



**УКРАЇНЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра «Теплотехніка та теплові двигуни»**

**ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА**

**Робоча програма, методичні вказівки і завдання  
до виконання контрольних робіт**

**Харків – 2012**

Робочу програму розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри “Теплотехніка і теплові двигуни” 6 квітня 2010 року, протокол № 5.

Подано програму курсу “Технічна термодинаміка” для студентів спеціальності “Теплоенергетика” денної і заочної форм навчання, сформульовані контрольні питання і розрахунково-графічні завдання з основних розділів курсу, рекомендована методика виконання завдань, а також наведений необхідний довідковий матеріал.

Укладачі:

доц. Т.І. Ярошенко,  
асист. О.В. Гришина

Рецензент

доц. С.В. Угольніков

## ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА

Робоча програма, методичні вказівки і завдання  
до виконання контрольних робіт

Відповідальний за випуск Ярошенко Т.І.

Редактор Еткало О.О.

---

Підписано до друку 22.04.10 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,25. Тираж 100. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

**УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

Кафедра “Теплотехніка та теплові двигуни”

**ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА**

Робоча програма, методичні вказівки і завдання  
до виконання контрольних робіт

Харків 2012

Робоча програма розглянута і рекомендована до друку на засіданні кафедри “Теплотехніка і теплові двигуни” 6 квітня 2010 року, протокол № 5.

Подано програму курсу “Технічна термодинаміка” для студентів спеціальності “Теплоенергетика” денної і заочної форм навчання, сформульовані контрольні питання і розрахунково-графічні завдання з основних розділів курсу, рекомендована методика виконання завдань, а також наведений необхідний довідковий матеріал.

Укладачі:

доц. Т. І. Ярошенко,  
асист. О. В. Гришина

Рецензент

доц. С. В. Угольніков

## ЗМІСТ

Загальні методичні вказівки.....	4
Робоча програма курсу.....	5
Змістовий модуль 1.....	5
Змістовий модуль 2.....	8
Контрольна робота 1.....	10
Контрольна робота 2.....	27
Контрольна робота 3.....	38
Список літератури.....	54
Додатки.....	55

## ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

Відповідно до діючого навчального плану студенти спеціальності “Теплоенергетика” як денної, так і заочної форм навчання вивчають курс “Технічна термодинаміка” у двох семестрах і при цьому студенти виконують три контрольні роботи. Номер варіанта контрольних робіт відповідає номеру прізвища студента за списком у журналі групи.

Для виконання контрольних робіт студентів заочної форми навчання необхідно вивчити теоретичний матеріал, відповісти письмово на контрольні питання і вирішити відповідні розрахунково-графічні завдання. При цьому слід дотримуватися таких правил:

- а) вписувати умови завдань цілком;
- б) обчислення супроводжувати найменуванням величин, що обчислюються (наприклад, “визначається питома ентальпія робочого тіла  $h$ ”);
- в) записувати розмірність величин у системі одиниць СІ;
- г) зображувати робочі процеси в термодинамічних діаграмах і наводити схеми установок.

Роботи, виконані не за своїм варіантом, не приймаються до розгляду.

Дисципліна “Технічна термодинаміка” вимагає систематичного і послідовного вивчення, тобто за визначеними темами і розділами, викладеними у робочій програмі.

Курс “Технічна термодинаміка” вивчається студентами-заочниками шляхом самостійної роботи над підручниками і навчальними посібниками, список яких наведений наприкінці даних методичних вказівок. Оглядові лекції, що читаються студентам-заочникам з основних розділів курсу, носять допоміжний характер і не замінюють самостійної роботи над навчальною літературою. Пророблений технічний матеріал рекомендується законспектувати для закріплення отриманих знань. Це дозволить студентів успішно справитися з контрольними роботами та іспитами наприкінці кожного семестру.

Відповіді на питання повинні бути короткими, але вичерпними, з графіками, схемами і рисунками, якщо це необхідно.

Пояснювальна записка повинна бути оформлена чітко й акуратно, розбірливим почерком, мати поля для зауважень і чисту сторінку для рецензії викладача наприкінці роботи.

Виправлення по зауваженню рецензента повинні бути записані окремо на чистих аркушах у тому ж зошиті після заголовка “Виправлення по зауваженнях”.

*Робота, у якій перераховані вище вимоги не виконуються, не перевіряється.*

## **РОБОЧА ПРОГРАМА КУРСУ**

### **ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1**

#### **1 Вступ. Основні поняття термодинаміки**

Предмет і метод термодинаміки. Історія розвитку. Основні визначення: теплота, робота, термодинамічна система, робочі тіла, параметри стану. Ідеальний газ. Поняття про термодинамічний процес.

#### **2 Перший закон термодинаміки**

Еквівалентність теплоти і роботи. Аналітичні вираження першого закону термодинаміки. Внутрішня енергія, ентальпія. Робота розширення і технічна робота.

#### **3 Теплоємність газів. Ентропія**

Поняття середньої, істинної, питомої теплоємностей; залежність від температури, виду процесу, атомності газів. Рівняння Майера, показник адіабати. Поняття ентропії як функції стану, зміна ентропії в термодинамічному процесі. Графічне зображення теплоти процесу.

## **4 Термодинамічні процеси ідеальних газів**

Ізохорний, ізобарний, ізотермічний і адіабатний процеси. Політропні процеси. Основні закономірності і графічне зображення в термодинамічних діаграмах. Залежність теплоємності політропного процесу від показника політропи.

## **5 Газові суміші**

Закон Дальтона. Закон Амага. Способи задавання складу газових сумішей. Газова постійна й уявна молекулярна маса газових сумішей. Теплоємність газових сумішей.

## **6 Другий закон термодинаміки**

Формулювання другого закону. Поняття термодинамічного циклу. Термодинамічний ККД прямого циклу. Зворотні цикли, холодильний коефіцієнт. Цикли Карно: прямий, еквівалентний, узагальнений (регенеративний) і зворотний. Термодинамічна шкала температур.

Інтеграл Клаузіуса для оборотних і необоротних циклів, принцип зростання ентропії. Статистичне тлумачення сутності ентропії і другого закону термодинаміки. Рівняння Больцмана.

Об'єднане рівняння першого і другого законів термодинаміки.

Ексергія, рівняння Гюї-Стодоли.

## **7 Характеристичні функції і диференційні співвідношення термодинаміки**

Поняття і властивості характеристичних функцій. Основні диференціальні рівняння термодинаміки. Теорія термодинамічної рівноваги.

Диференціальне рівняння стану, термічні коефіцієнти робочого тіла.



