «Технічна термодинаміка» для студентів напряму підготовки «Теплоенергетика» (спеціальності «Теплоенергетика»). Подано приклади термодинамічних розрахунків циклів паротурбінних і газотурбінних установок, розрахунків термодинамічних процеси витікання газів і пари, стиснення газів в компресорах, розрахунків циклів двигунів внутрішнього згорання та циклів холодильних машин і теплонасосних установок.

Методичні вказівки призначені для виконання контрольних робіт студентами заочної форми навчання та містять практичні завдання контрольних робіт і перелік контрольних запитань для самоперевірки.

## ЗМІСТ

Передмова.....	4
1 ПРОГРАМА ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ.....	5
1.1 Мета та завдання навчальної дисципліни.....	5
1.2 Інформаційний обсяг навчальної дисципліни.....	6
2 ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ .....	11
2.1 Термодинамічні процеси витікання газів і пари.....	11
2.2 Стиснення газів в компресорах.....	13
2.3 Цикли газотурбінних установок.....	15
2.4 Цикли паротурбінних установок.....	20
2.5 Цикли двигунів внутрішнього згорання.....	24
2.6 Цикли холодильних машин і теплонасосних установок.....	26
3 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ЗНАНЬ.....	31
4 ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ ДО КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ.....	33
Рекомендована література.....	38
Додатки.....	39

## ПЕРЕДМОВА

Однією з головних задач напряму підготовки 6.050601 – «Теплоенергетика» (спеціальності «Теплоенергетика») є задача раціонального використання енергоресурсів в теплотехнічних та теплоенергетичних установках, в основу роботи яких покладені певні термодинамічні цикли. Виходячи з цього, витікає необхідність застосування теоретичних знань, отриманих при вивченні дисципліни «Технічна термодинаміка», для вирішення конкретних інженерних задач в галузі теплотехнології та теплоенергетики за допомогою методів термодинамічного аналізу.

Поставлена мета може бути досягнута тільки при усвідомленому виконанні завдань студентами. Для виконання контрольних робіт студентам необхідно розуміти фізичну суть термодинамічних процесів, які складають задану схему теплотехнологічної або теплоенергетичної установки, володіти методами розрахунків процесів і циклів з використанням термодинамічних діаграм і таблиць стану, систематично працювати з рекомендованою літературою.

«Методичні вказівки...» передбачають завдання для виконання контрольних робіт для студентів заочної форми навчання: контрольні запитання для самоперевірки знань студентів за основними темами та варіанти практичних завдань для контрольних робіт. «Методичні вказівки...» містять необхідні додатки, що полегшує їх використання для вирішення практичних завдань. Це дозволить студентам працювати самостійно і творчо.

Автор вдячна рецензентам за слушні пропозиції та поради в процесі підготовки даних «Методичних вказівок...» до друку.

## 1 ПРОГРАМА ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ

Програма вивчення навчальної дисципліни складена з урахуванням вимог освітньо-професійних програм підготовки бакалаврів напряму підготовки 6.050601 – «Теплоенергетика» за спеціальністю «Теплоенергетика».

**Предметом** вивчення навчальної дисципліни «Технічна термодинаміка» є фундаментальні газові закони, закони перетворення енергії в термодинамічних процесах ідеальних і реальних газів, циклах теплосилових і холодильних машин і комбінованих установках; методи розрахунків термодинамічних процесів і циклів та їх аналіз.

**Міждисциплінарні зв'язки.** Вивчення дисципліни «Технічна термодинаміка» базується на матеріалах таких дисциплін: «Вища математика», «Фізика». Дана дисципліна дозволяє поглибити вивчення таких дисциплін: «Тепломасообмін», «Холодильна техніка та технологія», «Джерела теплопостачання промислових підприємств».

Програма навчальної дисципліни складається з дванадцяти змістових модулів.

Змістовий модуль 1. Основні поняття технічної термодинаміки.

Змістовий модуль 2. Перший закон термодинаміки.

Змістовий модуль 3. Другий закон термодинаміки.

Змістовий модуль 4. Аналіз основних процесів ідеального газу.

Змістовий модуль 5. Реальні гази і процеси з реальними газами.

Змістовий модуль 6. Вологе повітря.

Змістовий модуль 7. Процеси течії газів і рідин.

Змістовий модуль 8. Основи теорії тепломеханічних циклів теплосилових установок.

Змістовий модуль 9. Газосилові та комбіновані цикли та установки.

Змістовий модуль 10. Паросилові цикли та установки. Парогазові установки.

Змістовий модуль 11. Цикли холодильних машин і теплонасосних установок.

Змістовий модуль 12. Ексергетичні баланси стаціонарних поточних процесів.

### 1.1 Мета та завдання навчальної дисципліни

Мета викладання навчальної дисципліни «Технічна термодинаміка» полягає в тому, щоб дати студентам знання з фундаментальних газових законів, законів перетворення енергії в термодинамічних процесах ідеальних і реальних газів, циклах теплосилових і холодильних машин і комбінова-

них установках; виробити у студентів навички розрахунків термодинамічних процесів і циклів та методів їх аналізу.

Основними завданнями вивчення дисципліни «Технічна термодинаміка» є:

- формування у студентів навичок розрахунків та методів аналізу термодинамічних процесів ідеальних і реальних газів, циклів теплосилових і холодильних машин і комбінованих установок;
- навчання практичних способів роботи з діаграмами реальних газів;
- розуміння і засвоєння принципів роботи циклів теплосилових установок, холодильних машин і теплонасосних установок;
- отримання навичок аналізу одержаних рішень;
- одержання теоретичних навичок для вивчення дисциплін, які викладаються в подальшому.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми, студенти повинні:

- **знати:** основні газові закони, закони збереження енергії в термодинамічних системах; методику розрахунків термодинамічних процесів ідеальних і реальних газів, циклів та комбінованих установок;
- **вміти:** виконувати розрахунки процесів ідеальних та реальних газів за допомогою таблиць і відповідних діаграм, виконувати аналіз досконалості роботи окремих процесів і циклів з використанням довідкової і наукової літератури, аналізувати отримані результати та приймати рішення за результатами цих розрахунків, знаходити раціональні методи розв'язання практичних завдань, визначати раціональні схеми енергокомбінування.

## 1.2 Інформаційний обсяг навчальної дисципліни

### Змістовий модуль 1. Основні поняття технічної термодинаміки.

Тема 1. Термодинамічні системи. Параметри стану.

Види термодинамічних систем (ТДС) та їх особливості. Види енергії та форми енергообміну в ТДС. Стан ТДС. Параметри і функції стану. Термодинамічні процеси. Координати стану і потенціали взаємодії.

Тема 2. Види термодинамічних процесів. Поточні процеси. Рівняння стану робочого тіла.

Види термодинамічних процесів. Рівноважні та нерівноважні, оборотні та необоротні термодинамічні процеси. Поточні процеси та їх особливості. Робоче тіло. Ідеальний газ. Реальні гази. Рівняння стану робочого тіла. Рівняння стану ідеальних і реальних газів.

Тема 3. Форми енергообміну та їх взаємоперетворення в ТДС.

Внутрішня енергія і ентальпія. Робота. Робота зміни об'єму і зміни тиску. Теплота і теплоємності.

## **Змістовий модуль 2. Перший закон термодинаміки.**

Тема 4. Закони збереження енергії в ТДС. Замкнені термодинамічні процеси і цикли. Цикл Карно.

Перший закон термодинаміки. Рівняння першого закону термодинаміки для закритих та відкритих ТДС. Теплоємність. Визначення теплоємності за молекулярно-кінетичною теорією та за допомогою таблиць.

Тема 5. Суміші ідеальних газів.

Основні означення. Властивості сумішей ідеальних газів. Калоричні параметри сумішей ідеальних газів. Теплоємність суміші газів.

## **Змістовий модуль 3. Другий закон термодинаміки.**

Тема 6. Другий закон термодинаміки. Замкнені термодинамічні процеси і цикли. Цикл Карно.

Другий закон термодинаміки. Узагальнені рівняння термодинаміки. Перший і другий закони термодинаміки для замкнених процесів. Цикл Карно. Теореми Карно. Ентропія і другий закон термодинаміки. Ентропія і термодинамічна вірогідність. Термодинамічна шкала температур. Зміна ентропії в оборотних процесах. Зміна ентропії в необоротних процесах. Зміна ентропії в ustalених потоках речовини. Визначення зміни ентропії. Рівняння Гюї-Стодоли. T-s діаграма та її властивості. Втрати роботоспроможності робочого тіла. Задачі вивчення термодинамічних процесів.

Тема 7. Ефективність енергоперетворень в ТДС. Ексергетичний аналіз.

Обмеження перетворюваності енергії. Ексергія та анергія. Ексергетичні втрати і ексергетичні коефіцієнти корисної дії.

## **Змістовий модуль 4. Аналіз основних процесів ідеального газу.**

Тема 8. Термодинамічні процеси ідеальних газів та їх аналіз.

Основні математичні методи. Рівняння Максвелла. Частинні похідні внутрішньої енергії та ентальпії. Диференціальні рівняння теплоємності. Алгоритм аналізу будь-якого термодинамічного процесу. Політропний процес, його основні співвідношення і властивості. Окремі випадки політропних процесів: ізотермічний, ізобарний, ізохорний, адіабатний процеси. Аналіз термодинамічних процесів.

## **Змістовий модуль 5. Реальні гази і процеси з реальними газами.**

Тема 9. Термодинамічні властивості і процеси реальних газів. Реальні гази. Водяна пара. Процеси генерації пари.

Фазові діаграми. Умови рівноваги двофазних систем та закономірності фазових переходів. Водяна пара. Процес пароутворення і параметри водяної пари. Процеси генерації пари. Термодинамічні таблиці води і водяної пари. Діаграми станів реальних речовин.

Тема 10. H-s діаграма водяної пари та принципи її побудови.



h-s діаграма водяної пари (діаграма Мольє) та принцип її побудови. Визначення параметрів водяної пари за допомогою діаграми.

Тема 11. Термодинамічні процеси з водяною парою на h-s діаграмі.

Основні термодинамічні процеси водяної пари на h-s діаграмі: ізохорний процес, ізобарний процес, ізотермічний процес, ізентропний (адіабатний) процес, процес при сталій мірі сухості пари, процес дроселювання водяної пари, процес змішування потоків водяної пари з різними параметрами.

### **Змістовий модуль 6. Вологе повітря.**

Тема 12. Парогазові суміші. Вологе повітря.

Властивості парогазових сумішей. Вологе повітря. Основні характеристики вологого повітря. Калоричні параметри вологого повітря.

Тема 13. h-d діаграма вологого повітря. Основні процеси з вологим повітрям.

h-d діаграма вологого повітря. Основні процеси з вологим повітрям, загальні характеристики.

Тема 14. Тепловологісні процеси на h-d діаграмі.

Основні процеси з вологим повітрям: загальні характеристики, процеси в теоретичній сушарці, ізобарне охолодження вологого повітря, ізобарне змішування двох потоків вологого повітря, зволоження повітря парою, зволоження повітря водою.

### **Змістовий модуль 7. Процеси течії газів і рідин.**

Тема 15. Процеси течії і дроселювання газів і пари. Процеси в соплах та дифузорах.

Загальні положення процесів течії. Адіабатна течія ідеальних газів в каналах. Сопло Лавалю. Баланс енергій для витікання газу із сопла. Баланс енергій при течії газу в дифузори.

Тема 16. Процеси дроселювання і процеси в ежекторах.

Дроселювання газів і пари. Дроселювання реальних газів. Процеси в ежекторах.

### **Змістовий модуль 8. Основи теорії тепломеханічних циклів теплосилових установок.**

Тема 17. Основи теорії тепломеханічних циклів теплосилових установок (ТСУ). Класифікація циклів теплових машин. Простий ідеальний цикл ТСУ. Реальний простий цикл ТСУ.

### **Змістовий модуль 9. Газосилові та комбіновані цикли та установки.**

Тема 18. Стиснення газів в компресорах.

Процеси стиснення в компресорах: одноступінчастий і багатоступінчастий компресори, їх переваги і недоліки, компресори об'ємного і динамічного стиснення.

Тема 19. Цикли газотурбінних установок та їх ефективність. Розрахунки циклів газотурбінних установок.

Цикли газотурбінних установок (ГТУ). ГТУ відкритого та закритого типу. Цикл ГТУ з ізобарним підведенням теплоти (цикл Брайтона). Теоретичні та реальні цикли ГТУ.

Тема 20. Регенеративні цикли газотурбінних установок.

Регенеративні цикли газотурбінних установок. Переваги регенеративних циклів ГТУ. Цикл ГТУ зі ступінчастим стисненням, нагріванням робочого тіла та регенерацією.

Тема 21. Цикли двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) та реактивних двигунів.

Цикли двигунів внутрішнього згоряння: цикл Отто (карбюраторні ДВЗ), цикл Дизеля, цикл Тринклера (безкомпресорні дизелі), техніко-економічні показники роботи ДВЗ.

**Змістовий модуль 10. Паросилові цикли та установки. Парогазові установки.**

Тема 22. Цикли паротурбінних установок (ПТУ). Цикл Ренкіна та його ефективність.

Цикл найпростішої паротурбінної установки. Теоретичні та дійсні цикли ПТУ.

Тема 23. Засоби підвищення ККД циклів ПТУ.

Вплив параметрів пари на ефективність циклу ПТУ. Засоби підвищення ККД циклів ПТУ.

Тема 24. Регенеративні цикли паротурбінних установок.

Регенеративні цикли паротурбінних установок. Визначення показників ефективності циклу ПТУ з регенерацією.

Тема 25. Цикли ПТУ з проміжним перегрівом пари.

Цикли ПТУ з проміжним перегрівом пари. Умови ефективного застосування проміжного перегріву в циклі ПТУ.

Тема 26. Теплофікаційні цикли ПТУ.

Теплофікаційні цикли ПТУ, їх переваги та недоліки порівняно з конденсаційними циклами.

