

**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  
2017

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, 2017. – 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. Н-s діаграма водяної пари та принципи її побудови.

Н-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, ізоентропний (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. Н-d діаграма вологого повітря. Основні процеси з вологим повітрям.

Н-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 дифузорі.

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:  $t_2 = 30^\circ \text{C}$ ;  $x_2 = 0,84$ . Визначити тип сопла, витрату пари, втрати енергії в процесі витікання, потужність парової турбіни, якщо швидкість витікання пари із сопла діаметром 25 мм складає 580 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:  $h_{2д} = 2160 \text{ кДж}/\text{кг}$ ;  $s_{2д} = 7,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $P_2 = 4 \text{ кПа}$ ;  $v_{2д} = 27 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

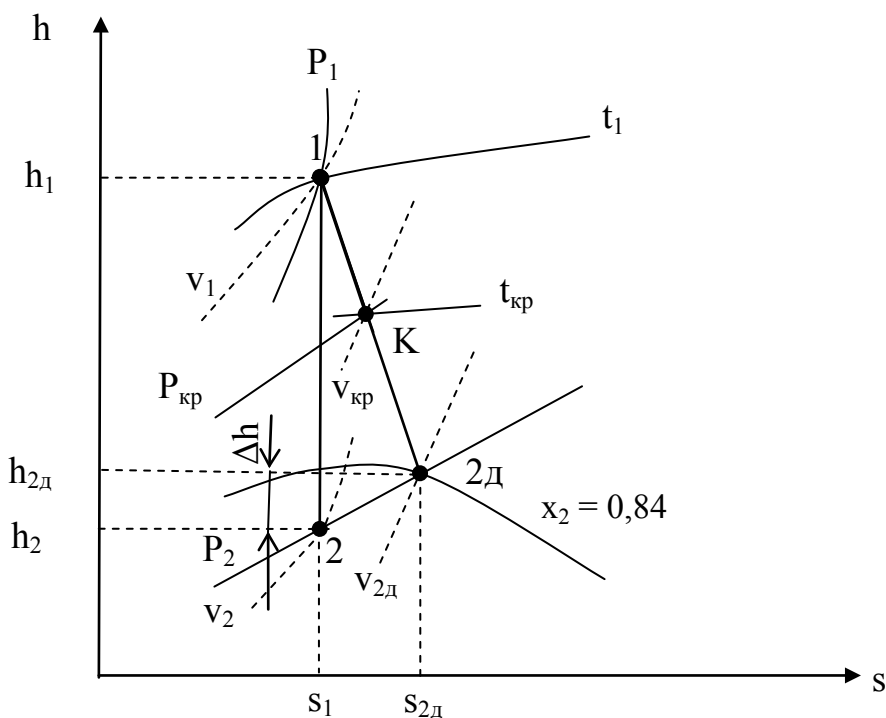


Рисунок 2.1 – Зображення процесу на  $h$ - $s$  діаграмі

Дійсна швидкість пари на виході із сопла, 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:  $t_1 = 58^\circ\text{C}$ ;  $P_1 = 18 \text{ кПа}$ .

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 Лавалю).

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:  $h_{кр} = 2260 \text{ кДж/кг}$ ;  $v_{кр} = 14,5 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $t_{кр} = 46^\circ\text{C}$ .

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:  $\rho_1 = 1,3 \text{ кг/м}^3$ ,  $t_1 = 10^\circ\text{C}$ , 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  $S = 1,15 \text{ D}$ .

### 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  $P = 750 \text{ мм рт. ст.}$ ,  $v_1 = 0,9 \text{ м}^3/\text{кг}$ . 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  $P_1 = B \cdot 0,133 = 750 \cdot 0,133 = 99,75 \text{ кПа}$ ;

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

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

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

Теоретична потужність компресора

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

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

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

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.