## **8 Реальні гази і пари. Термодинамічні процеси водяної пари**

Термодинамічні властивості реальних робочих тіл. Рівняння стану реальних газів: Ван-дер-Ваальса, Боголюбова-Майєра, Вукаловича-Новикова.

Метод термодинамічної подібності, приведені рівняння стану.

Фазові переходи. Хімічний потенціал. Правило фаз Гіббса, рівняння Клапейрона-Клаузіуса.

Процес одержання водяної пари. Аналітичні методи розрахунку. Діаграма Мольє. Термодинамічні процеси водяної пари. Графічний метод розрахунку характеристик термодинамічних процесів з водяною парою.

## **9 Термодинаміка потоку**

Поняття відкритої термодинамічної системи. Рівняння нерозривності. Рівняння першого закону термодинаміки для потоку.

Адіабатний (ізоентропний) плин. Рівняння Бернуллі. Швидкість витікання і секундна витрата газу в каналі, що звужується. Критичні параметри витікання. Комбіноване сопло Лавалля. Витікання водяної пари, плин з урахуванням тертя.

Закон обертання впливів, поняття геометричного, теплового, механічного і видаткового сопла. Криза плину. Параметри гальмування.

Дроселювання газів і парів. Рівняння процесу, графічне зображення. Зміна параметрів потоку при дроселюванні. Дроселювання водяної пари. Диференціальний та інтегральний дросель-ефект, крива інверсії. Використання процесу дроселювання в техніці.

Охолодження газу при оборотному адіабатному розширенні з віддачею корисної роботи.

Змішування газів при постійному об'ємі і при наповненні резервуара, змішування газових потоків. Зміна ентропії при змішуванні.

## 10 Вологе повітря

Параметри вологого повітря. Абсолютна і відносна вологість, вологовміст.  $h-d$ -діаграма вологого повітря. Основні процеси вологого повітря. Способи експериментального визначення вологості повітря.

## 11 Компресія газів

Компресори. Їхнє призначення і класифікація.

Одноступеневий поршневий компресор, теоретична і дійсна індикаторні діаграми, робота на привод компресора при ізотермічному, адіабатному і політропному процесі підвищення тиску. Багатоступеневий компресор, розподіл тисків по ступінях.

Принцип дії ротаційного, відцентрового й осьового компресорів. Ежектор (струминний компресор).

Термодинамічний аналіз процесу розширення газу в детандерах.

## ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2

### 1 Теплові двигуни. Цикли двигунів внутрішнього згоряння

Призначення, загальні характерні риси і класифікація теплових двигунів. Цикли двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Схема, індикаторна діаграма й ідеальний цикл двигуна з підведенням теплоти при  $v=const$ ,  $p=const$  і при змішаному підведенні теплоти. Порівняльна характеристика трьох циклів ДВЗ.

### 2 Цикли газотурбінних установок

Порівняння газотурбінних установок (ГТУ) з ДВЗ. Принципові схеми і цикли ГТУ з підведенням теплоти в ізобарному й ізохорному процесах. Регенеративні цикли ГТУ.

Порівняння циклів з ізотермічним і адіабатним стиском у компресорі.

Цикл ГТУ при наявності витрат на необоротність процесів в окремих вузлах ГТУ. Багатоступеневе стиснення з проміжним охолодженням і східчасте підведення тепла в циклах ГТУ.

### **3 Цикли реактивних двигунів**

Реактивна тяга. Принцип дії реактивного двигуна. Класифікація реактивних двигунів.

Компресорний повітряно-реактивний двигун, схема і цикл в  $p-v$  координатах. Прямотечійний і пульсуючий повітряно-реактивні двигуни. Порівняльна характеристика. Ракетні двигуни, їх різновиди. Принцип роботи, переваги і недоліки.

### **4 Цикли паросилових установок**

Паровий цикл Карно, принципова схема установки, теоретичне значення і нераціональність практичного застосування.

Цикл Ренкіна в  $p-v$ ,  $T-s$  і  $h-s$  координатах, його термічний ККД. Вплив основних параметрів на величину ККД паротурбінної установки. Дійсний цикл з урахуванням необоротних втрат при розширенні пари в турбіні.

Цикл з проміжним (вторинним) перегрівом пари, регенеративний цикл паротурбінної установки. Вплив числа відборів на ККД паросилової установки (ПСУ).

Термодинамічні основи теплофікації, коефіцієнт використання теплоти палива на ТЕЦ.

Бінарні цикли: ртутно-парова і парогазова енергетичні установки.

Особливості термодинамічних циклів атомних електростанцій. Одно-, дво- і триконтурні установки.

### **5 Цикли холодильних машин**

Призначення і різновиди холодильних машин, властивості холодоагентів.

Схема і цикл повітряної холодильної машини, оцінка ефективності роботи і недоліки.

Схема й ідеальний цикл парокомпресорної холодильної установки,  $\lg p-h$ -діаграма, енергетичний баланс установки з пароперегрівником і переохолоджувачем. Реальна парокомпресійна установка (ПКХУ). Ідеальний цикл глибокого охолодження (багатоступеневі і каскадні ПКХУ).

Схема і принцип роботи абсорбційної і пароежекторної холодильних установок.

Цикл теплового насоса, опалювальний коефіцієнт.

Комбінований термодинамічний цикл для спільного одержання теплоти і холоду.

## **6 Методи аналізу ефективності циклів теплосилових установок**

Метод порівняння термічних ККД оборотних та необоротних циклів. Ентропійний метод розрахунку втрат працездатності у необоротних циклах. Ексергетичний метод розрахунку втрат працездатності.

## **7 Безмашинне перетворення енергії**

Методи прямого перетворення теплоти в електроенергію. Термоелектрична установка, термоелектронний перетворювач, цикл МГД-генератора, паливні елементи.

Безмашинні засоби охолодження.

## **КОНТРОЛЬНА РОБОТА 1**

Перша контрольна робота включає завдання 1–4 для студентів денної та заочної форм навчання і завдання 5 для студентів денної форми навчання. Студенти заочної форми навчання повинні також відповісти на 2 теоретичні питання. Варіанти контрольної роботи наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Варіанти до контрольної роботи 1

Варіант	Питання	Варіант	Питання	Варіант	Питання
1	1, 18	11	11, 28	21	4, 25
2	2, 19	12	12, 29	22	5, 26
3	3, 20	13	13, 30	23	6, 27
4	4, 21	14	14, 18	24	7, 28
5	5, 22	15	15, 19	25	8, 29
6	6, 23	16	16, 20	26	9, 30
7	7, 24	17	17, 21	27	10, 18
8	8, 25	18	1, 22	28	11, 19
9	9, 26	19	2, 23	29	12, 20
10	10, 27	20	3, 24	30	13, 21

### Питання до контрольної роботи 1

1 Розкрийте поняття термодинамічної системи, робочого тіла, теплоти і роботи.