Тема 27. Цикли парогазових установок (ПГУ).

Цикли парогазових установок (ПГУ). Схеми ПГУ з вприскуванням води і пари, з контактними економайзерами.

Тема 28. Методи розрахунків циклів ПГУ.

Методи розрахунків циклів ПГУ. Порівняння показників роботи комбінованих установок, ПТУ та ГТУ.

**Змістовий модуль 11. Цикли холодильних машин і теплонасосних установок.**

Тема 29. Цикли холодильних машин. Газова холодильна машина.

Цикли холодильних машин та теплонасосних установок. Цикл газової холодильної машини.

Тема 30. Газова холодильна машина з проміжним газоохолодником.

Цикл газової холодильної машини з проміжним газоохолодником та його переваги.

Тема 31. Цикли парокомпресійних холодильних машин.

Робочі тіла для парокомпресійних холодильних машин. Цикли парокомпресійних холодильних машин. Цикли парокомпресійних холодильних машин з регенерацією теплоти.

Тема 32. Цикли пароструминних та абсорбційних холодильних машин.

Цикли пароструминних холодильних машин. Цикли абсорбційних холодильних машин.

Тема 33. Цикли теплонасосних установок.

Цикли теплонасосних установок. Робочі тіла. Цикли парокомпресійних теплонасосних установок. Цикли абсорбційних теплонасосних установок.

**Змістовий модуль 12. Ексергетичні баланси стаціонарних поточних процесів.**

Тема 34. Ексергетичні баланси стаціонарних поточних процесів.

Ексергія усталеного потоку речовини. Ексергетичні баланси. Внутрішні та зовнішні втрати ексергії, ексергетичні коефіцієнти корисної дії.

## 2 ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

### 2.1 Термодинамічні процеси витікання газів і пари

**Приклад 2.1.** Початкове значення ентропії пари дорівнює  $7 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , а кінцеві параметри пари за соплом складають:  $t_2 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $x_2 = 0,84$ . Визначити тип сопла, витрату пари, втрати енергії в процесі витікання, потужність парової турбіни, якщо швидкість витікання пари із сопла діаметром  $25 \text{ мм}$  складає  $580 \text{ м/с}$ .

#### Розв'язання

Задачу розв'язуємо з використанням  $h$ - $s$  діаграми (рис. 2.1).

Визначаємо на діаграмі кінцеву точку стану пари в процесі розширення (рис. 2.1).

Параметри в точці 2д:  $h_{2д} = 2160 \text{ кДж/кг}$ ;  $s_{2д} = 7,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $P_2 = 4 \text{ кПа}$ ;  $v_{2д} = 27 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

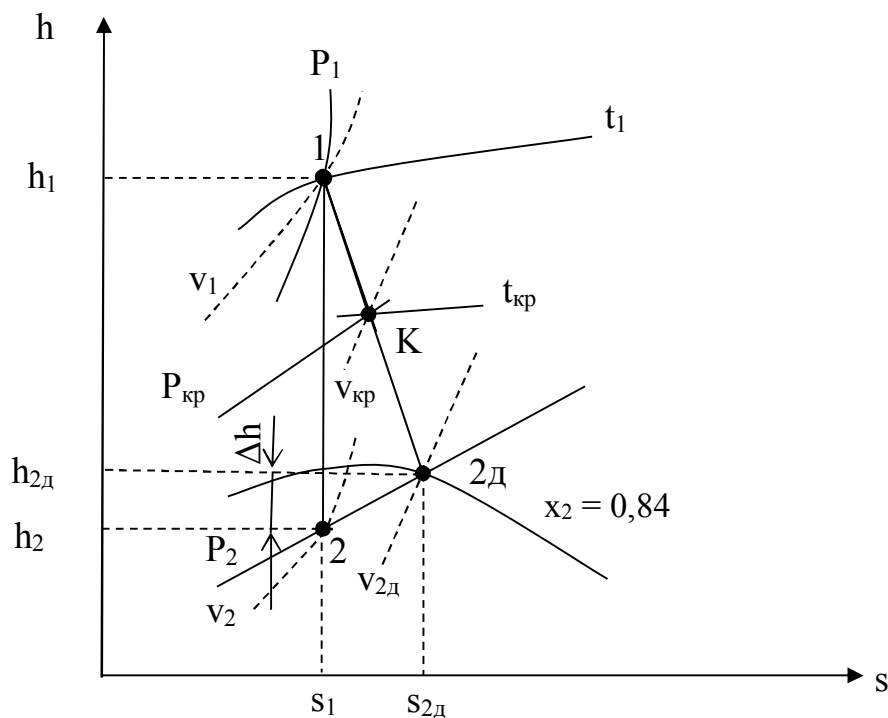


Рисунок 2.1 – Зображення процесу на  $h$ - $s$  діаграмі

Дійсна швидкість пари на виході із сопла,  $\text{м/с}$

$$C_{2д} = 44,72 \cdot \sqrt{h_1 - h_{2д}} .$$

Звідси визначимо початкову ентальпію пари

$$h_1 = h_{2д} + (C_{2д})^2/44,72^2 = 2160 + (580)^2/44,72^2 = 2328 \text{ кДж/кг.}$$

На діаграмі на перетині  $h_1$  та  $s_1$  будуємо точку 1 та визначаємо параметри:  $t_1 = 58 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $P_1 = 18 \text{ кПа}$ .

$$\text{Відношення тисків } \beta = P_2/P_1 = 4/18 = 0,22 < \beta_{кр} = 0,540.$$

В цьому випадку  $C_2 > C_{кр}$ , отже, це комбіноване сопло (сопло Лаваля).

Критичний тиск

$$P_{кр} = \beta_{кр} \cdot P_1 = 0,54 \cdot 18 = 9,72 \text{ кПа.}$$

На діаграмі на перетині лінії процесу 1 – 2д та  $P_{кр}$  будуємо т. К та визначаємо параметри:  $h_{кр} = 2260 \text{ кДж/кг}$ ;  $v_{кр} = 14,5 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $t_{кр} = 46 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Швидкість пари в критичному перерізі сопла

$$C_{кр} = 44,72 \cdot \sqrt{h_1 - h_{кр}} = 44,72 \sqrt{2328 - 2260} = 369 \text{ м/с.}$$

Масова витрата газу

$$G = f_2 \cdot C_{2д}/v_{2д} = 49 \cdot 10^{-5} \cdot 580/27 = 0,0105 \text{ кг/с.}$$

Теоретична потужність

$$N_T = G \cdot (h_1 - h_{2д}) \cdot 10^{-3} = 0,0105 \cdot (2328 - 2160) \cdot 10^{-3} = 1,764 \text{ кВт.}$$

На діаграмі будуємо т. 2 на перетині  $s_1$  та  $P_2$  та визначаємо ентальпію  $h_2 = 2140 \text{ кДж/кг}$ .

Теоретична швидкість пари на виході з сопла

$$C_2 = 44,72 \cdot \sqrt{h_1 - h_2} = 44,72 \sqrt{2328 - 2140} = 613 \text{ м/с.}$$

Швидкісний коефіцієнт

$$\varphi = C_{2д}/C_2 = 580/613 = 0,946.$$

Коефіцієнт втрат енергії

$$\xi = 1 - \varphi^2 = 1 - 0,946^2 = 0,105.$$

Втрати енергії в сопловому апараті

$$\Delta h = \xi(h_1 - h_2) = h_{2д} - h_2 = 2160 - 2140 = 20 \text{ кДж/кг.}$$

## 2.2 Стиснення газів в компресорах

**Приклад 2.2.** Поршневий компресор стискає двоокис вуглецю з параметрами:  $\rho_1 = 1,3 \text{ кг/м}^3$ ,  $t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , до семикратного збільшення тиску. Потужність привода компресора дорівнює 50 кВт. Визначити масову подачу компресора, якщо  $\eta_o = 0,82$ ;  $\eta_m = 0,85$ ;  $\eta_{oi} = 0,8$ ;  $\omega = 100,48 \text{ рад/с}$ ;  $n = 1,2$ . Визначити також діаметр і хід поршня, якщо  $S = 1,15 D$ .

### Розв'язання

Газова стала

$$R = 8,314/\mu = 8,314/44 = 0,189 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

Питомий об'єм газу перед стиском

$$v_1 = 1/\rho_1 = 1/1,3 = 0,77 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Початковий тиск газу

$$P_1 = R \cdot T_1/v_1 = 0,189 \cdot 283/0,77 = 69,46 \text{ кПа}.$$

Питома теоретична робота компресора

$$\begin{aligned} l_k &= n \cdot R \cdot T_1 (1 - \lambda^{(n-1)/n}) / (n - 1) = \\ &= 1,2 \cdot 0,189 \cdot 283 \cdot (1 - 7^{(1,2-1)/1,2}) / (1,2 - 1) = -123 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Внутрішня потужність компресора

$$N_i = N_e \cdot \eta_m = (-50) \cdot 0,85 = -42,5 \text{ кВт}.$$

Масова подача компресора

$$G = \frac{N_i}{l_k \cdot \eta_{oi}} = \frac{-42,5}{-123 \cdot 0,8} = 0,43 \text{ кг/с}.$$

Об'ємна подача компресора

$$V = G/\rho_1 = 0,43/1,3 = 0,33 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Частота обертання вала

$$n_b = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \frac{100,48}{2 \cdot 3,14} = 16 \text{ об/с}.$$

З рівняння подачі компресора визначимо діаметр поршня

$$D = \sqrt[3]{\frac{V}{0,785 \cdot 1,15 \cdot n_b \cdot \eta_o}} = \sqrt[3]{\frac{0,33}{0,785 \cdot 1,15 \cdot 16 \cdot 0,82}} = 0,303 \text{ м}.$$

Хід поршня

$$S = D \cdot 1,15 = 0,303 \cdot 1,15 = 0,348 \text{ м.}$$

**Приклад 2.3.** Подача повітряного компресора 360 м<sup>3</sup>/год для тиску В = 750 мм рт. ст.,  $v_1 = 0,9 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Процес стискання політропний з  $n = 1,2$ . Визначити необхідну теоретичну потужність привода компресора, діаметр і хід поршня, якщо  $S/D = 1,15$ , швидкість поршня 5 м/с, в процесі стискання густина зростає в чотири рази.

### Розв'язання

Температура повітря перед компресором

$$T_1 = P_1 \cdot v_1 / R = 99,75 \cdot 0,9 / 0,287 = 313 \text{ К,}$$

де  $P_1 = B \cdot 0,133 = 750 \cdot 0,133 = 99,75 \text{ кПа}$ ;

$R = 8,314 / \mu = 8,314 / 29 = 0,287 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

Питомий об'єм повітря за компресором

$$\rho_2 / \rho_1 = v_1 / v_2 = 4 \quad v_2 = v_1 / 4 = 0,9 / 4 = 0,225 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Температура повітря за компресором

$$T_2 = T_1 \cdot (v_1 / v_2)^{n-1} = 313 \cdot 4^{1,2-1} = 413 \text{ К.}$$

Тиск повітря за компресором

$$P_2 = P_1 \cdot (v_1 / v_2)^n = 99,75 \cdot 4^{1,2} = 527 \text{ кПа.}$$

Міра підвищення тиску в компресорі

$$\lambda = P_2 / P_1 = 527 / 99,75 = 5,28.$$

Питома теоретична робота компресора

$$l_k = n \cdot R \cdot T_1 \cdot (1 - \lambda^{(n-1)/n}) / (n - 1) = \\ = 1,2 \cdot 0,287 \cdot 313 (1 - 5,28^{(1,2-1)/1,2}) / (1,2 - 1) = -172 \text{ кДж}/\text{кг.}$$

Теоретична потужність компресора

$$N_T = \rho_1 \cdot l_k \cdot V = 1,11 \cdot (-172) \cdot 0,1 = -19,09 \text{ кВт,}$$

де  $\rho_1 = 1/v_1 = 1/0,9 = 1,11 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

$V = 360/3600 = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Діаметр поршня

$$D = (2V / (0,785 \cdot W_n))^{0,5} = (2 \cdot 0,1 / (0,785 \cdot 5))^{0,5} = 0,226 \text{ м.}$$

Хід поршня

$$S = D \cdot 1,15 = 0,226 \cdot 1,15 = 0,26 \text{ м.}$$

## 2.3 Цикли газотурбінних установок

**Приклад 2.4.** Виконати розрахунки циклу ГТУ, визначити термічний ККД та витрату умовного палива на ГТУ. Газотурбінна установка працює за циклом Брайтона. Потужність електрогенератора ГТУ становить 10 МВт. Температура повітря перед компресором  $T_1 = 278 \text{ К}$ . Міра підвищення тиску в компресорі  $\lambda_k = 5,4$ . Температура газів за турбіною  $T_3 = 1203 \text{ К}$ . Теплоємність повітря  $C_{pp} = 1,05 \text{ кДж/(кг К)}$ , теплоємність газів:  $C_{pg} = 1,17 \text{ кДж/(кг К)}$ .

### Розв'язання

Схема ГТУ наведена на рис. 2.2. В ГТУ відкритого типу компресор К стискає повітря з навколишнього середовища, яке з параметрами  $P_2, T_2$  надходить в камеру згорання КЗ. У камеру згорання також під тиском надходить рідке або газоподібне паливо. Продукти згорання палива (димові гази) з температурою  $T_3$  надходять в газову турбіну ГТ, звідки після здійснення роботи виштовхуються в навколишнє середовище.