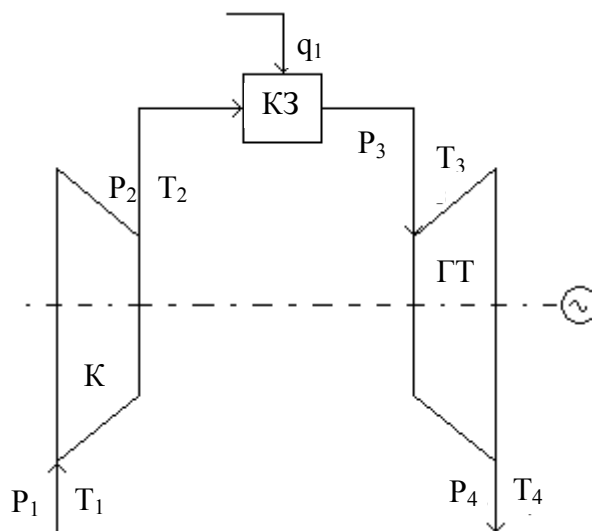


Рисунок 2.2 – Схема ГТУ відкритого типу

Показник степеня

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

де  $k$  – показник адіабати; 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  $C_{рп} = 1,05 \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$ .

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

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

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

Потужність газової турбіни

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

Теплота, підведена в камеру згорання,

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

Коефіцієнт використання потужності

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

**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  $\lambda_{\kappa} = 6,8$ . Теплоємність повітря  $C_{pp} = 1,05 \text{ кДж/(кг К)}$ , теплоємність газів:  $C_{p\Gamma} = 1,17 \text{ кДж/(кг К)}$ . 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**.

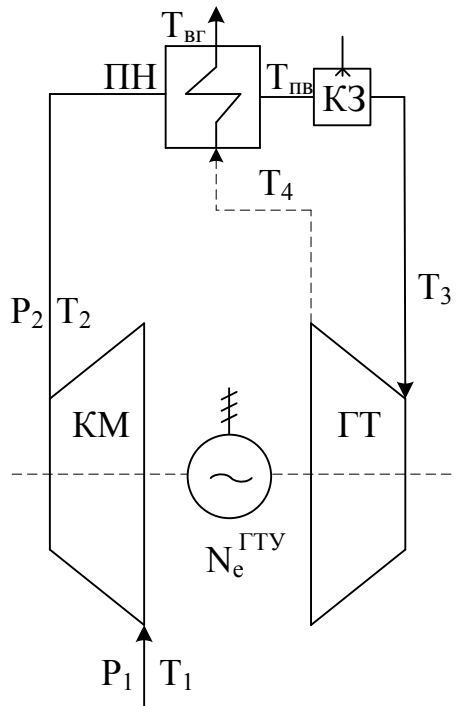


Рисунок 2.3 – Схема газотурбінної установки з регенерацією:

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

$$T_2 = T_1 \cdot \lambda_k^m = 293 \cdot 6,8^{0,286} = 511 \text{ K}.$$

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:  $P_0 = 9 \text{ МПа}$ ,  $t_0 = 540 \text{ }^\circ\text{C}$ . 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  $P_0$ . 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  $P_0$ ,  $t_0$ ,  $h_0$ . 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

поверхні 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 парою, яка вже частково відпрацювала в турбіні.