2 Які величини називаються термодинамічними параметрами? У яких одиницях вони вимірюються?

3 Напишіть рівняння стану ідеального газу. Як можна дати його графічне зображення?

4 Що таке термодинамічний процес? Наведіть основні різновиди термодинамічних процесів.

5 Сформулюйте сутність першого закону термодинаміки, напишіть математичні вирази першого закону в диференціальній формі й у вигляді скінчених різниць.

6 Що розуміється під внутрішньою енергією? Від чого залежить зміна внутрішньої енергії ідеального і реального газів?

7 Наведіть другу форму запису першого закону термодинаміки (через ентальпію). Від чого залежить зміна ентальпії в термодинамічному процесі?

8 Що таке технічна робота і робота розширення? Запишіть аналітичні вирази і графічне зображення в  $P$ - $V$  координатах.

9 Перерахуйте види теплоємностей. Запишіть рівняння Майєра. Що таке показник адиабати?

10 Дайте поняття ентропії як функції стану. Чому дорівнює зміна ентропії в будь-якому термодинамічному процесі?

11 Як графічно зображується робота і теплота процесу?

12 Розгляньте основні закономірності ізохорного, ізобарного, ізотермічного й адіабатного процесів. Наведіть графічне зображення процесів у  $P-v$  і  $T-s$  координатах.

13 Проведіть аналіз політропних процесів. Як графічно зображується залежність теплоємності політропного процесу від показника політропи?

14 Яким чином можна задати склад газової суміші? Чому дорівнює газова постійна й уявна молекулярна маса газової суміші? Як обчислюється теплоємність газових сумішей?

15 Наведіть основні формулювання другого закону термодинаміки. Що таке круговий процес або цикл? Чому дорівнює термічний ККД прямого циклу?

16 Які машини працюють по зворотних циклах? Як оцінюється ефективність їхньої роботи?

17 Укажіть, з яких процесів складається цикл Карно. Зобразіть його в  $P-v$  і  $T-s$  координатах. Поясніть, у чому перевага циклу Карно в порівнянні з іншими циклами.

18 Що таке ексергія маси або фізична ексергія? Напишіть рівняння Гюї-Стодоли. Як обчислюється ексергія теплоти?

19 Укажіть, чим відрізняються реальні тіла від ідеального газу. Запишіть рівняння Ван-дер-Ваальса.

20 Що таке випарювання, кипіння, плавлення, сублімація і конденсація? Чим відрізняється суха насичена пара від вологої насиченої і перегрітої? Як визначається ступінь сухості пари?

21 Зобразіть ізобарний процес одержання перегрітої водяної пари на  $P-v$ ,  $T-s$  і  $h-s$ -діаграмах. Дайте необхідні пояснення.

22 Розгляньте основні закономірності процесу витікання ідеального робочого тіла із сопла, що звужується. Що таке критичне відношення тисків?

23 Для чого застосовується сопло Лавалю? Наведіть розрахункові формули для визначення швидкості витікання і перерізів сопла (мінімального і максимального).

24 У чому полягає особливість витікання водяної пари? Як можна визначити швидкість і витрату водяної пари?

25 У чому полягає процес дроселювання? Як змінюються параметри газового потоку при дроселюванні (тиск, швидкість, ентальпія і температура)?

26 Дослідіть процес дроселювання водяної пари за  $h-s$ -діаграмою. Як змінюється працездатність водяної пари при дроселюванні?

27 Що називають вологим повітрям? Перерахуйте основні параметри вологого повітря, напишіть формули для їхнього визначення.

28 Зобразіть  $h-d$ -діаграму вологого повітря. Що таке температура точки роси і температура мокрого термометра?

29 Як зображуються на  $h-d$ -діаграмі основні процеси вологого повітря?

30 Які є способи визначення вологості повітря. Поясніть принцип роботи гігрометра і психрометра.

## **Розрахунково-графічні завдання до контрольної роботи 1**

### **Завдання 1. Розрахунок газової суміші**

Аналіз продуктів згоряння палива показав такий об'ємний склад:  $r_{CO_2}$ ,  $r_{H_2O}$ ,  $r_{O_2}$ ,  $r_{N_2}$ , %. Визначити масовий склад вхідних у суміш газів  $-g_{CO_2}$ ,  $g_{H_2O}$ ,  $g_{O_2}$ ,  $g_{N_2}$ ; молекулярну масу суміші, газову постійну суміші й окремих компонентів; щільність суміші й окремих компонентів; парціальні тиски газів; кількості тепла, що віддаються 1кг і 1м<sup>3</sup> газової суміші в процесах з постійним тиском і з постійним об'ємом і при нормальних умовах. Вихідні дані до завдання наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Вихідні дані до завдання 1

Варіант	$r_{CO_2},\%$	$r_{H_2O},\%$	$r_{O_2},\%$	$r_{N_2},\%$	$t_1,^{\circ}C$	$t_2,^{\circ}C$
1	12	7	3	78	1000	320
2	11	6	3	80	1400	350
3	12	7	5	76	1250	250
4	10	5	4	81	1320	330
5	13	5	5	77	1200	340
6	15	7	1	77	1320	320
7	10	6,5	6,5	77	1100	330
8	13	5	4	78	1300	350
9	12	5	9	74	1260	200
10	14	3	6	77	900	200
11	17	5	4	74	1500	300
12	10	4	10	76	1300	330
13	13	8	4	75	1400	330
14	14	3	5	78	1300	320
15	14	3	7	76	1400	300
16	10	5	6	79	1500	340
17	11	4	4	81	1250	250
18	12	5	7	76	1400	310
19	13	6	3	78	1000	330
20	14	6	4	76	1200	340
21	15	5	5	75	1500	200
22	15	4	5	76	1200	400
23	14	5	4	77	900	320
24	13	6	6	75	1400	330
25	12	5	3	80	1250	350
26	16	2	6	76	1150	400
27	15	3	6	76	1200	250
28	16	4	4	76	1100	300
29	14	2	7	77	1250	380
30	14	4	3	79	1000	350



## Завдання № 2. Розрахунок термодинамічного циклу ідеального газу

Для процесів з повітрям- ізоермічного, ізохорного, адіабатного та ізобарного, які утворюють замкнутий цикл із заданими деякими параметрами, визначити:

- 1) параметри  $P$ ,  $v$ ,  $T$  і  $s$  у перехідних точках циклу;
- 2) роботу 1кг повітря за цикл, як алгебраїчну суму робіт в окремих процесах циклу;
- 3) те ж, як еквівалент алгебраїчної суми підведеного і відведеного тепла;
- 4) термічний ККД циклу.