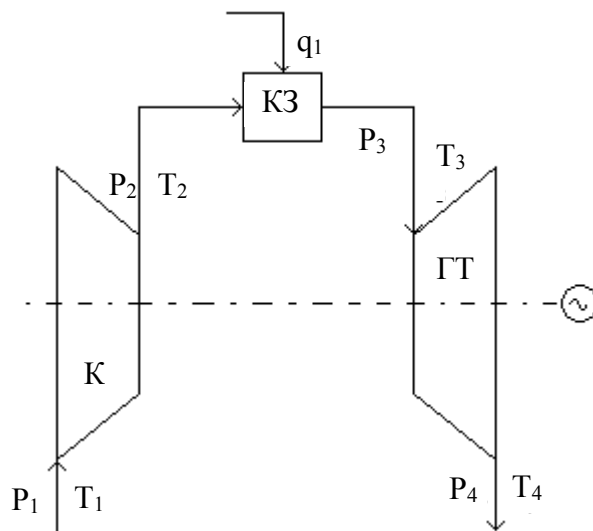


Рисунок 2.2 – Схема ГТУ відкритого типу



Показник степеня

$$m = \frac{k-1}{k} = \frac{1,4-1}{1,4} = 0,286,$$

де  $k$  – показник адиабати; для повітря  $k = 1,4$ .

Температура повітря за компресором

$$T_2 = T_1 \cdot \lambda_k^m = 278 \cdot 5,4^{0,286} = 450 \text{ К.}$$

Температура газів за турбіною

$$T_4 = \frac{T_1 \cdot T_3}{T_2} = \frac{278 \cdot 1203}{450} = 737 \text{ К.}$$

Ізобарна теплоємність повітря  $C_{рп} = 1,05 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{°C)}$ .

Ізобарна теплоємність газів  $C_{рг} = 1,17 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{°C)}$ .

Питома робота компресора

$$l_k = C_{рп} \cdot (T_2 - T_1) = 1,05 \cdot (450 - 278) = 180,6 \text{ кДж/кг.}$$

Питома робота газів в турбіні

$$l_T = C_{рг} \cdot (T_3 - T_4) = 1,17 \cdot (1203 - 743) = 538,2 \text{ кДж/кг.}$$

Питома робота циклу ГТУ

$$l_{ц} = l_T - l_k = 538,2 - 180,6 = 357,6 \text{ кДж/кг.}$$

Питома теплота, підведена в камеру згорання,

$$q_{кз} = q_1 = C_{рг} \cdot T_3 - C_{рп} \cdot T_2 = 1,17 \cdot 1203 - 1,05 \cdot 450 = 935,01 \text{ кДж/кг.}$$

Термічний ККД циклу ГТУ

$$\eta_t = \frac{l_{ц}}{q_{кз}} = \frac{357,6}{935,01} = 0,382.$$

Питома витрата умовного палива на ГТУ

$$b_y^{гту} = \frac{0,123}{\eta_t} = \frac{0,123}{0,382} = 0,322 \text{ кг у. п. / (кВт}\cdot\text{год.)}$$

Загальна витрата умовного палива на ГТУ

$$B_y^{ГТУ} = \frac{b_y^{ГТУ} \cdot N_e^{ГТУ}}{3,6} = \frac{0,322 \cdot 10}{3,6} = 0,894 \text{ кг у. п. / с.}$$

Витрата робочого тіла в ГТУ

$$G_{\Gamma} = \frac{N_e^{ГТУ}}{l_{ц}} = \frac{10 \cdot 10^3}{357,6} = 27,964 \text{ кг/с.}$$

Потужність компресора

$$N_{к} = G_{\Gamma} \cdot l_{к} \cdot 10^{-3} = 27,964 \cdot 180,6 \cdot 10^{-3} = 5,05 \text{ МВт.}$$

Потужність газової турбіни

$$N_{ГТ} = N_e^{ГТУ} + N_{к} = 10 + 5,05 = 15,05 \text{ МВт.}$$

Теплота, підведена в камеру згорання,

$$Q_{кз} = G_{\Gamma} \cdot q_{кз} \cdot 10^{-3} = 27,964 \cdot 935,01 \cdot 10^{-3} = 26,147 \text{ МВт.}$$

Коефіцієнт використання потужності

$$\varphi = \frac{N_e^{ГТУ}}{N_{ГТ}} = \frac{10}{15,05} = 0,664.$$

**Приклад 2.5** Виконати розрахунки циклу ГТУ, визначити термічний ККД та витрату умовного палива на ГТУ. Газотурбінна установка працює за циклом Брайтона з регенерацією теплоти. Потужність електрогенератора ГТУ становить 6 МВт. Температура повітря перед компресором  $T_1 = 293 \text{ К}$ . Температура газів за турбіною становить  $T_3 = 1350 \text{ К}$ . Міра підвищення тиску в компресорі  $\lambda_{к} = 6,8$ . Теплоємність повітря  $C_{рп} = 1,05 \text{ кДж/(кг К)}$ , теплоємність газів:  $C_{рГ} = 1,17 \text{ кДж/(кг К)}$ . Значення міри регенерації  $\sigma = 0,4$ .

### Розв'язання

Схема ГТУ з регенерацією наведена на рис. 2.3. Ця схема ГТУ відрізняється від попередньої схеми (рис. 2.2) наявністю повітрянагрівника ПН, в якому газів після турбіни нагрівають стиснене повітря від температури  $T_2$  до температури  $T_{пв}$ . При цьому температура димових газів зменшується від  $T_4$  до  $T_{вГ}$ . В реальному процесі в повітрянагрівнику повітря не догрівається до температури  $T_4$  на величину  $\theta = T_4 - T_{пв}$ . Тому ефективність повітрянагрівника характеризується співвідношенням

$$\sigma = \frac{T_{\text{ПВ}} - T_2}{T_4 - T_2} = 1 - \frac{\theta}{T_4 - T_2},$$

в якому коефіцієнт  $\sigma < 1$  називається **мірою регенерації**.

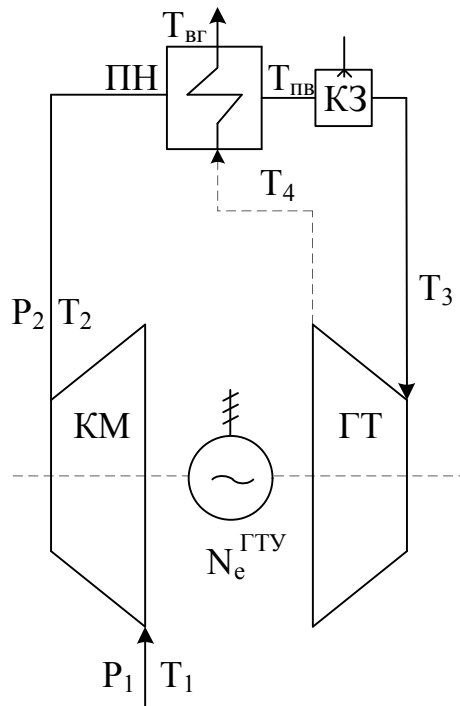


Рисунок 2.3 – Схема газотурбінної установки з регенерацією:

ГТ – газова турбіна; КЗ – камера згорання;

КМ – компресор; ПН – повітрянагрівник

В такій ГТУ надходження більш підігрітого повітря в камеру згорання, за умови  $T_3 = \text{const}$ , дає змогу зменшити величину підведеної в камеру згорання теплоти  $q_1$ , а, отже, і зменшити витрату палива на ГТУ.

Показник степеня

$$m = \frac{k-1}{k} = \frac{1,4-1}{1,4} = 0,286,$$

де  $k$  – показник адіабати; для повітря  $k = 1,4$ .

Температура повітря за компресором

$$T_2 = T_1 \cdot \lambda_{\text{к}}^m = 293 \cdot 6,8^{0,286} = 511 \text{ К.}$$

Температура газів за турбіною

$$T_4 = \frac{T_1 \cdot T_3}{T_2} = \frac{293 \cdot 1350}{511} = 599 \text{ К.}$$

Питома робота компресора

$$l_k = C_{pp} \cdot (T_2 - T_1) = 1,05 \cdot (511 - 293) = 228,9 \text{ кДж/кг.}$$

Питома робота газів в турбіні

$$l_T = C_{pg} \cdot (T_3 - T_4) = 1,17 \cdot (1350 - 774) = 673,92 \text{ кДж/кг.}$$

Питома робота циклу ГТУ

$$l_{\text{ц}} = l_T - l_k = 673,92 - 228,9 = 445,02 \text{ кДж/кг.}$$

Підставимо значення міри регенерації у формулу

$$\sigma = 0,4 = \frac{T_{\text{пв}} - T_2}{T_4 - T_{\text{вг}}},$$

де  $T_{\text{пв}}$  – температура повітря після регенератора перед камерою згорання, яка визначається так:

$$T_{\text{пв}} = \sigma \cdot (T_4 - T_{\text{вг}}) + T_2 = 0,4 \cdot (774 - 423) + 511 = 651,4 \text{ К.}$$

Питома теплота, підведена в камеру згорання,

$$q_{\text{кз}} = q_1 = C_{pg} \cdot T_3 - C_{pp} \cdot T_{\text{пв}} = 1,17 \cdot 1350 - 1,05 \cdot 651,4 = 893,53 \text{ кДж/кг.}$$

Термічний ККД циклу ГТУ

$$\eta_t = \frac{l_{\text{ц}}}{q_{\text{кз}}} = \frac{445,02}{893,53} = 0,498.$$

Питома витрата умовного палива на ГТУ

$$b_y^{\text{ГТУ}} = \frac{0,123}{\eta_t} = \frac{0,123}{0,498} = 0,247 \text{ кг у. п. / (кВт·год.).}$$

Загальна витрата умовного палива на ГТУ

$$B_y^{\text{ГТУ}} = \frac{b_y^{\text{ГТУ}} \cdot N_e^{\text{ГТУ}}}{3,6} = \frac{0,247 \cdot 6}{3,6} = 0,412 \text{ кг у. п. / с.}$$

Витрата робочого тіла в ГТУ

$$G_r = \frac{N_e^{\text{ГТУ}}}{l_{\text{ц}}} = \frac{6 \cdot 10^3}{445,02} = 13,48 \text{ кг / с.}$$

Потужність компресора

$$N_k = G_r \cdot l_k \cdot 10^{-3} = 13,48 \cdot 228,9 \cdot 10^{-3} = 3,086 \text{ МВт.}$$

Потужність газової турбіни

$$N_{\text{ГТ}} = N_e^{\text{ГТУ}} + N_k = 6 + 3,086 = 9,086 \text{ МВт.}$$

Теплота, підведена в камеру згорання,

$$Q_{\text{кз}} = G_r \cdot q_{\text{кз}} \cdot 10^{-3} = 13,48 \cdot 893,53 \cdot 10^{-3} = 12,045 \text{ МВт.}$$

Коефіцієнт використання потужності

$$\varphi = \frac{N_e^{\text{ГТУ}}}{N_{\text{ГТ}}} = \frac{6}{9,086} = 0,66.$$

## 2.4 Цикли паротурбінних установок

Задачі цього розділу розв'язуються за допомогою h-s діаграми водяної пари.

**Приклад 2.6.** Виконати розрахунки циклу ПТУ, визначити термічний ККД та витрату умовного палива на ПТУ. Паротурбінна установка працює за циклом Ренкіна. Потужність електрогенератора ПТУ становить 25 МВт. Параметри пари перед турбіною:  $P_o = 9 \text{ МПа}$ ,  $t_o = 540 \text{ }^\circ\text{C}$ . Паротурбінна установка має один регенеративний підігрівник РП-1, в якому конденсат підігрівається від температури  $t_k$  до температури  $t_{\text{жв}} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$  парою з відбору турбіни при тиску  $P_1 = 1,7 \text{ бар}$ . Тиск пари в конденсаторі  $P_k = 0,045 \text{ бар}$ .

### Розв'язання

Схема ПТУ наведена на рис. 2.4. Зображення циклу ПТУ на h-s діаграмі наведено на рис. 2.5.

Живильний насос ЖН адіабатно стискує живильну воду (конденсат) до тиску  $P_o$ . Живильна вода з температурою  $t_{\text{жв}}$  надходить в парогенератор ПГ. В парогенераторі, за рахунок теплоти, яка вивільняється при згорянні палива, генерується водяна пара з параметрами  $P_o$ ,  $t_o$ ,  $h_o$ . Ця пара надходить в парову турбіну ПТ, де адіабатно розширюється до кінцевих параметрів  $P_k$ ,  $t_k$ ,  $h_k$ , виконуючи технічну роботу.

Відпрацьована в турбіні пара надходить в конденсатор К, внутрішня поверхня якого охолоджується циркуляційною водою. На зовнішній по-

верхні труб конденсатора здійснюється повна конденсація пари, внаслідок чого утворюється глибокий вакуум, тобто кінцевий тиск  $P_k$  стає набагато менший за атмосферний. Зниження кінцевих параметрів пари за рахунок конденсації значно збільшує корисну роботу пари в турбіні та підвищує економічність циклу. Конденсат пари насосом ЖН знову повертається в парогенератор. Такий ідеальний цикл ПТУ, що складається з двох ізобар та двох адіабат, називається **циклом Ренкіна**.

Підвищити ККД циклу ПТУ можна за рахунок збільшення температури живильної води за допомогою регенерації теплоти в циклі. Здійснити регенерацію в циклі Ренкіна можна, якщо конденсат підігрівати паром, яка вже частково відпрацювала в турбіні.