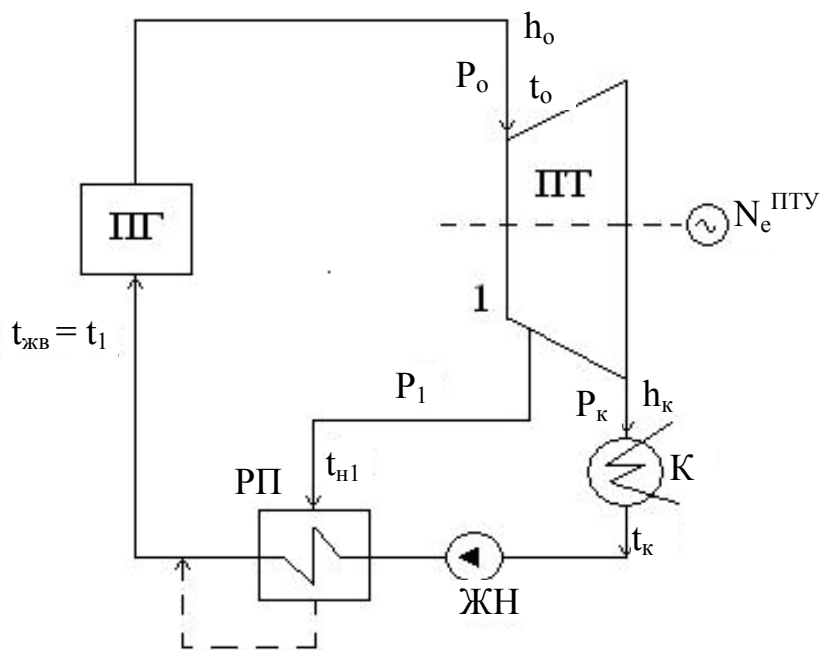


Рисунок 2.4 – Схема ПТУ з одним регенеративним відбором пари

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.

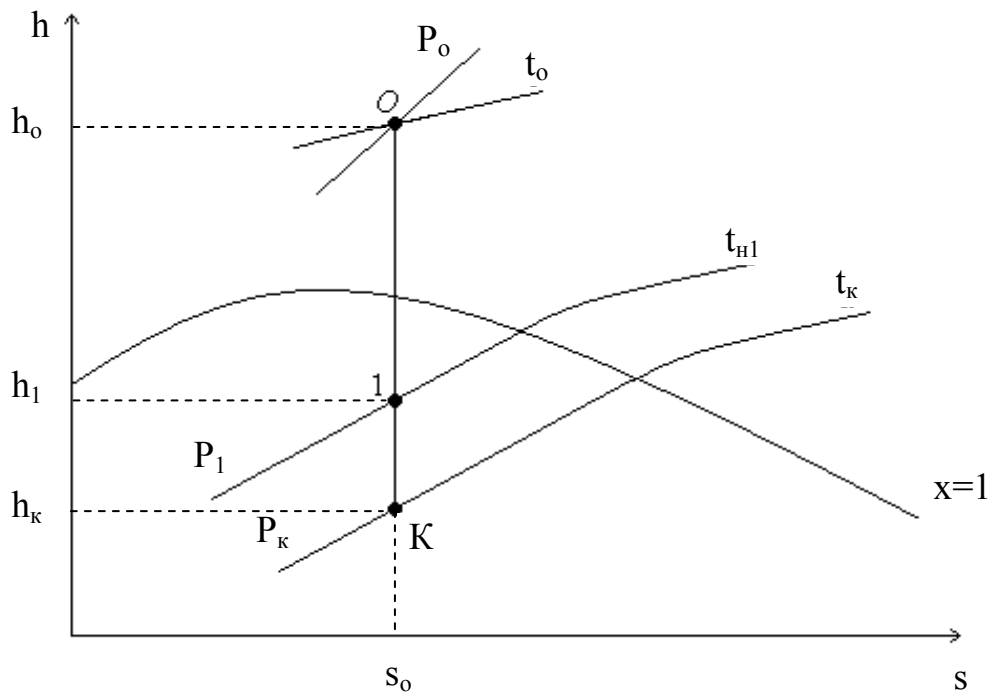


Рисунок 2.5 – Зображення циклу ПТУ з одним регенеративним відбором пари на h-s діаграмі

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

Параметри точки О: 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 К: 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  $t_{H1} = 115 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 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,

$$q_{B1} = C'_p \cdot (t_{жв} - t_K) = 4,19(75 - 27) = 201,12 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Питома теплота, яку віддає пара в РП,

$$q_{п1} = h_1 - C'_p \cdot t_{н1} = 2550 - 4,19 \cdot 115 = 2068,15 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