Зобразити даний цикл у  $P-v$  та  $T-s$ -діаграмах у масштабі. Вихідні дані до завдання 2 наведені у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Вихідні дані до завдання 2

Варіант	Початкові параметри	Параметри перехідних точок
1	2	3
1	$P_1=1$ $t_1=27$	$P_2=4$ $P_3=12$
2	$P_1=1$ $v_1=0,9$	$P_2=6$ $P_3=14$
3	$P_1=1,2$ $t_1=77$	$v_2=0,4$ $P_3=12$
4	$P_1=6$ $t_1=27$	$P_2=24$ $P_3=50$
5	$P_1=4$ $t_1=27$	$P_2=12$ $t_3=600$
6	$P_1=1,4$ $t_1=47$	$P_2=7$ $t_3=1280$
7	$P_1=3$ $t_1=67$	$v_2=0,16$ $P_3=30$
8	$P_1=1,1$ $t_1=30$	$P_2=5$ $t_3=700$
9	$P_1=1,3$ $v_1=1,5$	$v_2=0,4$ $P_3=14$
10	$P_1=1,5$ $v_1=1,5$	$v_2=0,66$ $P_3=15$
11	$P_1=1,5$ $v_1=1,6$	$v_2=0,64$ $t_3=2800$
12	$v_1=0,6$ $t_1=20$	$P_2=8$ $P_3=35$
13	$v_1=0,5$ $t_1=30$	$P_2=7$ $P_3=14$
14	$v_1=0,9$ $t_1=40$	$P_2=6$ $P_3=18$
15	$P_1=1$ $t_1=50$	$P_2=3$ $P_3=9$
16	$P_1=1,2$ $t_1=60$	$v_2=0,5$ $t_3=1600$
17	$P_1=1,4$ $t_1=70$	$v_2=0,6$ $t_3=1550$

Продовження таблиці 1.3

1	2	3
18	$P_1=1,6$ $t_1=80$	$v_2=0,4$ $t_3=1620$
19	$P_1=4$ $t_1=40$	$P_2=8$ $P_3=25$
20	$P_1=5$ $t_1=20$	$P_2=12$ $P_3=30$
21	$P_1=6$ $t_1=30$	$P_2=18$ $P_3=48$
22	$P_1=3$ $t_1=50$	$P_2=16$ $P_3=60$
23	$P_1=1,1$ $t_1=80$	$P_2=2,2$ $t_4=600$
24	$P_1=1,3$ $t_1=70$	$P_2=3$ $t_4=640$
25	$P_1=1,3$ $t_1=60$	$P_2=3,2$ $t_4=460$
26	$P_1=1,7$ $t_1=50$	$P_2=4$ $t_4=680$
27	$P_1=1,8$ $t_1=40$	$P_2=3,8$ $t_4=700$
28	$P_1=2$ $t_1=30$	$P_2=5,5$ $t_4=720$
29	$P_1=3$ $v_1=0,3$	$P_2=8$ $P_3=20$
30	$P_1=4$ $v_1=0,25$	$P_2=10$ $P_3=25$
Примітка – одиниці вимірювання наведжених величин: p, бар; v, м <sup>3</sup> /кг; t, °C		

### Завдання 3. Термодинамічні процеси водяної пари

За заданими двома початковими параметрами водяної пари визначити інші початкові параметри, а також знайти кінцеві параметри для заданого процесу.

Визначити зміни внутрішньої енергії, фізичної ексергії, виконану роботу і кількість підведеного або відведеного тепла для 1 кг робочого тіла.

Розв'язання задачі проілюструвати  $h-s$ -діаграмою.

Вихідні дані наведені у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Вихідні дані до завдання 3

Варіант	Початкові параметри		Кінцеві параметри			
			Ізохора	Ізобара	Ізотерма	Адіабата
1	$p_1 = 10$	$t_1 = 300$	$t_2 = 350$	$h_2 = 3500$	$h_2 = 2900$	$p_2 = 1$
2	$p_1 = 20$	$t_1 = 340$	$s_2 = 6,4$	$s_2 = 7,2$	$p_2 = 4$	$t_2 = 140$
3	$p_1 = 10$	$t_1 = 260$	$t_2 = 300$	$s_2 = 7,5$	$p_2 = 2$	$t_2 = 100$
4	$p_1 = 60$	$x_1 = 0,9$	$t_2 = 280$	$t_2 = 320$	$p_2 = 0,9$	$x_2 = 0,8$
5	$p_1 = 60$	$t_1 = 350$	$s_2 = 6,0$	$s_2 = 5,7$	$h_2 = 2800$	$x_2 = 0,95$
6	$p_1 = 16$	$t_1 = 300$	$x_2 = 1,0$	$x_2 = 0,86$	$s_2 = 7,5$	$h_2 = 2900$
7	$p_1 = 8$	$x_1 = 0,96$	$t_2 = 270$	$t_2 = 320$	$h_2 = 2500$	$h_2 = 2100$
8	$p_1 = 6$	$t_1 = 175$	$t_2 = 440$	$x_2 = 0,95$	$p_2 = 3$	$p_2 = 1$
9	$p_1 = 16$	$x_1 = 0,96$	$s_2 = 5,6$	$t_2 = 250$	$s_2 = 7,0$	$p_2 = 3$
10	$p_1 = 4$	$x_1 = 0,8$	$x_2 = 1,0$	$t_2 = 160$	$s_2 = 8,0$	$h_2 = 2500$
11	$p_1 = 20$	$t_1 = 400$	$x_2 = 0,95$	$h_2 = 3000$	$p_2 = 29$	$p_2 = 0,5$
12	$p_1 = 0,05$	$x_1 = 0,8$	$h_2 = 2500$	$t_2 = 50$	$s_2 = 8,0$	$v_2 = 35$
13	$p_1 = 14$	$h_1 = 2600$	$h_2 = 3200$	$t_2 = 320$	$s_2 = 6,4$	$h_2 = 2100$
14	$p_1 = 0,04$	$x_1 = 0,75$	$s_2 = 7,8$	$x_2 = 1$	$p_2 = 0,015$	$h_2 = 2100$
15	$p_1 = 0,06$	$x_1 = 0,8$	$t_2 = 100$	$h_2 = 2500$	$p_2 = 0,02$	$h_2 = 3000$
16	$p_1 = 125$	$t_1 = 520$	$h_2 = 2850$	$t_2 = 350$	$v_2 = 0,3$	$v_2 = 1,2$
17	$p_1 = 90$	$t_1 = 480$	$t_2 = 540$	$x_2 = 0,95$	$p_2 = 30$	$h_2 = 2100$
18	$p_1 = 2$	$x_1 = 0,9$	$x_2 = 0,74$	$t_2 = 200$	$v_2 = 4,5$	$h_2 = 3200$
19	$p_1 = 0,5$	$x_1 = 0,95$	$t_2 = 190$	$h_2 = 2980$	$p_2 = 0,1$	$x_2 = 0,85$
20	$v_1 = 4,0$	$x_1 = 0,9$	$h_2 = 2200$	$t_2 = 220$	$s_2 = 9,05$	$p_2 = 15$
21	$t_1 = 450$	$v_1 = 1,2$	$h_2 = 3180$	$t_2 = 580$	$s_2 = 6,95$	$x_2 = 0,95$
22	$t_1 = 250$	$p_1 = 0,4$	$s_2 = 8,65$	$x_2 = 0,85$	$h_2 = 2700$	$t_2 = 550$
23	$p_1 = 7$	$t_1 = 350$	$t_2 = 600$	$s_2 = 6,8$	$v_2 = 4,0$	$x_2 = 0,9$
24	$p_1 = 1$	$h_1 = 2800$	$t_2 = 250$	$s_2 = 8,05$	$x_2 = 0,88$	$p_2 = 0,14$
25	$s_1 = 7,5$	$t_1 = 150$	$h_2 = 2980$	$s_2 = 6,0$	$x_2 = 0,9$	$v_2 = 5,0$
26	$p_1 = 0,05$	$x_1 = 0,9$	$s_2 = 9,05$	$h_2 = 2100$	$v_2 = 80$	$t_2 = 310$
27	$p_1 = 2$	$t_1 = 300$	$h_2 = 3320$	$s_2 = 8,8$	$v_2 = 0,08$	$x_2 = 0,91$
28	$p_1 = 1,4$	$s_1 = 7,0$	$t_2 = 150$	$h_2 = 3040$	$p_2 = 0,25$	$t_2 = 550$
29	$p_1 = 5$	$t_1 = 500$	$h_2 = 3120$	$s_2 = 7,75$	$v_2 = 0,08$	$p_2 = 0,04$
30	$v_1 = 5,0$	$x_1 = 0,95$	$s_2 = 8,75$	$t_2 = 250$	$p_2 = 0,05$	$h_2 = 3400$