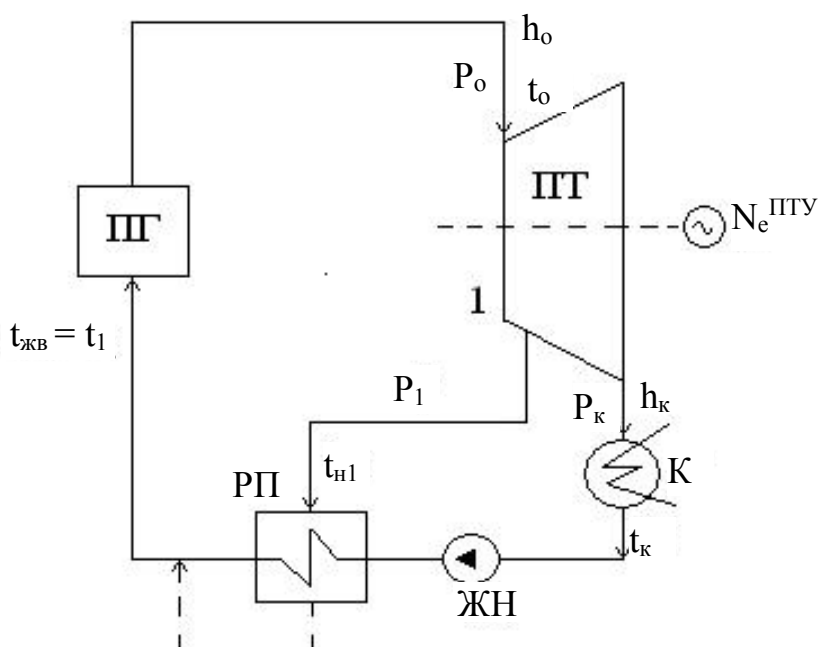


Рисунок 2.4 – Схема ПТУ з одним регенеративним відбором пари

Із відбору турбіни (точка 1) (рис. 2.5) в регенеративний підігрівник РП надходить частка пари  $\alpha_1$  з параметрами  $P_1, h_1$ , яка вже виконала роботу в турбіні  $H_{o1} = h_o - h_1$ . Ця грійна пара підігріває в РП конденсат від температури  $t_k$  до температури  $t_{жв}$ . Конденсат грійної пари при тиску  $P_1$  і температурі насичення  $t_{н1}$  повертається в лінію живильної води.

Інша частка пари  $\alpha_k = 1 - \alpha_1$  продовжує розширення в турбіні, виконуючи роботу  $H_o = h_o - h_k$ , після чого надходить в конденсатор.

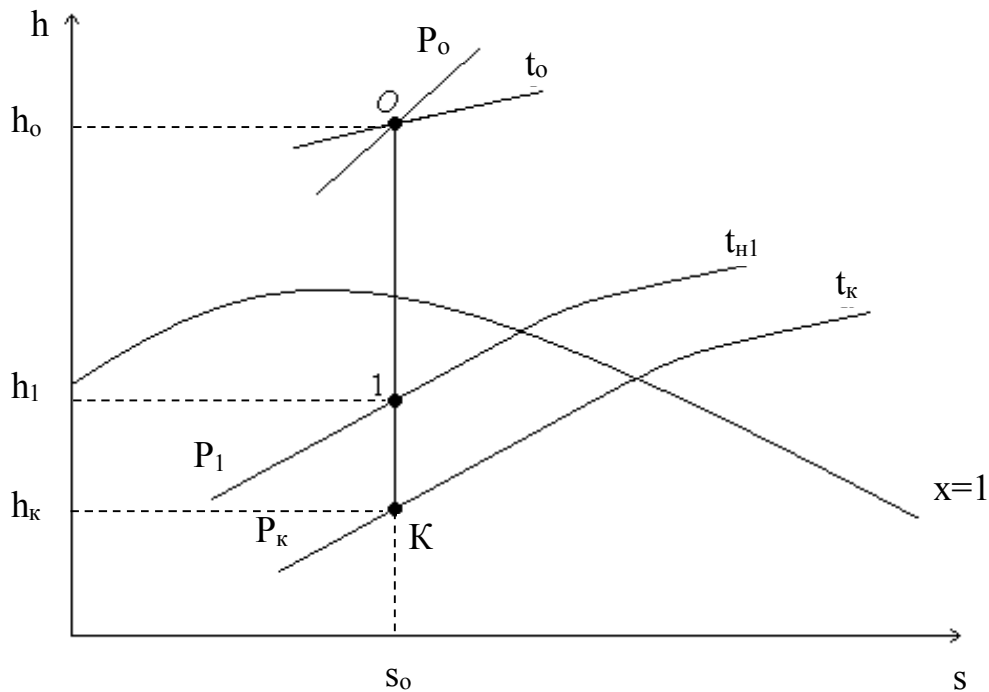


Рисунок 2.5 – Зображення циклу ПТУ з одним регенеративним відбором пари на h-s діаграмі

З h-s діаграми водяної пари визначаємо параметри пари у відповідних точках циклу.

Параметри точки O: ентальпія  $h_o = 3495 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ; ентропія  $s_o = 6,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;  
питомий об'єм  $v_o = 0,04 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ .

Параметри точки K: ентальпія  $h_k = 2060 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ; температура  $t_k = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
питомий об'єм  $v_k = 27 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ ; міра сухості  $x_k = 0,795$ .

Параметри точки 1: температура  $t_{н1} = 115 \text{ }^\circ\text{C}$ ; ентальпія  $h_1 = 2550 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ;  
питомий об'єм  $v_1 = 1 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ ; міра сухості  $x_1 = 0,932$ .

Питома теплота, яку сприймає вода в регенеративному підігрівнику,

$$q_{в1} = C'_p \cdot (t_{жв} - t_k) = 4,19(75 - 27) = 201,12 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Питома теплота, яку віддає пара в РП,

$$q_{п1} = h_1 - C'_p \cdot t_{п1} = 2550 - 4,19 \cdot 115 = 2068,15 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Частка пари з відбору турбіни, яка надходить в РП,

$$\alpha_1 = \frac{q_{в1}}{(q_{в1} + q_{п1})} = \frac{201,12}{(201,12 + 2068,15)} = 0,089.$$

Частка пари, яка надходить на конденсатор,

$$\alpha_k = 1 - \alpha_1 = 1 - 0,089 = 0,911.$$

Теоретична робота пари в турбіні

$$l_{то}^p = \alpha_1(h_o - h_1) + \alpha_k \cdot (h_o - h_k) = 0,089(3495 - 2550) + \\ + 0,911(3495 - 2060) = 1391,39 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Питома теплота, підведена в парогенераторі,

$$q_o^p = h_o - h_{жв} = h_o - C'_p \cdot t_{жв} = 3495 - 4,19 \cdot 75 = 3180,75 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Питомі теплові втрати в конденсаторі

$$q_k^p = h_k - C'_p \cdot t_k = 2060 - 4,19 \cdot 27 = 1946,87 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Термічний ККД циклу ПТУ з регенерацією

$$\eta_{то}^p = \frac{l_{то}^p}{q_o^p} = \frac{1391,39}{3180,75} = 0,437.$$

Питома витрата умовного палива на виробництво 1кВт·год енергії

$$b_y = \frac{0,123}{\eta_{то}^p} = \frac{0,123}{0,437} = 0,281 \text{ кг у. п. / (кВт·год)}.$$

Загальна витрата умовного палива на ПТУ

$$B_y^{пту} = \frac{b_y \cdot N_e^{пту}}{3,6} = \frac{0,281 \cdot 25}{3,6} = 1,951 \text{ кг у. п. / с.}$$

Витрата пари на турбіну



$$D_o = \frac{N_e^{ПТУ}}{I_{Т0}^p} = \frac{0,281 \cdot 25}{3,6} = 1,951 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Витрата пари на конденсатор

$$D_k = \alpha_k \cdot D_o = 0,911 \cdot 17,968 = 16,369 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Витрата пари на РП

$$D_1 = \alpha_1 \cdot D_o = 0,089 \cdot 17,968 = 1,599 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Загальні втрати теплової потужності в конденсаторі

$$Q_k = D_k \cdot q_k \cdot 10^{-3} = 16,369 \cdot 1946,87 \cdot 10^{-3} = 31,868 \text{ МВт}.$$

Теплова потужність, підведена в парогенераторі ПТУ

$$Q_{пт} = D_o \cdot q_o \cdot 10^{-3} = 17,968 \cdot 3180,75 \cdot 10^{-3} = 57,152 \text{ МВт}.$$

## 2.5 Цикли двигунів внутрішнього згорання

**Приклад 2.7.** Визначити допустиму міру стискання для чотиритактного карбюраторного двигуна і його ефективний ККД, якщо початкові параметри робочого тіла з газовою сталою  $R = 0,27 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  складають:  $P_1 = 0,1 \text{ МПа}$ ;  $t_1 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ ; діаметр і хід поршня  $94,5$  і  $80 \text{ мм}$ , відповідно; кількість циліндрів  $z = 4$ ; кутова швидкість обертання колінчастого вала  $\omega = 377 \text{ рад/с}$ ; механічний ККД –  $0,8$ ; витрата палива –  $5,4 \text{ кг/год}$ ; допустима температура займання паливної суміші –  $340 \text{ }^\circ\text{C}$ ; тиск відпрацьованих газів –  $0,2 \text{ МПа}$ ; теплота згорання палива  $Q_n^p = 40 \text{ МДж/кг}$ . В розрахунках прийняти, що робоче тіло – двоатомні гази, а теплоємності – сталі.

### Розв'язання

Допустима міра стискання

$$\varepsilon = v_1/v_2 = (T_d./T_1)^{(k-1)} = (613/290)^{(1,4-1)} = 6,5.$$

Питомий об'єм газів до і після стискання, відповідно,

$$v_1 = R \cdot T_1/P_1 = 0,27 \cdot 290/100 = 0,783 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$v_2 = v_1/\varepsilon = 0,783/6,5 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Термічний ККД циклу

$$\eta_t = 1 - 1/\varepsilon^{k-1} = 1 - 1/6,5^{(1,4-1)} = 0,527.$$

Температура газів в кінці робочого ходу

$$T_4 = T_1 \cdot P_4/P_1 = 290 \cdot 2/1 = 580 \text{ К.}$$

Температура газів після згорання робочої суміші

$$T_3 = T_4 \cdot \varepsilon^{k-1} = 580 \cdot 6,5^{1,4-1} = 1226 \text{ К.}$$

Ізохорна теплоємність робочого тіла

$$C_v = R/(k - 1) = 0,27/(1,4 - 1) = 0,675 \text{ кДж/(кг·К).}$$

Підведена і відведена теплота в циклі, відповідно,

$$q_1 = C_v(T_3 - T_2) = 0,675 (1226 - 613) = 413,77 \text{ кДж/кг;}$$

$$q_2 = C_v(T_4 - T_1) = 0,675 (580 - 290) = 195,77, \text{ кДж/кг.}$$

Питома робота циклу

$$l_{ц} = q_1 - q_2 = 413,77 - 195,77 = 218 \text{ кДж/кг.}$$

Середньоіндикаторний тиск

$$P_i = l_{ц} / (v_1 - v_2) = 218 / (0,783 - 0,12) = 328,8 \text{ кПа.}$$

Робочий об'єм циліндра

$$V_p = 0,785 \cdot D^2 \cdot S = 0,785 \cdot 0,0945^2 \cdot 0,08 = 5,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Частота обертання вала

$$n_b = \omega / (2\pi) = 377 / (2 \cdot 3,14) = 60 \text{ об/с.}$$

Ефективна потужність двигуна

$$\begin{aligned} N_e &= N_i \cdot \eta_m = 2P_i \cdot V_p \cdot n_b \cdot z \cdot \eta_m / \tau = \\ &= 2 \cdot 328,8 \cdot 5,6 \cdot 10^{-4} \cdot 60 \cdot 4 \cdot 0,8 / 4 = 17,67 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

Ефективний ККД двигуна

$$\eta_e = N_e / (B \cdot Q_n^p) = 17,67 / (40 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}) = 0,294.$$

## 2.6 Цикли холодильних машин і теплонасосних установок

**Приклад 2.8.** Визначити холодильний коефіцієнт, потужності компресора і детандера повітряної холодильної машини, якщо відомо: витрата повітря  $V = 7250 \text{ м}^3/\text{год}$ ; параметри навколишнього середовища: барометрич-

ний тиск  $B = 742$  мм рт. ст., питомий об'єм  $v_{nc} = 0,825$  м<sup>3</sup>/кг; температура повітря в холодильній камері  $t_0 = -15$  °С; величина недогріву в холодильній камері та газоохолоднику  $\theta = 6$  °С; холодовидатність  $Q_0 = 100$  кВт; ККД компресора  $\eta_{км} = 0,84$ , ККД детандера  $\eta_d = 0,86$ . Визначити ексергетичний ККД холодильної машини.

### Розв'язання

Схема повітряної холодильної машини наведена на рис. 2.6.

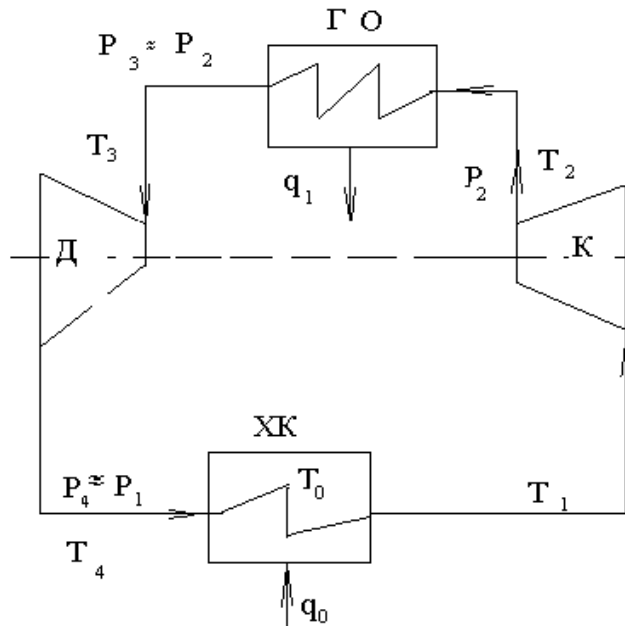


Рисунок 2.6 – Схема повітряної холодильної машини:  
ХК – холодильна камера; К – компресор; ГО – газоохолодник;  
Д – детандер

Атмосферний тиск

$$P_{nc} = (B/750) 100 = (742/750) 100 = 98,93 \text{ кПа.}$$

Температура навколишнього повітря

$$T_{nc} = P_{nc} v_{nc}/R = 98,93 \cdot 0,825/0,287 = 285 \text{ К.}$$

Масова витрата повітря

$$G = V/(v_{nc} \cdot 3600) = 7250 / (0,825 \cdot 3600) = 2,44 \text{ кг/с.}$$

Питома холодовидатність

$$q_0 = Q/G = 100/2,44 = 41 \text{ кДж/кг.}$$

Температури повітря на виході з газоохолодника і холодильної камери

$$T_3 = T_{nc} + \theta = 285 + 6 = 291 \text{ К,}$$

$$T_1 = T_0 - \theta = 258 - 6 = 252 \text{ К.}$$

Температура повітря на виході з детандера

$$T_4 = T_1 - q_0/C_p = 252 - 41/1 = 211 \text{ К.}$$

Питома робота в детандері

$$l_d = C_p(T_3 - T_4) = 1 (291 - 211) = 80 \text{ кДж/кг.}$$

Міра зменшення тиску в детандері

$$\lambda = (T_3/T_4)^{k/(k-1)} = (291/211)^{1,4/(1,4-1)} = 3,08.$$

Температура повітря за компресором

$$T_2 = T_1 [1 + (\lambda^{(k-1)/k} - 1)/\eta_k] = 252 [1 + (3,08^{(1,4-1)/1,4} - 1) / 0,84] = 366 \text{ К.}$$

Питома робота компресора

$$l_k = C_p (T_2 - T_1) = 1 (366 - 252) = 114 \text{ кДж/кг.}$$

Потужність детандера і компресора

$$N_d = G l_d = 2,44 \cdot 80 = 195,2 \text{ кВт}$$

$$N_k = G l_k = 2,44 \cdot 114 = 278,2 \text{ кВт.}$$

Питома робота циклу

$$l_{\text{ц}} = l_k - l_d = 114 - 80 = 34 \text{ кДж/кг.}$$

Холодильний коефіцієнт  $\varepsilon = q_0/l_{\text{ц}} = 41/34 = 1,206$ .