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

$$D_o = \frac{N_{\epsilon}^{\text{ПТУ}}}{l_{\text{ТО}}^p} = \frac{0,281 \cdot 25}{3,6} = 1,951 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

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

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

## 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  $R = 0,27 \text{ кДж/(кг·К)}$  складають:  $P_1 = 0,1 \text{ МПа}$ ;  $t_1 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ ; діаметр і хід поршня 94,5 і 80 мм, відповідно; кількість циліндрів  $z = 4$ ; кутова швидкість обертання колінчастого вала  $\omega = 377 \text{ рад/с}$ ; механічний ККД – 0,8; витрата палива – 5,4 кг/год; допустима температура займання паливної суміші –  $340 \text{ }^\circ\text{C}$ ; тиск відпрацьованих газів – 0,2 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

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

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

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

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

Термічний ККД циклу

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

Температура газів в кінці робочого ходу

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

Температура газів після згорання робочої суміші

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

Ізохорна теплоємність робочого тіла

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

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.

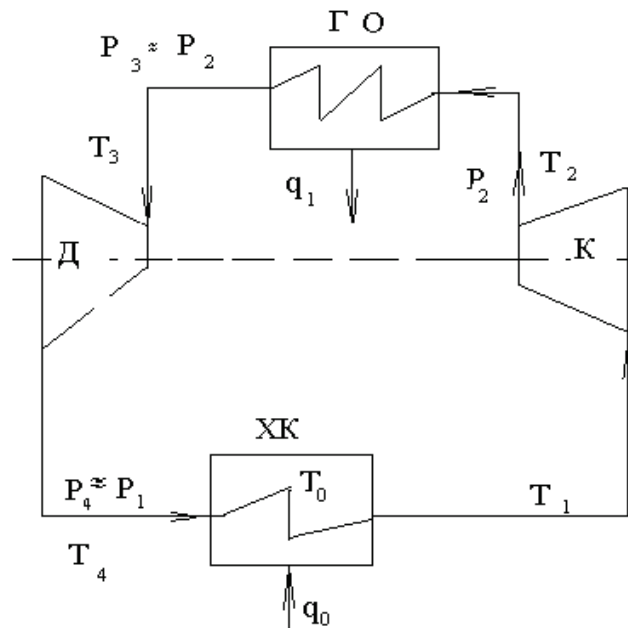


Рисунок 2.6 – Схема повітряної холодильної машини:  
ХК – холодильна камера; К – компресор; ГО – газоохолодник;  
Д – детандер

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

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

$$T_1 = T_o - \theta = 258 - 6 = 252 \text{ K.}$$

Температура повітря на виході з детандера

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

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

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

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

Питома теплота, яка відведена в газоохолоднику

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

Питома ексергія підведеної теплоти

$$e_{xqo} = q_o (T_{\text{нс}} / T_o - 1) = 41 (285 / 258 - 1) = 4,29 \text{ кДж/кг.}$$

Ексергетичний ККД холодильної машини

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

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

електромеханічний 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 парокомпресійної ТНУ показана на рис. 2.7.