Примітка – одиниці вимірювання наведених величин:  $p$ , бар;  $v$ , м<sup>3</sup>/кг;  $t$ , °C;  $h$ , кДж/кг;  $s$ , кДж/кг К

#### Завдання № 4. Термодинамічні процеси вологого повітря

Атмосферне повітря, яке має параметри  $t_3$  і  $h_3$ , потрапляє у калорифер першого підігріву, де здійснюється його нагрівання до  $t_{к1}$ . Потім повітря надходить у камеру змішування кондиціонера, де воно змішується з внутрішнім повітрям, параметри якого  $t_B$  і  $\varphi_B$ . Кількість зовнішнього повітря  $G_3$  у три рази більше рециркуляційного  $G_B$ , тобто  $G_3 / G_B = 3$ . Суміш двох потоків обробляється у зрошувальній камері до  $\varphi = 95\%$  і підігрівається у калорифері другого підігріву до  $t_{к2}$ , після чого подається у приміщення, яке кондиціонується.

Визначити параметри повітря після змішування, витрати тепла на першій та другий підігріву і зміну вологовмісту повітря у камері зрошування кондиціонера.

Побудувати процес обробки вологого повітря на  $h-d$  – діаграмі.

Вихідні дані наведені у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Вихідні дані до завдання 4

Варіант	$t_3, ^\circ\text{C}$	$h_3, \text{кДж/кг}$	$t_B, ^\circ\text{C}$	$\varphi_B, \%$	$t_{к1}, ^\circ\text{C}$	$t_{к2}, ^\circ\text{C}$
1	2	3	4	5	6	7
1	0	4	17	55	10	12
2	-1	3	18	55	11	13
3	-2	2	19	50	12	14
4	-3	0	20	45	10	14
5	-4	-1	21	60	9	16
6	-5	-2	22	65	7	15
7	-6	-3	23	65	8	17
8	-7	-4	24	70	6	16
9	-8	-5	25	70	5	17
10	-9	-7	23	50	7	15
11	-10	-8	22	60	8	16
12	-11	-9	21	40	9	13
13	-12	-10	20	45	8	12
14	-13	-12	19	75	7	13
15	-14	-13	18	65	6	12
16	-15	-14	17	75	5	11

Продовження таблиці 1.5

1	2	3	4	5	6	7
17	-16	-15	16	60	4	10
18	-17	-16	17	70	4	12
19	0	5	24	55	12	17
20	-1	4	23	50	11	16
21	-2	3	22	45	10	14
22	-3	1	24	45	9	15
23	-4	0	22	75	8	16
24	-5	-1	23	70	7	16
25	-6	-2	24	40	6	17
26	-7	-3	25	40	5	18
27	-8	-6	23	40	4	16
28	-9	-6	22	60	5	15
29	-10	-7	20	65	5	13
30	-11	-8	24	60	6	16

## Методичні вказівки до виконання завдань

### Розрахунок газової суміші (завдання 1)

Масовий склад суміші перераховують через об'ємні частки за формулою

$$g_i = \frac{r_i \cdot \mu_i}{\sum_{i=1}^n r_i \cdot \mu_i}, \quad (1.1)$$

де  $\mu_i$  – молекулярна маса компонента газової суміші, що знаходиться за таблицею А.1;  $n$  – число компонентів суміші.

Мольні теплоємності і показник адиабати при постійному об'ємі і постійному тиску газів наведені в додатку Б.

Уявну молекулярну масу суміші визначають за формулою, кг/кмоль,

$$\mu_{см} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot \mu_i. \quad (1.2)$$

Газову постійну суміші й окремих компонентів визначають за формулами, Дж/(кг·К):

$$R_{см} = \frac{8314}{\mu_{см}}; \quad R_i = \frac{8314}{\mu_i}. \quad (1.3)$$

Густина суміші й окремих компонентів при нормальних фізичних умовах розраховується на підставі рівняння стану ідеального газу, кг/м<sup>3</sup>,

$$\rho_{см} = \frac{1}{v_{см}} = \frac{p_H}{R_{см} T_H}, \quad \rho_i = \frac{1}{v_i} = \frac{p_H}{R_i T_H}, \quad (1.4)$$

де  $p_H = 1,013 \cdot 10^5$  Па;  $T_H = 273$  К.