Питома теплота, яка відведена в газоохолоднику

$$q_1 = q_0 + l_{\text{ц}} = 41 + 34 = 75 \text{ кДж/кг.}$$

Питома ексергія підведеної теплоти

$$e_{xq_0} = q_0 (T_{\text{нс}} / T_0 - 1) = 41 (285 / 258 - 1) = 4,29 \text{ кДж/кг.}$$

Ексергетичний ККД холодильної машини

$$\eta_e = e_{xq_0}/l_{\text{ц}} = 4,29/34 = 0,126.$$

**Приклад 2.9.** В парокompресійній теплонасосній установці (ТНУ) з тепловою потужністю випарника  $Q_B = 21$  МВт температура випаровування холодоагенту становить  $t_B = 13$  °С. Температура конденсації  $t_K = 65$  °С. Холодоагентом є аміак. Величина недогріву води у конденсаторі складає  $\theta = 5$  °С. Відносний внутрішній ККД компресора складає  $\eta_{oi}^{KM} = 0,75$ ; а елек-

тримеханічний ККД  $\eta_{ем} = 0,95$ ; ККД теплообмінників  $\eta_{то} = 0,98$ . Визначити температуру води на виході конденсатора  $t_{тн}$ , масову витрату холодоагенту, потужність компресора теплового насоса, теплову потужність конденсатора, коефіцієнт перетворення реального теплонасосного циклу та циклу Карно.

### Розв'язання

Принципова схема парокompресійної ТНУ показана на рис. 2.7.

Побудова циклу парокompресійної ТНУ на  $\lg P-h$  діаграмі показана на рис. 2.8.

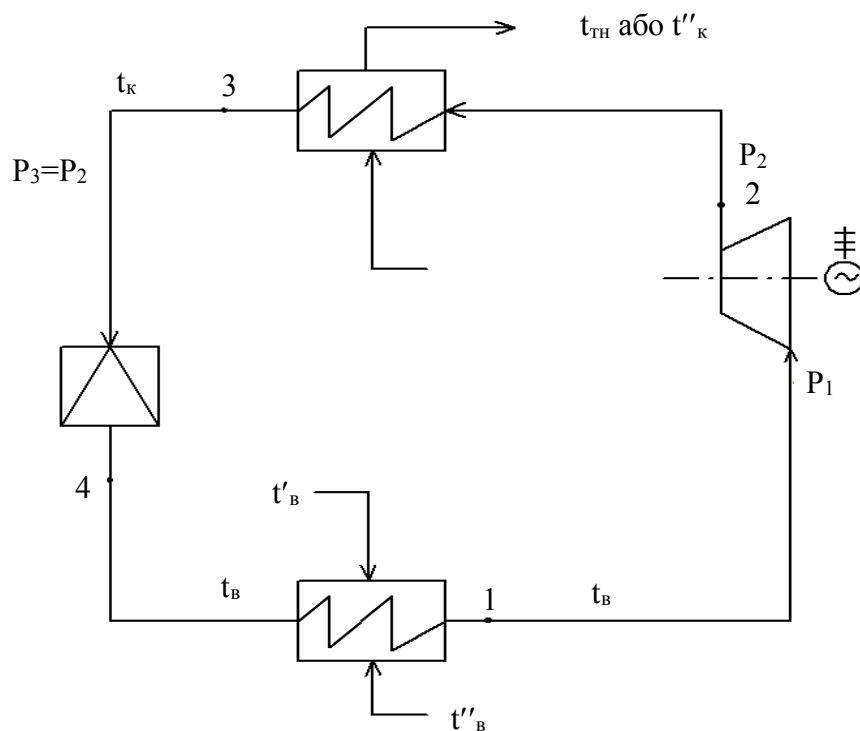


Рисунок 2.7 – Принципова схема парокompресійної ТНУ

Будуємо цикл парокompресійної ТНУ на діаграмі та визначаємо ентальпію холодоагенту у відповідних точках циклу:

$$h_1 = 1675 \text{ кДж/кг}; h_3 = h_4 = 710 \text{ кДж/кг}; h_{2а} = 1897 \text{ кДж/кг}.$$

Визначаємо температуру води на виході з конденсатора теплового насоса

$$t_{тн} = t_к - \theta = 65 - 5 = 60 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

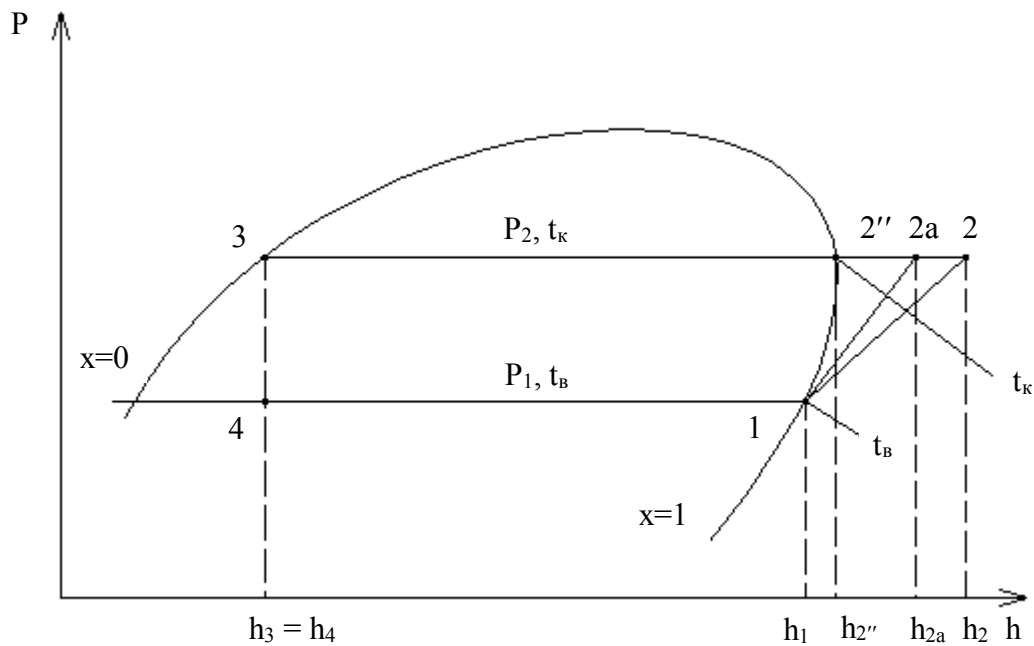


Рисунок 2.8 – Цикл парокompресійні ТНУ на lg P-h діаграмі

Питома теплота, підведена до випарника

$$q_B = h_1 - h_4 = 1675 - 710 = 965 \text{ кДж/кг.}$$

Адіабатний теплоперепад в компресорі

$$H_a = l_{\text{кмо}} = h_{2a} - h_1 = 1897 - 1675 = 222 \text{ кДж/кг.}$$

Дійсний робочий теплоперепад в компресорі

$$H_p = l_{\text{км}} = \frac{H_a}{\eta_{oi}^{\text{км}}} = \frac{222}{0,75} = 296 \text{ кДж/кг.}$$

Дійсна ентальпія холодоагенту на виході з компресора, в точці 2, (рис. 2.8)

$$h_2 = h_1 + H_p = 1675 + 296 = 1971 \text{ кДж/кг.}$$

Питома теплота, відведена з конденсатора

$$q_K = h_2 - h_3 = 1971 - 710 = 1261 \text{ кДж/кг.}$$

Витрата холодоагенту

$$G_{xa} = \frac{Q_B \cdot 10^3}{q_B} = \frac{21 \cdot 10^3}{965} = 21,76 \text{ кг/с.}$$

Потужність, яка витрачається на компресор,

$$N_{\text{км}} = \frac{G_{\text{ха}} \cdot H_{\text{р}}}{\eta_{\text{ем}} \cdot 10^3} = \frac{21,76 \cdot 296}{0,95 \cdot 10^3} = 6,78 \text{ МВт.}$$

Теплова потужність конденсатора

$$Q_{\text{к}} = G_{\text{ха}} \cdot q_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{то}} \cdot 10^3 = 21,76 \cdot 1261 \cdot 0,98 \cdot 10^{-3} = 26,89 \text{ МВт}$$

або з рівняння енергетичного балансу ТНУ

$$Q_{\text{к}} = N_{\text{км}} + Q_{\text{в}} = 6,78 + 21 = 27,78 \text{ МВт.}$$

Примітка. Рівняння енергетичного балансу ТНУ має похибку до 5%.

Коефіцієнт перетворення реального теплонасосного циклу

$$\varphi = \frac{Q_{\text{к}}}{N_{\text{км}}} = \frac{26,89}{6,78} = 3,976.$$

Коефіцієнт перетворення циклу Карно (теоретичний)

$$\varphi_{\text{т}} = \frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{к}} - T_{\text{в}}} = \frac{338}{338 - 286} = 6,5.$$

### 3 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ЗНАНЬ

1. Що розуміють під корисною роботою циклу Ренкіна?
2. Як визначаються теплові втрати в конденсаторі парової турбіни?
3. Як впливає підвищення початкового тиску на значення ентальпій пари перед турбіною і в конденсаторі в циклі Ренкіна?
4. Що розуміють під питомою витратою пари і питомою витратою палива в циклі Ренкіна?
5. З якою метою запроваджують регенеративне підігрівання живильної води в циклі ПТУ?
6. Що розуміють під коефіцієнтом недовироблення при роботі турбіни з відборами пари?
7. Як визначається термічний ККД теоретичного і реального циклу ПТУ?
8. Як впливає збільшення початкової температури пари перед турбіною на ефективність циклу ПТУ?
9. Як впливає збільшення початкового тиску пари перед турбіною на ефективність циклу ПТУ?
10. Як впливає підвищення початкових параметрів пари (тиску і температури) на ефективність циклу ПТУ?
11. Як визначається теоретична робота пари в турбіні при роботі турбіни з відборами пари?
12. Як визначити термічний ККД циклу ПТУ з регенерацією?
13. Як визначається коефіцієнт використання теплоти у теплофікаційному циклі ПТУ?
14. Як визначається термічний ККД циклу ГТУ?
15. Як впливає значення температури  $T_4$  на термічний ККД циклу ГТУ?
16. Для чого здійснюється регенерація в циклі ГТУ?
17. Що називається мірою регенерації?
18. Чи можна досягти повної регенерації в циклі ГТУ і за яких умов?
19. Як впливає регенерація теплоти відхідних газів після турбіни на ефективність роботи ГТУ?
20. З якою метою використовується регенеративне підігрівання повітря в циклі ГТУ?
21. Як впливає температура повітря перед компресором на показники роботи ГТУ?
22. Як визначається термічний ККД парогазової установки?
23. Що характеризує коефіцієнт перетворення і від яких параметрів він залежить?
24. Які установки називаються термотрансформаторами і як оцінюється їх ефективність?



25. Що називають холодильним коефіцієнтом і від яких параметрів він залежить?
26. Як впливає температура в камері охолодження на потужність компресора холодильної машини?
27. Як визначається холодильний коефіцієнт газової холодильної машини?
28. Для чого застосовується проміжний газоохолодник в циклі газових холодильних машин?
29. Для чого застосовується детандер в газових холодильних машинах?
30. Від яких величин залежить значення холодильного коефіцієнта газової холодильної машини з регенерацією?
31. Як впливає значення температури конденсації холодоагенту на потужність компресора холодильної машини?
32. Як впливає значення температур випаровування та конденсації на ефективність холодильної машини?
33. Як впливає величина необоротних втрат при стисненні холодоагенту на ефективність роботи холодильної машини?
34. З якою метою застосовують переохолодження холодоагенту в парокompресійних холодильних машинах?
35. Чи можна в циклі газової холодильної машини замінити детандер дроселем?
36. Чи можна в циклі парокompресійної холодильної машини замінити дросель детандером?
37. Якими показниками оцінюється ефективність роботи теплового насоса?
38. Як впливає температура живильної води на ефективність циклу ПТУ?
39. Як впливає величина втрат в конденсаторі на термічний ККД ПТУ?
40. Як впливає наявність відборів пари на значення термічного ККД ПТУ?
41. Як визначити ексергію теплоти?
42. Як впливає значення температури навколишнього середовища на величину ексергії теплоти?
43. Яка величина називається фактором Карно і що він характеризує?
44. Як впливає температура охолодної води на потужність компресора теплового насоса?
45. Як впливають температури випаровування і конденсації на потужність компресора теплового насоса?
46. Що називають коефіцієнтом перетворення і що він характеризує?