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

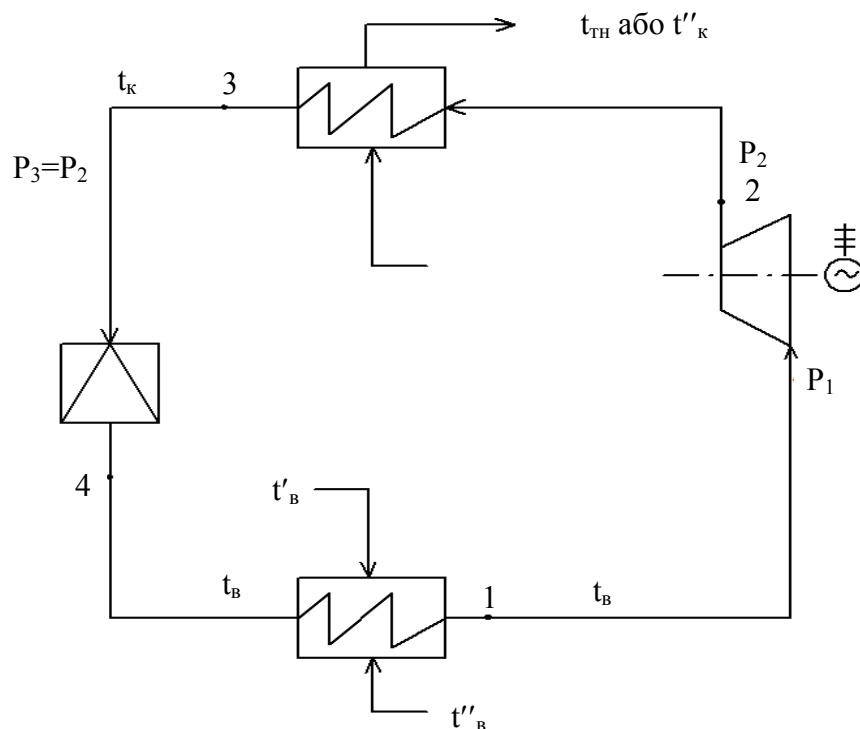


Рисунок 2.7 – Принципова схема парокомпресійної ТНУ

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

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

Визначаємо температуру води на виході з конденсатора теплового насоса

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

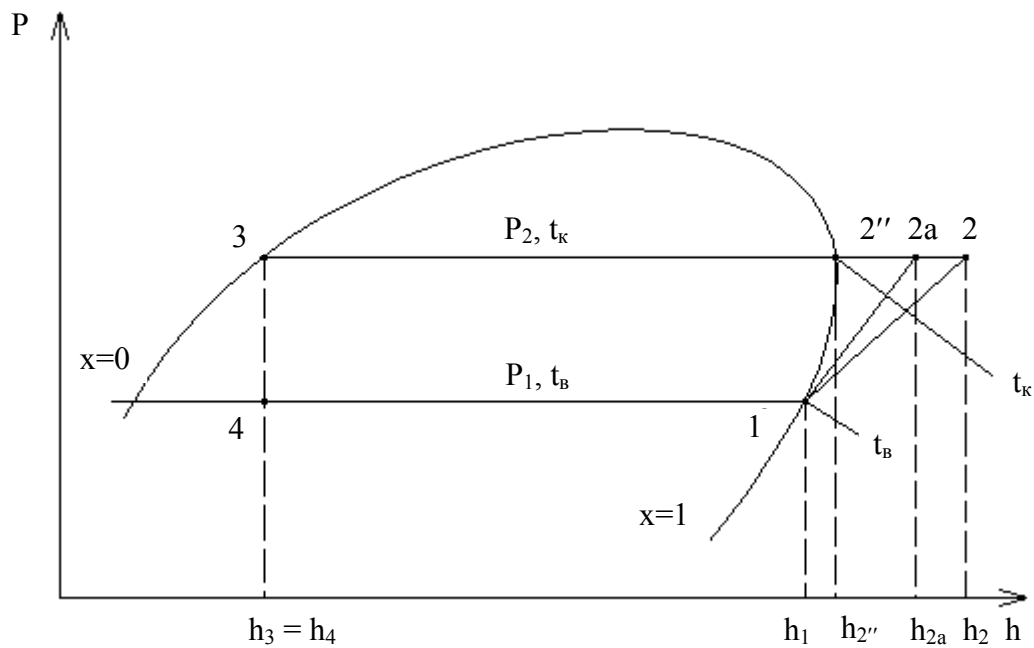


Рисунок 2.8 – Цикл парокompресійні ТНУ на lg P-h діаграмі

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 парокомпресійних холодильних машинах?
35. Чи можна в циклі газової холодильної машини замінити детандер дроселем?
36. Чи можна в циклі парокомпресійної 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                                    |
| 1                   | 440        | 8                                         | 20              | 1                        | 12          | 38                                    |
| 2                   | 430        | 12                                        | 25              | 2                        | 15          | 54                                    |
| 3                   | 445        | 11                                        | 22              | 3                        | 17          | 70                                    |
| 4                   | 455        | 9                                         | 24              | 4                        | 20          | 72                                    |
| 5                   | 435        | 12                                        | 17              | 5                        | 11          | 37                                    |
| 6                   | 410        | 11                                        | 16              | 6                        | 14          | 54                                    |
| 7                   | 420        | 10                                        | 18              | 7                        | 13          | 43                                    |