Парціальні тиски газів у суміші, мм рт. ст.,

$$p_i = r_i \cdot p_{см}, \quad (1.5)$$

де  $p_{см} = 760$  мм рт.ст.

Кількість теплоти, що віддається 1 кг газової суміші при охолодженні від  $t_1$  до  $t_2$  при постійному тиску, обчислюється за формулою, Дж/кг,

$$q_p = t_2 \cdot \sum g_i c_{pm2i} - t_1 \cdot \sum g_i c_{pm1i}, \quad (1.6)$$

при постійному об'ємі

$$q_v = t_2 \cdot \sum g_i c_{vm2i} - t_1 \cdot \sum g_i c_{vm1i}, \quad (1.7)$$

де  $c_p$  і  $c_v$  – масові ізобарна й ізохорна теплоємності (додатки В і Г).

Кількість тепла, що віддається 1 м<sup>3</sup> газової суміші при охолодженні від  $t_1$  до  $t_2$  при постійному тиску і постійному об'ємі, обчислюються аналогічно, Дж/м<sup>3</sup>,

$$q'_p = t_2 \cdot \sum r_i c'_{pm2i} - t_1 \cdot \sum r_i c'_{pm1i}, \quad (1.8)$$

$$q'_v = t_2 \cdot \sum r_i c'_{vm2i} - t_1 \cdot \sum r_i c'_{vm1i}, \quad (1.9)$$

де  $c'_p$  і  $c'_v$  – об'ємні ізобарні й ізохорні теплоємності компонентів суміші ( додати Д і Е ).

Правильність виконаних розрахунків можна перевірити за співвідношеннями:

$$Q_p = M \cdot q_p = V_H \cdot q'_p; \quad Q_v = M \cdot q_v = V_H \cdot q'_v;$$

$$\frac{M}{V_H} = \frac{q'_p}{q_p} = \rho_{cm}; \quad \frac{M}{V_H} = \frac{q'_v}{q_v} = \rho_{cm}. \quad (1.10)$$

Література: [1, с.16-22; 2, с.86-98].

### Розрахунок циклу ідеального газу ( завдання 2)

Для виконання завдання варто скористатися рівняннями відповідних термодинамічних процесів, на перетині яких лежать характерні точки циклу (рисунок 1.1), а також рівнянням стану ідеального газу.

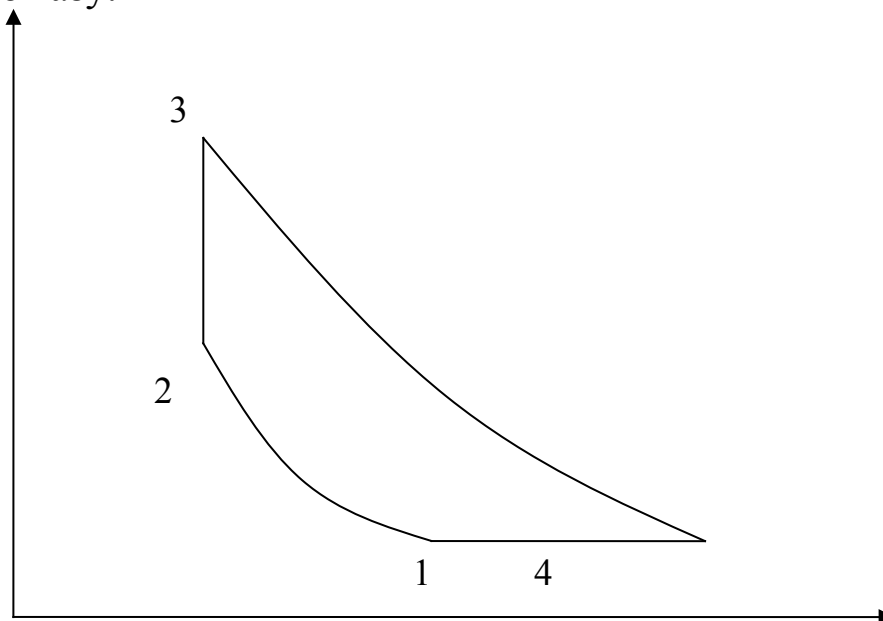


Рисунок 1.1 – Прямий цикл ідеальних газів

Наприклад, якщо для першої точки циклу за умовою задані тиск  $p_1$  і температура  $T_1$ , то питомий об'єм  $v_1$  визначається виразом

$$v_1 = \frac{R T_1}{p_1}. \quad (1.11)$$

Точка 2 лежить на перетині ізотерми 1-2 та ізохори 2-3, тому для переходу від точки 1 до точки 2 варто скористатися рівнянням ізотермічного процесу  $T = \text{const}$ , тобто  $T_2 = T_1$ .

Якщо за умовою задачі для точки 2 заданий тиск  $p_2$ , то питомий об'єм  $v_2$  можна визначити, скориставшись співвідношеннями,  $\text{м}^3/\text{кг}$  :

$$v_2 = \frac{p_1 v_1}{p_2}, \quad (1.12)$$

або

$$v_2 = \frac{R T_2}{p_2}, \quad (1.13)$$

де газову постійну для повітря треба взяти з таблиці А.1. Аналогічно розраховуються відсутні  $v$  і  $T$  параметри для точок 3 і 4.

Ентропію будь-якої точки циклу  $S_i$  (де  $i=1,4$ ) обчислюють за будь-якою з трьох формул:

$$\left. \begin{aligned} S_i &= c_p \cdot \ln \frac{T_i}{T_n} - R \cdot \ln \frac{p_i}{p_n} \\ S_i &= c_v \cdot \ln \frac{T_i}{T_n} + R \cdot \ln \frac{v_i}{v_n} \\ S_i &= c_p \cdot \ln \frac{v_i}{v_n} + c_v \cdot \ln \frac{p_i}{p_n} \end{aligned} \right\}, \quad (1.14)$$



де  $c_v = \frac{R}{k-1}$  - ізохорна і  $c_p = k c_v$  - ізобарна теплоємності повітря ( $k$  - з таблиці Б.1);  $v_n = \frac{R T_n}{p_n}$ .