## 4 ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Номер варіанта в задачах 1 – 7 визначається за шифром, який задає викладач.

### Задача 1

Початкові параметри пари в циклі Ренкіна складають:  $t_o$ , °C;  $\rho_o$ , кг/м<sup>3</sup>. Визначити кінцеві параметри пари, теплоту пароутворення в кінцевій точці, витрату умовного палива і охолодної води, якщо її підігрів  $\Delta t$ , °C, потужність електрогенератора  $N_e$ , а витрата пари  $D_o$ .

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Варіанти завдань до задачі 1

Остання цифра шифру	$t_o$ , °C	$\rho_o$ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\Delta t$ , °C	Передостання цифра шифру	$N_e$ , МВт	$D_o$ , $\frac{\text{т}}{\text{год}}$
0	450	10	15	0	10	36
0,36	440	8	20	1	12	38
0,37	430	12	25	2	15	54
0,38	445	11	22	3	17	70
0,355	455	9	24	4	20	72
0,365	435	12	17	5	11	37
0,375	410	11	16	6	14	54
0,344	420	10	18	7	13	43
0,364	415	8	23	8	16	55
0,366	425	9	19	9	19	72

### Задача 2

Температура пари в конденсаторі турбіни становить  $t_k$ , питома втрата теплоти складає  $q_k$ , кВт год. Питома витрата умовного палива в циклі Ренкіна з потужністю електрогенератора  $N_e$  складає  $b_y$ , кг/кВт год. Визначити параметри пари перед турбіною і витрату умовного палива і охолодної води в конденсаторі, якщо її підігрів складає  $\Delta t$ , °C.

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Варіанти завдань до задачі 2

Остання цифра шифру	$t_k$ , °C	$Q_k$ , кВт год	$N_e$ , МВт	Передостання цифра шифру	$b_y$ , $\frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}$	$\Delta t$ , °C
0	30	0,55	12	0	0,35	15
1	40	0,56	10	1	0,36	20
2	50	0,57	15	2	0,37	25
3	33	0,58	17	3	0,38	22
4	35	0,59	20	4	0,355	24
5	37	0,6	11	5	0,365	17
6	45	0,556	14	6	0,375	16
7	30	0,564	13	7	0,344	18
8	33	0,577	16	8	0,364	23
9	43	0,585	19	9	0,366	19

### Задача 3

Політропний компресор з показником політропи  $n$  стискає повітря з початковими параметрами:  $P_1$  та  $t_1$  до  $m$ -кратного збільшення густини. Відношення шкідливого об'єму до робочого об'єму циліндра складає  $\sigma$ . Визначити теоретичну потужність компресора і об'ємний ККД, якщо діаметр циліндра дорівнює ходу поршня  $D=S$ , кутова швидкість вала  $\omega$ .

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Варіанти завдань до задачі 3

Остання цифра шифру	$\omega$ , $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$D$ , мм	$n$	Передостання цифра шифру	$P_1$ , мм рт. ст.	$t_1$ , °C	$m$	$\sigma$
0	90	180	1,1	0	760	20	5	0,055
1	63	150	1,2	1	765	10	6	0,035
2	60	170	1,22	2	770	15	7	0,045
3	70	110	1,24	3	758	11	5,5	0,055
4	72	120	1,21	4	759	12	6,5	0,065
5	77	140	1,15	5	763	13	6,7	0,03
6	84	160	1,17	6	757	14	5,7	0,04
7	88	200	1,13	7	765	16	5,3	0,05
8	85	195	1,09	8	761	17	6,3	0,06
9	68	185	1,16	9	764	18	6,6	0,042

#### Задача 4

Газ з початковими параметрами  $t_1$ ,  $v_1$  стискається в адіабатному компресорі до  $m$ -кратного збільшення тиску. Визначити температуру, густину газу після стиснення, необхідну теоретичну потужність, якщо  $D = 0,95 \cdot S$ ; хід поршня  $S$ , а кутова швидкість вала  $\omega$ .

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Варіанти завдань до задачі 4

Остання цифра шифру	газ	$v_1$ , $\frac{m^3}{kg}$	$t_1$ , $^{\circ}C$	Передостання цифра шифру	$m$	$S$ , мм	$\omega$ , $\frac{рад}{с}$
0	N <sub>2</sub>	0,85	20	0	6,7	180	90
1	O <sub>2</sub>	0,88	10	1	5,7	150	63
2	SO <sub>2</sub>	0,8	15	2	5,3	170	60
3	CO <sub>2</sub>	0,75	11	3	6,3	110	70
4	SO	0,77	12	4	6,6	120	72
5	CO	0,79	13	5	6,7	140	77
6	NO <sub>2</sub>	0,81	14	6	5	160	84
7	повітря	0,83	16	7	6	200	88
8	N <sub>2</sub>	0,87	17	8	7	195	85
9	O <sub>2</sub>	0,82	18	9	5,5	185	68

#### Задача 5

Визначити термічний ККД ГТУ, потужність компресора і електрогенератора, витрату палива з теплою згорання  $Q_n^p$ , якщо відомо: витрата повітря  $V$ , м<sup>3</sup>/с; внутрішній ККД компресора і турбіни – 0,87 і 0,89, відповідно; ККД камери згорання 0,93; механічний ККД 0,96; ККД електрогенератора 0,98. Параметри робочого тіла в точках циклу:  $P_1$ , бар;  $T_1$ , К;  $v_2$ , м<sup>3</sup>/кг;  $t_3$ , °С; міра регенерації дорівнює  $\sigma$ ;  $C_p = 1$  кДж/(кг·К).

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Варіанти завдань до задачі 5

Остання цифра шифру	$Q_n^p$ , МДж/кг	$V$ , м <sup>3</sup> /с	$t_3$ , °С	Передостання цифра шифру	$P_1$ , бар	$T_1$ , К	$v_2$ , м <sup>3</sup> /кг	$\sigma$
0	37	130	975	0	1,017	300	0,2	0,55
1	36	150	1000	1	1,04	273	0,15	0,35
2	32	170	1030	2	1,02	283	0,16	0,45
3	34	110	1050	3	1,03	293	0,17	0,55
4	33,5	120	956	4	1,0	278	0,18	0,65
5	32,5	140	1020	5	1,011	288	0,14	0,3
6	34,5	160	1010	6	1,015	298	0,155	0,4
7	31,5	200	980	7	1,012	302	0,165	0,5
8	35	195	990	8	1,014	305	0,175	0,6
9	33	185	987	9	1,013	303	0,185	0,42

### Задача 6

Визначити потужність, витрату палива і термічний ККД ГТУ, якщо теплота згорання палива  $Q_n^p$ , витрата робочого тіла  $G$ , внутрішній ККД компресора і турбіни – 0,86 і 0,88, відповідно. Параметри робочого тіла в точках циклу:  $P_1$ , бар;  $T_1$ , К;  $v_2$ , м<sup>3</sup>/кг; міра регенерації дорівнює  $\sigma$ ; а температура повітря після регенератора нижча, ніж температура газів після турбіни, на величину  $\Delta T$ .

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Варіанти завдань до задачі 6

Остання цифра шифру	$Q_n^p$ , МДж/кг	$G$ , кг/с	$\sigma$	Передостання цифра шифру	$P_1$ , бар	$T_1$ , К	$v_2$ , м <sup>3</sup> /кг	$\Delta T$ , К
0	33	13	0,55	0	1,013	300	0,2	130
1	31	15	0,35	1	1,04	273	0,15	140
2	32	17	0,45	2	1,02	283	0,16	150
3	34	11	0,55	3	1,03	293	0,17	135
4	33,5	12	0,65	4	1,0	278	0,18	145
5	32,5	14	0,3	5	1,011	288	0,14	155
6	34,5	16	0,4	6	1,015	298	0,155	133
7	31,5	20	0,5	7	1,012	302	0,165	143
8	35	19	0,6	8	1,014	305	0,175	153
9	33	18	0,42	9	1,017	303	0,185	125

### Задача 7

В парокомпресійній теплонасосній установці з тепловою потужністю випарника  $Q_B$  температура випаровування холодоагенту становить  $t_B$ . Температура конденсації  $t_K$ . Холодоагентом є аміак. Величина недогріву води у конденсаторі складає  $\theta = 5$  °С. Відносний внутрішній ККД компресора складає  $\eta_{oi}^{KM} = 0,75$ ; а електромеханічний ККД  $\eta_{em} = 0,95$ ; ККД теплообмінників  $\eta_{то} = 0,98$ .

Визначити температуру води на виході конденсатора  $t_{TH}$ , масову витрату холодоагенту, потужність компресора теплового насоса, теплову потужність конденсатора, коефіцієнт перетворення реального теплонасосного циклу та циклу Карно.

Навести схему ТН та зображення циклу на lg P-h діаграмі.

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Варіанти завдань до задачі 1

Остання цифра шифру	$t_B$ , °С	$t_K$ , °С	Передостання цифра шифру	$Q_B$ , МВт
0	13	80	0	21
1	18	75	1	17
2	13	70	2	14
3	13	65	3	15
4	18	80	4	16
5	23	75	5	18
6	13	70	6	19
7	13	65	7	20
8	18	85	8	17
9	13	80	9	14

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Чепурний М. М. Основи технічної термодинаміки / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця : Поділля-2000, 2003. – 368 с.
2. Чепурний М. М. Технічна термодинаміка в прикладах і задачах / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця : ВНТУ, 2004. – 150 с.
3. Остапенко О. П. Технічна термодинаміка: лабораторний практикум / Остапенко О. П. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 92 с.
4. Техническая термодинамика / [Крутов В. И., Исаев С. И., Кожин И. А. и др.] ; под ред. В. И. Крутова. – М. : Высшая школа, 1991. – 375 с.
5. Беляев Н. М. Термодинаміка / Беляев Н. М. – Киев : Вища школа, 1987. – 246 с.
6. Кириллин В. О. Техническая термодинамика / Кириллин В. О., Сычев В. В., Шейдлин О. Е. – М. : Энергоиздат, 1976. – 324 с.
7. Задачник по технической термодинамике и теории тепломассообмена / [Афанасьев В. Н., Исаев С. И., Кожин И. А. и др.] ; под ред. В. И. Крутова и Г. Б. Петражицкого. – М. : Высшая школа, 1986. – 383 с.
8. Ривкин Л. С. Термодинамические свойства воды и водяного пара / Ривкин Л. С. – М. : Энергия, 1980. – 192 с.
9. Ривкин Л. С. Термодинамические свойства газов / Ривкин Л. С. – М. : Энергия, 1973. – 224 с.

## **ДОДАТКИ**



Додаток А

Таблиця А.1 – Основні фізичні властивості деяких газів

Назва	Хімічна формула	Густина при 0 °С і 760 мм рт. ст.	Молекулярна маса	Газова стала, Дж / кг · К	Температура кипіння при 760 мм рт. ст.	Теплота пароутворення при 760 мм рт. ст., г · 10 <sup>-3</sup> , Дж/кг	Критичні точки		Теплоємність при 20 °С і р = 1 бар, кДж/(кг·К)	
							Температура, °С	Абсолютний тиск, бар	C <sub>p</sub>	C <sub>v</sub>
Азот	N <sub>2</sub>	1,25	28	297	-195,8	199,4	-147,1	33,49	1,05	0,746
Аміак	NH <sub>3</sub>	0,77	17	488	33,4	1374	+132,4	111,5	2,22	1,68
Ацетилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1,171	26,0	320	-83,7(в)	830	+35,7	61,6	1,68	1,36
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	-	78,1	106	+80,2	394	+288,5	47,7	1,25	1,140
Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2,673	58,1	143	-0,5	387	+152	37,5	1,92	1,80
Повітря	-	1,293	(29,0)	287	-195	197	-140,7	37,2	1,01	0,721
Водень	H <sub>2</sub>	0,0899	2,02	2140	-252,8	450,5	-239,9	12,80	14,3	10,14
Гелій	He	0,179	4,0	2080	-268,9	19,5	-268,0	2,26	5,28	3,18
Двоокис азоту	NO <sub>2</sub>	-	46,0	181	+21,2	712	+158,2	100,00	0,804	0,62
Двоокис сірки	SO <sub>2</sub>	2,93	64,1	130	-10,8	394	+157,5	77,78	0,633	0,503
Двоокис вуглецю	CO <sub>2</sub>	1,90	44,0	189	78,2(сп)	574,0	+31,1	72,9	0,838	0,654
Кисень	O <sub>2</sub>	1,429	32	260	-83,0	213	-118,8	49,71	0,913	0,654
Метан	CH <sub>4</sub>	0,72	16,0	519	-161,6	511	-82,15	45,6	2,23	1,70
Окис вуглецю	CO	1,25	28,0	297	-191,5	212	-140,2	34,53	1,05	0,754
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2,02	44,1	189	-42,1	427	+95,6	43	1,87	1,65
Сірководень	H <sub>2</sub> S	1,54	34,1	244	-60,2	549	+100,4	188,9	1,060	0,804
Хлор	Cl <sub>2</sub>	3,22	70,9	117	-33,8	306	+144,0	76,1	0,482	0,355