| 8                   | 415        | 8                                         | 23              | 8                        | 16          | 55                                    |
| 9                   | 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<br>цифра<br>шифру | $t_k$ ,<br>°C | $q_k$ ,<br>кВт год | $N_e$ ,<br>МВт | Передостання<br>цифра шифру | $b_y$ ,<br>кг<br>кВт·год | $\Delta t$ ,<br>°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<br>цифра<br>шифру | $\omega$ ,<br>$\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ | $D$ ,<br>мм | $n$  | Передостання<br>цифра шифру | $P_1$ ,<br>мм рт. ст. | $t_1$ ,<br>°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<br>цифра<br>шифру | газ             | $v_1$ ,<br>$\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ | $t_1$ ,<br>$^{\circ}\text{C}$ | Передостання<br>цифра шифру | $m$ | $S$ ,<br>мм | $\omega$ ,<br>$\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ |
|---------------------------|-----------------|-------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----|-------------|---------------------------------------------|
| 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  $Q_p$ , 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<br>цифра<br>шифру | $Q_n^p$ ,<br>МДж<br>кг | $V$ ,<br>$\frac{м^3}{с}$ | $t_3$ ,<br>°C | Передостання<br>цифра шифру | $P_1$ ,<br>бар | $T_1$ ,<br>К | $v_2$ ,<br>$\frac{м^3}{кг}$ | $\sigma$ |
|---------------------------|------------------------|--------------------------|---------------|-----------------------------|----------------|--------------|-----------------------------|----------|
| 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;  $v_2$ ,  $\frac{м^3}{кг}$ ; 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<br>цифра<br>шифру | $Q_n^p$ ,<br>МДж/кг | $G$ ,<br>кг/с | $\sigma$ | Перед-<br>остання<br>цифра<br>шифру | $P_1$ ,<br>бар | $T_1$ ,<br>К | $v_2$ ,<br>$\frac{м^3}{кг}$ | $\Delta T$ ,<br>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  $Q_v$  температура випаровування холодоагенту становить  $t_v$ . 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  $\eta_{to} = 0,98$ .