Робота зміни об'єму, Дж/кг :

$$\text{- для ізотермічного процесу } l_{1-2} = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}; \quad (1.15)$$

$$\text{- для ізохорного процесу } l_{2-3} = 0; \quad (1.16)$$

$$\text{- для адіабатного процесу } l_{3-4} = \frac{R}{k-1} (T_3 - T_4); \quad (1.17)$$

$$\text{- для ізобарного процесу } l_{4-1} = p_4 (v_1 - v_4). \quad (1.18)$$

Робота циклу обчислюється як алгебраїчна сума робіт в окремих процесах циклу

$$l_u = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-1}. \quad (1.19)$$

Кількість підведеного або відведеного тепла, Дж/кг,

$$\text{- для ізотермічного процесу } q_{1-2} = l_{1-2}; \quad (1.20)$$

$$\text{- для ізохорного процесу } q_{2-3} = c_v (T_3 - T_2); \quad (1.21)$$

$$\text{- для адіабатного процесу } q_{3-4} = 0; \quad (1.22)$$

$$\text{- для ізобарного процесу } q_{4-1} = c_p (T_1 - T_4). \quad (1.23)$$

Робота циклу як еквівалент алгебраїчної суми підведеної і відведеної кількості теплоти

$$q_u = q_{1-2} + q_{2-3} + q_{3-4} + q_{4-1}. \quad (1.24)$$

## Термічний ККД циклу

$$\eta_t = \frac{l_{ц}}{q_{підв.}}, \quad (1.25)$$

де  $q_{підв.}$  – підведена кількість теплоти в циклі.

Література: [1,с.40-43, 185-199; 2,с.43-45, 98-109].

## Термодинамічні процеси водяної пари ( завдання 3)

При виконанні завдання використовується  $h-s$ -діаграма водяної пари (додаток Ж ). Кожна точка на діаграмі характеризується такими параметрами:  $p, v, t, h, S$  і  $x$ . Таким чином, якщо початкова точка задана параметрами  $p_1$  і  $t_1$ , то визначивши положення точки 1 на перетині ізобари  $p_1$  й ізотерми  $t_1$ , слід зазначити:  $v_1$  – по ізохорі, що проходить через дану точку;  $h_1$  – по осі ординат;  $s_1$  – по осі абцис і  $x_1$  – по лінії сталої сухості, що проходить через точку 1 .

Для визначення кінцевих параметрів для кожного з чотирьох заданих процесів потрібно пройти з точки 1 по лінії процесу до перетину з лінією, обумовленою заданим параметром. Наприклад, якщо для кінцевої точки ізохорного процесу задана температура  $t_2$ , то для побудови точки 2 необхідно з точки 1 пройти по лінії  $v=const$  до перетину з ізотермою  $t_2=const$  .

Зміна внутрішньої енергії  $\Delta u$ , виконана робота  $l$  та кількість підведеного або відведеного тепла  $q$  в кожному процесі визначається за рівнянням першого закону термодинаміки

$$q = \Delta u + l, \quad (1.26)$$

де  $\Delta u = u_2 - u_1$ ,  $u_i = h_i - p_i v_i$  – для будь-якої точки процесу.

Зміна фізичної ексергії обчислюється за формулою

$$\Delta e = e_2 - e_1 = (h_2 - h_1) - 273(s_2 - s_1). \quad (1.27)$$

Література: [1, с.22-40, 270-267; 2, с.29-43, 128-146].

### Термодинамічні процеси вологого повітря (завдання 4)

При виконанні завдання слід користуватися  $h-d$  – діаграмою вологого повітря, що наведена в додатку И.

По-перше, наносять точки З (зовнішнє повітря) і В (внутрішнє повітря). Точка З лежить на перетині ізотерми  $t_3$  та ізоентальпи  $h_3$ , а точка В – на перетині ізотерми  $t_B$  і лінії відносної вологи  $\phi_B$  (рисунок 1.2). Потім встановлюють лінію  $d_3 = \text{const}$  до перетину з ізотермою  $t_{K1} = \text{const}$ . Точка  $K_1$  відповідає стану вологого повітря на виході з калорифера першого підігріву. Далі слід з'єднати точки  $K_1$  і В прямою лінією і поділити її на два відрізки у відношенні зворотно-пропорційно масам потоків, які змішуються, тобто  $\frac{K_1 - C}{C - B} = \frac{G_B}{G_3}$ . Точка С визначає параметри

стану вологого повітря на вході у камеру зрошування кондиціонера. Процес охолодження та зволоження повітря у зрошувальній камері зображується лінією  $h_C = \text{const}$  до перетину її з лінією  $\phi = 95\%$ . Точка О відповідає стану вологого повітря на виході зі зрошувальної камери. Лінія  $d_O = \text{const}$  зображує процес підігріву повітря у калорифері другого підігрівання до температури  $t_{K2}$ . Точка  $K_2$  визначає параметри вологого повітря, яке подається у приміщення.

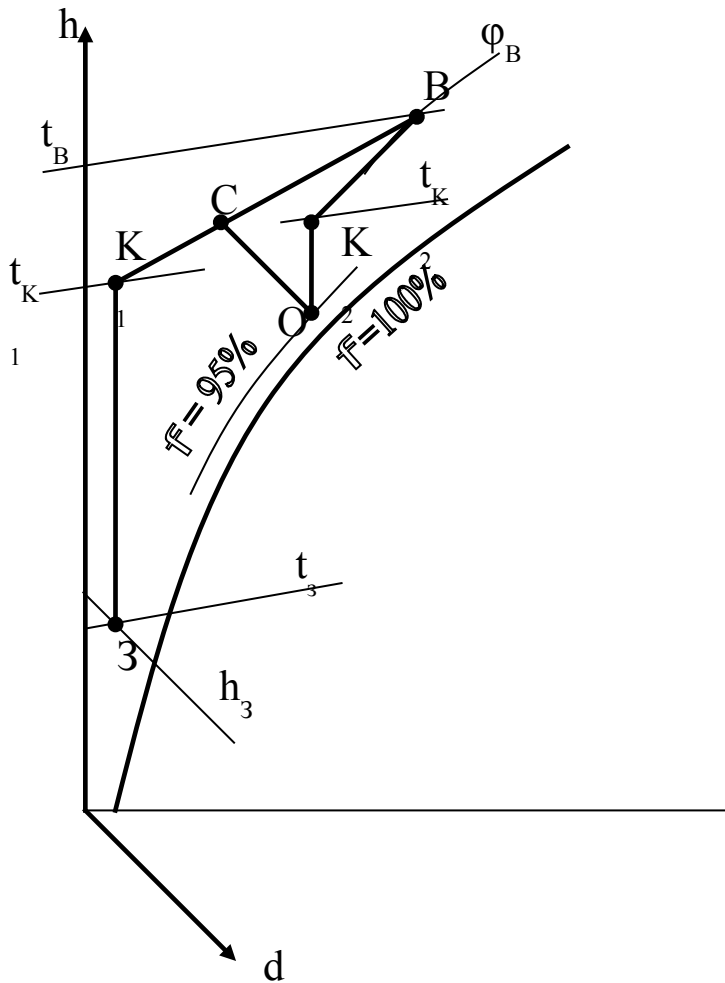


Рисунок 1.2 – Схема обробки вологого повітря

Витрата тепла на перший підігрів визначається за рівнянням

$$q_1 = h_{k1} - h_3. \quad (1.28)$$

Витрата тепла на другий підігрів визначається аналогічною формулою

$$q_2 = h_{k2} - h_o \quad (1.29)$$

Зміна вологовмісту повітря у камері зрошування кондиціонера

$$\Delta d = d_o - d_c. \quad (1.30)$$

Література: [1,с.22-40, 270-267; 2,с.29-43, 128-146].