## Додаток Б

Таблиця Б.1 – Термодинамічні властивості води і водяної пари в стані насичення

р, бар	t, °C	v', м <sup>3</sup> /кг	v'', м <sup>3</sup> /кг	ρ'', кг/м <sup>3</sup>	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	г, кДж/кг
1	2	3	4	5	6	7	8
0,010	6,92	0,0010001	129,9	0,00770	29,32	2513	2484
0,015	13,038	0,0010007	87,9	0,01138	54,75	2525	2470
0,020	17,514	0,0010014	66,97	0,01493	73,52	2533	2459
0,025	21,094	0,0010021	54,24	0,01843	88,5	2539	2451
0,030	24,097	0,0010028	45,66	0,02190	101,04	2545	2444
0,035	26,692	0,0010035	39,48	0,02533	111,86	2550	2438
0,040	28,979	0,0010041	34,81	0,02873	121,42	2554	2433
0,045	31,033	0,0010047	31,13	0,03211	130,00	2557	2427
0,050	32,88	0,0010053	28,19	0,03547	137,83	2561	2423
0,055	34,59	0,0010059	25,77	0,03880	144,95	2564	2419
0,060	36,18	0,0010064	23,74	0,04212	151,50	2567	2415
0,065	37,65	0,0010070	22,02	0,04542	157,68	2570	2412
0,070	39,03	0,0010075	20,53	0,04871	163,43	2572	2409
0,075	40,32	0,0010080	19,23	0,05198	168,8	2574	24,05
0,080	41,54	0,0010085	18,1	0,05525	173,9	2576	2402
0,085	42,69	0,0010090	17,1	0,05849	178,7	2578	2399
0,090	43,79	0,0010094	16,2	0,06172	183,3	2580	2397
0,095	44,84	0,0010098	15,4	0,06493	187,7	2582	2394
0,10	45,84	0,0010103	14,68	0,06812	191,9	2584	2392
0,11	47,72	0,0010111	13,4	0,07462	199,7	2588	2388
0,12	49,45	0,0010119	12,35	0,08097	207	2591	2384
0,13	51,07	0,0010126	11,46	0,08726	213,8	2594	2380
0,14	52,58	0,0010133	10,69	0,09354	220,1	2596	2376
0,15	54	0,0010140	10,02	0,0998	226,1	2599	2373
0,16	55,34	0,0010147	9,429	0,106	231,7	2601	2369
0,17	56,61	0,0010153	8,909	0,1123	236,9	2603	2366
0,18	57,82	0,0010159	8,444	0,1185	241,9	2605	2363
0,19	58,98	0,0010165	8,025	0,1247	246,7	2607	2360
0,20	60,08	0,0010171	7,647	0,1308	251,4	2609	2358
0,21	61,14	0,0010177	7,304	0,1369	255,9	2611	2355
0,22	62,16	0,0010183	6,992	0,143	260,2	2613	2353
0,23	63,14	0,0010188	6,708	0,1491	264,3	2614	2350
0,24	64,08	0,0101930	6,445	0,1551	268,2	2616	2348
0,25	64,99	0,0010199	6,202	0,1612	272	2618	2346
0,26	65,88	0,0010204	5,977	0,1673	275,7	2620	2344
0,27	66,73	0,0010209	5,769	0,1733	279,3	2621	2342
0,28	67,55	0,0010214	5,576	0,1793	282,7	2623	2640
0,29	68,35	0,0010218	5,395	0,1853	286	2624	2338
0,30	69,12	0,0010222	5,226	0,1913	289,3	2625	2336
0,32	70,6	0,0010232	4,922	0,20322	295,5	2627	2332
0,34	72,02	0,001024	4,65	0,2151	301,5	2630	2328

## Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8
0,36	73,36	0,0010248	4,407	0,2269	307,1	2632	2325
0,38	74,64	0,0010256	4,189	0,2387	312,5	2634	2322
0,4	75,88	0,0010264	3,994	0,2504	317,7	2636	2318
0,45	78,75	0,0010282	3,754	0,2797	329,6	2641	2311
0,45	78,75	0,0010282	3,754	0,2797	329,6	2641	2311
0,5	81,35	0,0010299	3,239	0,3087	340,6	2645	2204
0,55	83,74	0,0010315	2,963	0,3375	350,7	2649	2298
0,6	85,95	0,001033	2,732	0,3661	360	2653	2293
0,65	88,02	0,0010345	2,534	0,3946	368,6	2657	2288
0,7	89,97	0,0010359	2,364	0,423	376,8	2660	2283
0,75	91,8	0,0010372	2,216	0,4512	384,5	2663	2278
0,8	93,52	0,0010385	2,087	0,4792	391,8	2665	2273
0,85	95,16	0,0010397	1,972	0,5071	398,7	2668	2269
0,9	96,72	0,0010409	1,869	0,535	405,3	2670	2265
0,95	98,21	0,0010421	1,777	0,5627	411,5	2673	2261
1,00	99,64	0,0010432	1,694	0,5903	417,4	2675	2258
1,1	102,32	0,0010452	1,55	0,6453	428,9	2679	2250
1,2	104,81	0,0010472	1,429	0,6999	439,4	2683	2244
1,3	107,14	0,0010492	1,325	0,7545	449,2	2687	2238
1,4	109,33	0,001051	1,236	0,8088	458,5	2690	2232
1,5	111,38	0,0010527	1,159	0,8627	467,2	2693	2226
1,6	113,32	0,0010543	1,091	0,9164	475,4	2696	2221
1,7	115,17	0,0010559	1,031	0,9699	483,2	2699	2216
1,8	116,94	0,0010575	0,9773	1,023	490,7	2702	2211
1,9	118,62	0,0010591	0,929	1,076	497,9	2704	2206
2	120,23	0,0010605	0,8854	1,129	504,8	2707	2202
2,1	121,78	0,0010619	0,8459	1,182	511,4	2709	2198
2,2	123,27	0,0010633	0,8098	1,235	517,8	2711	2193
2,3	124,71	0,0010646	0,7768	1,287	524	2713	2189
2,4	126,09	0,0010659	0,7465	1,34	529,8	2715	2185
2,5	127,43	0,0010672	0,7185	1,392	535,4	2717	2182
2,6	128,73	0,0010685	0,6925	1,444	540,9	2719	2178
2,7	129,98	0,0010697	0,6684	1,496	546,2	2721	2175
2,8	131,2	0,0010709	0,6461	1,548	551,4	2722	2171
2,9	132,39	0,0010721	0,6253	1,599	556,5	2724	2167
3	133,54	0,0010733	0,6057	1,651	561,4	2725	2164
3,1	134,66	0,0010744	0,5873	1,703	566,3	2727	2161
3,2	135,75	0,0010754	0,5701	1,754	571,1	2728	2157
3,3	136,82	0,0010765	0,5539	1,85	575,7	2730	2154
3,4	137,86	0,0010776	0,5386	1,857	580,2	2731	2151
3,5	138,88	0,0010786	0,5241	1,908	584,5	2732	2148
3,6	139,87	0,0010797	0,5104	1,959	588,7	2734	2145
3,7	140,84	0,0010807	0,4975	2,01	592,8	2735	2142
3,8	141,79	0,0010817	0,4852	2,061	596,8	2736	2139
3,9	142,71	0,0010827	0,4735	2,112	600,8	2737	2136
4	143,62	0,0010836	0,4624	2,163	604,7	2738	2133

## Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8
4,1	144,51	0,0010845	0,4518	2,213	608,5	2740	2131
4,2	145,32	0,0010855	0,4416	2,264	612,3	2741	2129
4,3	146,25	0,0010865	0,4319	2,315	616,1	2742	2126
4,4	147,09	0,0010874	0,4227	2,366	619,8	2743	2123
4,5	147,92	0,0010883	0,4139	2,416	623,4	2744	2121
4,6	148,73	0,0010892	0,4054	2,467	626,9	2745	2118
4,7	149,53	0,0010901	0,3973	2,517	630,3	2746	2116
4,8	150,31	0,001091	0,3895	2,568	633,7	2747	2113
4,9	151,08	0,0010918	0,3819	2,618	636,9	2748	2111
5	151,84	0,0010927	0,3747	2,669	640,1	2749	2109
5,2	153,32	0,0010943	0,3612	2,769	646,5	2750	2104
5,4	154,76	0,001096	0,3485	2,869	652,7	2752	2099
5,6	156,16	0,0010976	0,3368	2,969	658,8	2754	2095
5,6	156,16	0,0010976	0,3368	2,969	658,8	2754	2095
5,8	157,52	0,0010992	0,3258	3,069	664,7	2755	2090
6	158,84	0,0011007	0,3156	3,16	670,5	2757	2086
6,2	160,12	0,0011022	0,306	3,268	676	2758	2082
6,4	161,37	0,0011037	0,297	3,367	681,5	2760	2078
6,6	162,59	0,0011052	0,2885	3,467	686,9	2761	2074
6,8	163,79	0,0011066	0,2804	3,566	692,1	2762	2070
7	164,96	0,0011081	0,2728	3,666	697,2	2764	2067
7,2	166,1	0,0011095	0,2656	3,765	702,2	2765	2063
7,4	167,21	0,0011109	0,2588	3,864	707,1	2766	2059
7,6	168,3	0,0011123	0,2523	3,963	711,8	2767	2055
7,8	169,37	0,0011136	0,2462	4,062	716,4	2768	2052
8	170,42	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769	2048
8,2	171,44	0,0011162	0,2347	4,26	725,4	2770	2045
8,4	172,44	0,0011175	0,2294	4,359	729,8	2771	2041
8,6	173,43	0,0011187	0,2243	4,458	734,2	2772	2038
8,8	174,4	0,00112	0,2195	4,556	738,6	2773	2034
9	175,35	0,0011213	0,2149	4,654	742,8	2774	2031
9,2	176,29	0,0011225	0,2104	4,753	746,9	2775	2028
9,4	177,21	0,0011237	0,2061	4,852	750,9	2776	2025
9,6	178,12	0,0011249	0,202	4,949	754,8	2777	2022
9,8	179,01	0,0011261	0,1982	5,045	758,8	2778	2019
10	179,88	0,0011273	0,1946	5,139	762,7	2778	2015
10,5	182,00	0,0011303	0,1856	5,388	772,1	2779	2007
11	184,05	0,0011331	0,1775	5,634	781,1	2781	2000
11,5	186,04	0,0011358	0,1701	5,879	789,8	2783	1993
12	187,95	0,0011385	0,1633	6,124	798,3	2785	1987
12,5	189,8	0,0011412	0,157	6,369	806,5	2786	1980
13	191,6	0,0011438	0,1512	6,614	814,5	2787	1973
13,5	193,34	0,0011464	0,1458	6,859	822,3	2789	1967
14	195,04	0,001149	0,1408	7,103	830	2790	1960
14,5	196,68	0,0011515	0,1361	7,348	837,4	2791	1954
15	198,28	0,0011539	0,1317	7,593	844,6	2792	1947

## Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8
15,5	199,84	0,0011563	0,1276	7,837	851,5	2793	1941
16	201,36	0,0011586	0,1238	8,08	858,3	2793	1935
16,5	202,85	0,0011609	0,1201	8,325	865	2794	1929
17	204,3	0,0011632	0,1167	8,569	871,6	2795	1923
17,5	205,72	0,0011655	0,1135	8,812	878,1	2796	1918
18	207,1	0,0011678	0,1104	9,058	884,4	2796	1912
18,5	208,45	0,0011700	0,1075	9,303	890,6	2797	1907
19	209,78	0,0011722	0,1047	9,549	896,6	2798	1901
19,5	211,09	0,0011744	0,1021	9,795	902,6	2799	1896
20	212,37	0,0011766	0,09958	10,041	908,5	2799	1891
20,5	213,62	0,0011788	0,09719	10,29	914,2	2800	1886
21	214,84	0,0011809	0,09492	10,54	919,8	2800	1880
21,5	216,05	0,001183	0,09276	10,78	925,4	2800	1875
22	217,24	0,0011851	0,09068	11,03	930,9	2801	1870
19,5	211,09	0,0011744	0,1021	9,795	902,6	2799	1896
22,5	218,41	0,0011872	0,08869	11,28	936,3	2801	1865
23	219,5	0,0011892	0,8679	11,52	941,5	2801	1860
23,5	220,67	0,0011912	0,08498	11,77	946,7	2802	1855
24	221,77	0,0011932	0,8324	12,01	951,8	2802	1850
24,5	222,85	0,0011952	0,08156	12,26	956,8	2802	1845
25	223,93	0,0011972	0,07993	12,51	961,8	2802	1840
25,5	224,99	0,0011992	0,07837	12,76	966,8	2803	1836
26	226,03	0,0012012	0,7688	13,01	971,7	2803	1831
26,5	227,05	0,0012031	0,07545	13,25	976,6	2803	1820
27	228,06	0,001205	0,07406	13,5	981,3	2803	1822
27,5	229,06	0,0012069	0,07271	13,75	985,9	2803	1817
28	230,04	0,0012088	0,07141	14	990,4	2803	1813
28,5	231,01	0,0012107	0,07016	14,25	994,9	2803	1808
29	231,96	0,0012126	0,06895	14,5	999,4	2803	1804
29,5	232,9	0,0012145	0,06778	14,75	1003,8	2804	1800
30	233,83	0,0012163	0,06665	15	1008,3	2804	1796
31	235,66	0,0012201	0,0645	15,5	1016,9	2804	1787
32	237,44	0,0012238	0,06246	16,01	1025,3	2803	1778
33	239,18	0,0012274	0,06055	16,52	1033,7	2803	1769
34	240,88	0,001231	0,05875	17,02	1041,9	2803	1761
35	242,54	0,0012345	0,05704	17,53	1049,8	2803	1753
36	244,16	0,001238	0,05543	18,04	1057,5	2802	1745
37	245,75	0,0012415	0,05391	18,55	1065,2	2802	1737
38	247,31	0,001245	0,05246	19,06	1072,7	2802	1729
39	248,84	0,0012485	0,05108	19,58	1080,2	2801	1721
40	250,33	0,001252	0,04977	20,09	1087,5	2801	1713
41	251,8	0,0012554	0,04852	20,61	1094,7	2800	1705
42	253,24	0,0012588	0,04732	21,13	1101,7	2800	1698
43	254,66	0,0012622	0,04617	21,66	1108,5	2799	1691
44	256,05	0,0012656	0,04508	22,18	1115,3	2798	1683
45	257,41	0,001269	0,04404	22,71	1122,1	2798	1676

## Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8
46	258,75	0,0012724	0,04305	23,23	1128,8	2797	1668
47	260,07	0,0012757	0,0421	23,76	1135,4	2796	1661
48	261,37	0,001279	0,04118	24,29	1141,8	2796	1654
49	262,65	0,0012824	0,04029	24,82	1148,2	2795	1647
50	263,91	0,0012857	0,03944	25,35	1154,4	2794	1640
51	265,15	0,001289	0,03863	25,89	1160,6	2793	1632
52	266,38	0,0012923	0,03784	26,43	1166,8	2792	1625
53	267,58	0,0012955	0,03708	26,97	1172,9	2791	1618
54	268,77	0,0012988	0,03635	27,51	1179	2791	1612
55	269,94	0,0013021	0,03564	28,06	1184,9	2790	1604,6
56	271,1	0,0013054	0,03495	28,61	1190,8	2789	1597,7
57	272,24	0,0013087	0,03429	29,16	1196,6	2788	1591
58	273,6	0,001312	0,03365	29,72	1202,4	2786	1584,3
59	274,47	0,0013152	0,03303	30,28	1208,2	2786	1577,6
60	275,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2785	1570,8
61	276,64	0,0013217	0,03185	31,4	1219,6	2784	1564,1
62	277,71	0,001325	0,0313	31,95	1225,1	2782	1557,4
63	278,76	0,0013282	0,03076	32,51	1230,6	2781	1550,7
64	279,8	0,0013314	0,03024	33,07	1236	2780	1544,1
65	280,83	0,0013347	0,02973	33,64	1241,3	2779	1537,5
66	281,85	0,001338	0,02923	34,21	1246,6	2778	1530,9
67	282,86	0,0013412	0,02874	34,79	1251,8	2776	1524,4
68	283,85	0,0013445	0,02827	35,37	1257	2775	1517,9
69	284,83	0,0013478	0,02782	35,95	1262,2	2773	1511,4
70	285,8	0,001351	0,02737	36,54	1267,4	2772	1504,9
71	286,76	0,0013542	0,02694	37,12	1272,5	2771	1498,4
72	287,71	0,0013574	0,02652	37,71	1277,6	2769	1492
73	288,65	0,0013607	0,02611	38,3	1282,6	2768	1485,6
74	289,58	0,001364	0,02571	38,89	1287,6	2767	1479,2
75	290,5	0,0013673	0,02532	39,49	1292,7	2766	1472,8
76	291,41	0,0013706	0,02494	40,09	1297,7	2764	1466,4
77	292,32	0,0013739	0,02457	40,7	1302,6	2763	1460
78	293,22	0,0013772	0,02421	41,3	1307,4	2761	1453,7
79	294,1	0,0013805	0,02386	41,91	1312,2	2759	1447,4
80	294,98	0,0013838	0,02352	42,52	1317	2758	1441,1
81	295,85	0,0013872	0,02318	43,14	1321,8	2757	1434,8
82	296,71	0,0013905	0,02285	43,76	1326,6	2755	1428,5
83	297,56	0,0013938	0,02253	44,38	1331,4	2753	1422,2
84	298,4	0,0013972	0,02222	45	1336,1	2752	1416
85	299,24	0,0014005	0,02192	45,62	1340,8	2751	1409,8
86	300,07	0,0014039	0,02162	46,25	1345,4	2749	1403,7
87	300,89	0,0014073	0,02132	46,9	1350,1	2747	1397,6
88	301,71	0,0014106	0,02103	47,55	1354,7	2746	1391,5
89	302,52	0,001414	0,02075	48,19	1359,2	2744	1385,4
90	303,32	0,0014174	0,02048	48,83	1363,7	2743	1379,3
91	304,11	0,0014208	0,02021	49,48	1368,2	2741	1373,2

## Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8
92	304,9	0,0014242	0,01995	50,13	1372,7	2740	1367
93	305,67	0,0014276	0,01969	50,79	1377,1	2738	1360,9
94	306,45	0,001431	0,01944	51,45	1381,5	2736	1354,7
95	307,22	0,0014345	0,01919	52,11	1385,9	2734	1348,4
96	307,98	0,001438	0,01895	52,77	1390,2	2732	1342,1
97	308,74	0,0014415	0,01871	53,44	1394,5	2730	1335,8
98	309,49	0,001445	0,01848	54,11	1398,9	2728	1329,5
99	310,23	0,0014486	0,01825	54,79	1403,3	2726	1323,2
100	310,96	0,0014521	0,01803	55,46	1407,7	2725	1317
102	312,42	0,0014592	0,01759	56,85	1416,4	2721	1304,6
104	313,86	0,0014664	0,01716	58,27	1425	2717	1292,3
106	315,28	0,0014736	0,01675	59,7	1433,5	2713	1280
108	316,67	0,0014808	0,01636	61,13	1441,9	2709	1267,3
110	318,04	0,001489	0,01598	62,58	1450,2	2705	1255,4
112	319,39	0,001496	0,01561	64,05	1458,4	2701	1243
114	320,73	0,001503	0,01526	65,54	1466,6	2697	1230,6
116	322,05	0,001511	0,01491	67,06	1474,8	2693	1218,3
118	323,35	0,001519	0,01458	68,59	1483	2689	1205,9
120	324,63	0,001527	0,01426	70,13	1491,1	2685	1193,5
122	325,9	0,001535	0,01395	71,7	1499,2	2680	1181
124	327,15	0,001543	0,01364	73,3	1507,3	2676	1168,5
126	328,39	0,001551	0,01334	74,94	1515,4	2671	1156
128	329,61	0,001559	0,01305	76,61	1523,5	2667	1143,4
130	330,81	0,001567	0,01277	78,3	1531,5	2662	1130,8
132	332	0,001576	0,0125	80	1539,5	2658	1118,2
134	333,18	0,001585	0,01224	81,72	1547,3	2653	1105,5
136	334,34	0,001594	0,01198	83,47	1555,1	2648	1092,7
138	335,49	0,001602	0,01173	85,25	1562,9	2643	1079,9
140	336,63	0,001611	0,01149	87,03	1570,8	2638	1066,9
142	337,75	0,00162	0,01125	88,89	1578,7	2633	1053,8
144	338,86	0,001629	0,01101	90,83	1586,6	2628	1040,7
146	339,96	0,001638	0,01078	92,76	1594,5	2622	1027,6
148	341,04	0,001648	0,01056	94,69	1602	2617	1014,5
150	342,11	0,001658	0,01035	96,62	1610	2611	1001,1
152	343,18	0,001668	0,01014	98,62	1618	2606	987,5
154	344,23	0,001678	0,009928	100,72	1626	2600	973,8
156	345,27	0,001688	0,00972	102,9	1634	2594	960
158	346,3	0,001699	0,009517	105,1	1642	2588	946,1
160	347,32	0,00171	0,009318	107,3	1650	2582	932
162	348,33	0,001721	0,009124	109,6	1658	2576	917,7
164	349,32	0,001732	0,008934	111,9	1666	2569	903,2
166	350,31	0,001744	0,008747	114,3	1674	2562	888,4
168	351,29	0,001756	0,008563	116,8	1682	2555	873,4
170	352,26	0,001768	0,008382	119,3	1690	2548	858,3
172	353,21	0,001781	0,008203	121,9	1698	2541	843
174	354,17	0,001794	0,008025	124,6	1707	2534	827,4

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8
176	355,11	0,001808	0,007848	127,4	1715	2526	811,4
178	356,04	0,001822	0,007674	130,3	1723	2518	795
180	356,96	0,001837	0,007504	133,2	1732	2510	778,2
182	357,87	0,001853	0,007336	136,3	1741	2502	761,2
184	358,78	0,00187	0,007169	139,5	1749	2493	743,9
186	359,67	0,001887	0,007003	142,8	1758	2484	726,4
188	360,56	0,001904	0,00684	146,2	1767	2475	708,5
190	361,44	0,001921	0,00668	149,7	1776	2466	690
192	362,31	0,00194	0,00652	153,4	1785	2456	671
194	363,17	0,001961	0,00636	157,3	1795	2446	651
196	364,02	0,001985	0,00619	161,6	1805	2435	630
198	364,87	0,00201	0,00602	166,1	1816	2423	607
200	365,71	0,00204	0,00585	170,9	1827	2410	583
202	366,54	0,00207	0,00568	176	1838	2397	559
204	367,37	0,0021	0,00551	181,4	1849	2383	534
206	368,18	0,00213	0,00534	187,2	1861	2369	508
208	368,99	0,00217	0,00516	193,6	1874	2353	479
210	369,79	0,00221	0,00498	200,7	1888	2336	448
212	370,58	0,00226	0,0048	208,5	1903	2316	413
214	371,4	0,00232	0,0046	217,4	1920	2294	374
216	372,2	0,00239	0,00436	229,3	1940	2269	329
218	372,9	0,00249	0,00402	248,7	1965	2233	268
220	373,7	0,00273	0,00367	272,5	2016	2168	152

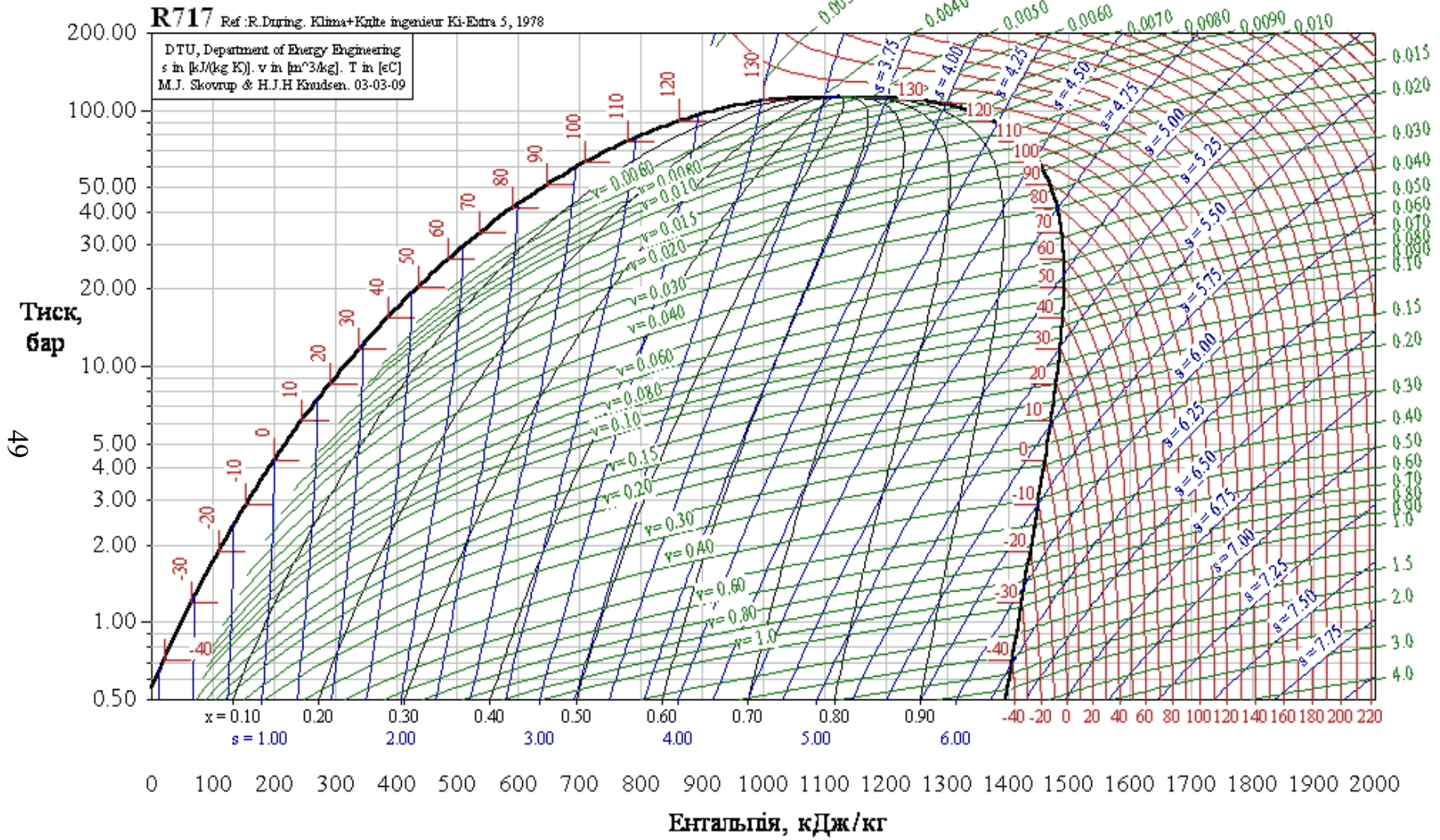


## Додаток В

Таблиця В.1 – Теплофізичні властивості сухого повітря за умови нормального атмосферного тиску

t, °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_p$ , кДж/(кг·°C)	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·°C)	$a \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^6$ , Н·с/м <sup>2</sup>	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
-50	1,548	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	212	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,803	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	44,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

Додаток Г – Lg P-h діаграма холодоагенту R717



*Навчальне видання*

Методичні вказівки  
до виконання контрольних робіт  
з дисципліни «Технічна термодинаміка»  
(частина 2)  
для студентів напряму підготовки  
«Теплоенергетика» заочної форми навчання

Редактор В. Дружиніна  
Коректор З. Поліщук

Укладач Остапенко Ольга Павлівна

Оригінал-макет підготовлено О. Остапенко

Підписано до друку  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. .  
Наклад пр. Зам. № .

Вінницький національний технічний університет,  
навчально-методичний відділ ВНТУ.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, к. 2201.  
тел. (0432) 59-87-36.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к.114.  
Тел. (0432) 59-87-38.  
publish.vntu.edu.ua; email: kivc.vntu@gmail.com  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.