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 | $t_v$ , °С | $t_k$ , °С | Передостання цифра шифру | $Q_v$ , 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, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ | Температура кипіння при 760 мм рт. ст. | Теплота пароутворення при 760 мм рт. ст., $\text{г} \cdot 10^{-3}, \text{Дж/кг}$ | Критичні точки  |                      | Теплоємність при 20 °С і p = 1 бар, $\text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ |
|-----------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------|
|                 |                                |                                   |                  |                                                            |                                        |                                                                                  | Температура, °С | Абсолютний тиск, бар |                                                                      |
| Азот            | N <sub>2</sub>                 | 1,25                              | 28               | 297                                                        | -195,8                                 | 199,4                                                                            | -147,1          | 33,49                | 1,05                                                                 |
| Аміак           | NH <sub>3</sub>                | 0,77                              | 17               | 488                                                        | 33,4                                   | 1374                                                                             | +132,4          | 111,5                | 2,22                                                                 |
| Ацетилен        | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>  | 1,171                             | 26,0             | 320                                                        | -83,7(в)                               | 830                                                                              | +35,7           | 61,6                 | 1,68                                                                 |
| Бензол          | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>  | -                                 | 78,1             | 106                                                        | +80,2                                  | 394                                                                              | +288,5          | 47,7                 | 1,25                                                                 |
| Бутан           | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 2,673                             | 58,1             | 143                                                        | -0,5                                   | 387                                                                              | +152            | 37,5                 | 1,92                                                                 |
| Повітря         | -                              | 1,293                             | (29,0)           | 287                                                        | -195                                   | 197                                                                              | -140,7          | 37,2                 | 1,01                                                                 |
| Водень          | H <sub>2</sub>                 | 0,0899                            | 2,02             | 2140                                                       | -252,8                                 | 450,5                                                                            | -239,9          | 12,80                | 14,3                                                                 |
| Гелій           | He                             | 0,179                             | 4,0              | 2080                                                       | -268,9                                 | 19,5                                                                             | -268,0          | 2,26                 | 5,28                                                                 |
| Двоокис азоту   | N <sub>2</sub> O               | -                                 | 46,0             | 181                                                        | +21,2                                  | 712                                                                              | +158,2          | 100,00               | 0,804                                                                |
| Двоокис сірки   | SO <sub>2</sub>                | 2,93                              | 64,1             | 130                                                        | -10,8                                  | 394                                                                              | +157,5          | 77,78                | 0,633                                                                |
| Двоокис вуглецю | CO <sub>2</sub>                | 1,90                              | 44,0             | 189                                                        | 78,2(сп)                               | 574,0                                                                            | +31,1           | 72,9                 | 0,838                                                                |
| Кисень          | O <sub>2</sub>                 | 1,429                             | 32               | 260                                                        | -83,0                                  | 213                                                                              | -118,8          | 49,71                | 0,913                                                                |
| Метан           | CH <sub>4</sub>                | 0,72                              | 16,0             | 519                                                        | -161,6                                 | 511                                                                              | -82,15          | 45,6                 | 2,23                                                                 |
| Оксид вуглецю   | CO                             | 1,25                              | 28,0             | 297                                                        | -191,5                                 | 212                                                                              | -140,2          | 34,53                | 1,05                                                                 |
| Пропан          | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 2,02                              | 44,1             | 189                                                        | -42,1                                  | 427                                                                              | +95,6           | 43                   | 1,87                                                                 |
| Сірководень     | H <sub>2</sub> S               | 1,54                              | 34,1             | 244                                                        | -60,2                                  | 549                                                                              | +100,4          | 188,9                | 1,060                                                                |
| 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

| p,<br>бар | t, °C  | v',<br>м³/кг | v'',<br>м³/кг | ρ'',<br>кг/м³ | h',<br>кДж/кг | h'',<br>кДж/кг | г,<br>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

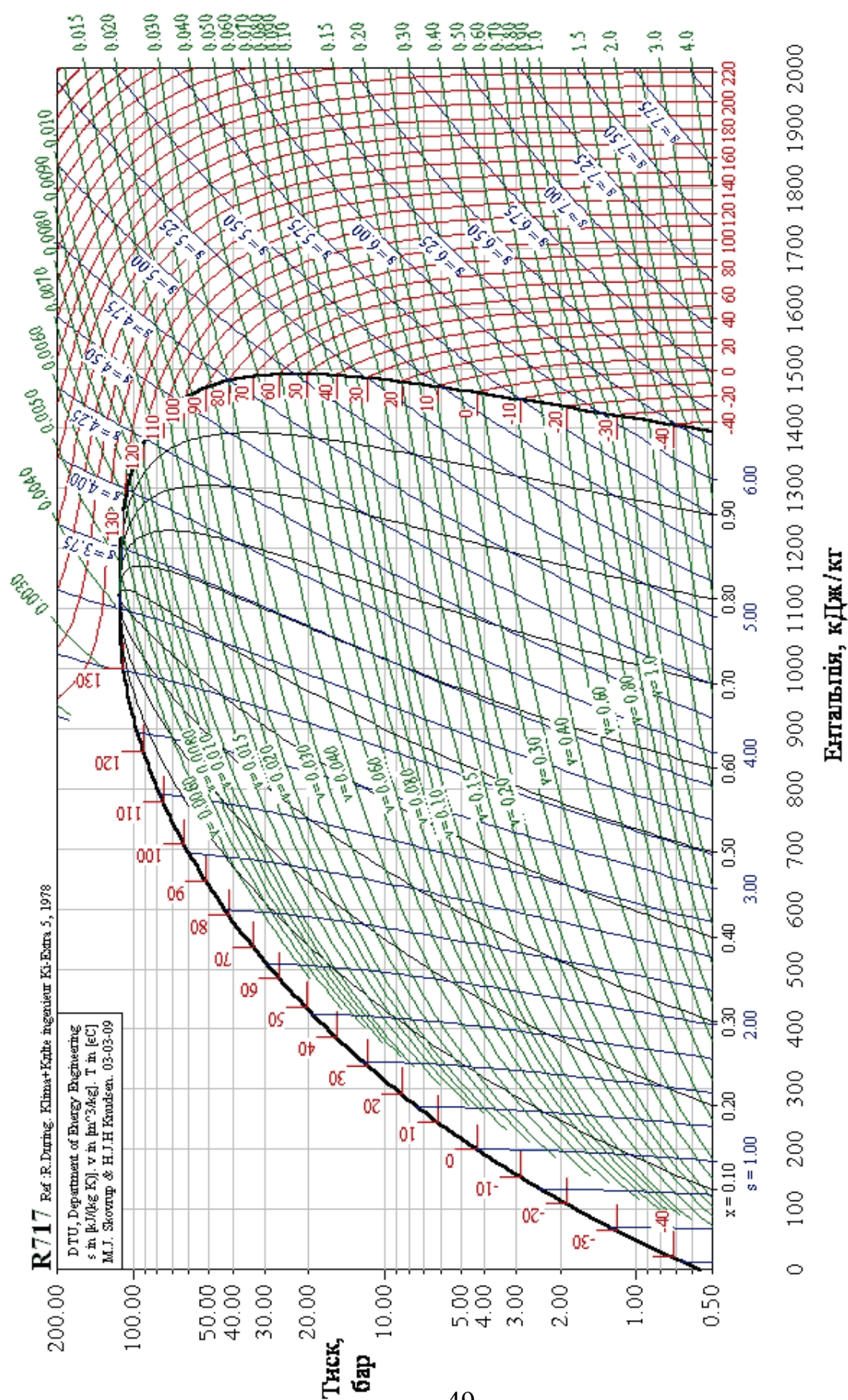
| 1   | 2      | 3        | 4        | 5     | 6    | 7    | 8     |
|-----|--------|----------|----------|-------|------|------|-------|
| 176 | 355,11 | 0,001808 | 0,007848 | 127,4 | 1715 | 2526 | 811,4 |
| 178 | 356,04 | 0,001822 | 0,007674 | 130,3 | 1723 | 2518 | 795   |
| 180 | 356,96 | 0,001837 | 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 | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $C_p$ ,<br>кДж/(кг·°C) | $\lambda \cdot 10^2$ ,<br>Вт/(м·°C) | $a \cdot 10^6$ ,<br>м <sup>2</sup> /с | $\mu \cdot 10^6$ ,<br>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 18.05.2017 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний. Гарнітура  
Times New Roman. Ум. друк. арк. 6.  
Наклад 40 (1-й запуск 1-21) пр. Зам. № 2017-143.

Видавець та виготовлювач  
Вінницький національний технічний університет,  
інформаційний редакційно-видавничий центр.

ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Хмельницьке шосе, 95,  
м. Вінниця, 21021.  
Тел. (0432) 59-85-32, 59-81-59,  
**press.vntu.edu.ua**,  
*E-mail: kivc.vntu@gmail.com.*

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.