## КОНТРОЛЬНА РОБОТА 2

Друга контрольна робота включає завдання 5–7 для студентів заочної форми навчання і завдання 6, 7 для студентів денної форми навчання. Студенти заочної форми навчання повинні також відповісти на 2 теоретичні питання. Варіанти до контрольної роботи наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Варіанти до контрольної роботи 2

Варіант	Питання	Варіант	Питання	Варіант	Питання
1	1, 10	11	2, 20	21	3, 14
2	2, 11	12	3, 21	22	4, 15
3	3, 12	13	4, 22	23	5, 16
4	4, 13	14	5, 23	24	6, 17
5	5, 14	15	6, 24	25	7, 18
6	6, 15	16	7, 25	26	8, 19
7	7, 16	17	8, 10	27	9, 20
8	8, 17	18	9, 11	28	1, 21
9	9, 18	19	1, 12	29	2, 22
10	1, 19	20	2, 13	30	3, 23

### Питання до контрольної роботи 2

1 Розгляньте робочий процес і теоретичну індикаторну діаграму одноступеневого поршневого компресора. Як обчислюється робота на привод компресора при ізотермічному, адіабатному і політропному процесі стиску? Який процес найбільш енергетично вигідний?

2 Чим відрізняється дійсна індикаторна діаграма одноступеневого компресора від теоретичної? Проілюструйте графічно.

3 Як впливає шкідливий простір на продуктивність компресора?

4 Що таке об'ємний ККД компресора? Як він змінюється при підвищенні тисків нагнітання? Поясніть графічно.

5 Які лінії індикаторної діаграми компресора не зображують термодинамічні процеси і чому?

6 Що обмежує значення тиску робочого тіла, яке стискується одноступеневим компресором?

7 Зобразіть в  $p-v$  і  $T-s$  координатах процес багатоступеневого стиснення газу в компресорі. Поясніть доцільність застосування багатоступеневого компресора?

8 Для чого застосовується охолодження циліндрів компресора? З якою метою в багатоступеневих компресорах використовують проміжні теплообмінники? Поясніть за допомогою  $p-v$ -діаграми.

9 Як необхідно розподілити тиск стиснення між ступенями багатоступеневого компресора і з якою метою?

10 На які групи поділяються ДВЗ? Порівняйте цикли ДВЗ при однакових ступенях стиснення і різних максимальних тисках і температурах.

11 Порівняйте цикли ДВЗ при різних ступенях стиску й однакових максимальних теплових і механічних навантаженнях.

12 Дайте опис індикаторної діаграми й ідеального циклу двигуна зі швидким згорянням палива при постійному об'ємі. Яке паливо застосовується і в чому полягають недоліки двигуна?

13 Дайте опис ідеального циклу ДВЗ із підведенням теплоти при постійному тиску. Порівняйте цикл Дизеля з циклом Отто.

14 Зобразіть цикл ДВЗ зі змішаним підведенням теплоти в  $p-v$  і  $T-s$  координатах, укажіть характеристики циклу. Як обчислюється термічний ККД двигуна?

15 Чому в ідеальному циклі поршневого ДВЗ процес відведення теплоти прийнятий ізохорним, а в циклі ГТУ – ізобарним?

16 Зобразіть принципову схему газотурбінної установки і цикл з підведенням теплоти в ізобарному процесі. Як обчислюється термічний ККД такого двигуна?

17 Наведіть принципову схему ГТУ зі згорянням палива при постійному об'ємі. Зобразіть ідеальний цикл двигуна в  $p-v$  і  $T-s$  координатах і наведіть формулу для обчислення термічного ККД.

18 Що таке середній індикаторний тиск у циклах теплових двигунів? Напишіть формулу і поясніть графічно.

19 Чому неможливо здійснити на практиці тепловий двигун, що працює за циклом Карно?

20 Порівняйте цикли ГТУ зі згорянням палива при  $p = \text{const}$  і  $v = \text{const}$ . Які існують методи для підвищення ККД ГТУ?

21 У чому полягають переваги ГТУ перед ДВЗ і в чому переваги ДВЗ у порівнянні з ГТУ?

22 Який двигун називають реактивним? Наведіть класифікацію реактивних двигунів.

23 Що таке ексергія потоку робочої речовини в якому-небудь тепловому апараті? Як визначається ексергетичний ККД теплового двигуна і яких значень він може набувати?

24 Перелічіть способи підвищення термічного ККД будь-якого теплового двигуна. Зробіть необхідні пояснення.

25 Що загального між ДВЗ, ГТУ і реактивними двигунами? Чим вони відрізняються від паротурбінних установок?

## **Розрахунково-графічні завдання до контрольної роботи 2**

### **Завдання 5. Процеси в компресорі**

Визначити теоретичну потужність, яка потрібна для приведення повітряного одноступеневого компресора, якщо стиснення газу відбувається за адіабатою, за ізотермою та за політропою з показником політропи  $n$ . Продуктивність компресорів в усіх трьох випадках однакова і складає  $V$  при початкових параметрах  $P_1$  і  $t_1$ . Кінцевий тиск  $P_2$ .

Визначити витрату води для охолодження компресора при ізотермічному та політропному стисненні, якщо температура води підвищується на  $\Delta t$ . Побудувати теоретичні цикли компресорів у діаграмах  $P-v$  і  $T-s$ .

Визначити також необхідну кількість ступенів стиснення в повітряному багатоступеневому компресорі. Для запобігання спалахування парів мастила температура стиснутого повітря не повинна перевищувати  $t_{\text{max}}$ . Стиснення відбувається за політропою з показником політропи  $n$  до тиску  $P_K$ . Побудувати

теоретичний процес стиснення в багатоступінчастому компресорі в діаграмах  $p-v$  і  $T-s$ .

Вихідні дані до завдання 5 наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Вихідні дані до завдання 5

Варіант	$P_1$ , бар	$t_1$ , °C	$V$ , м <sup>3</sup> /хв	$\Delta t$ , °C	$n$	$P_2$ , бар	$t_{max}$ , °C	$P_k$ , бар
1	0,9	-10	4	10	1,15	3	210	30
2	0,92	-5	5	9	1,2	4	200	40
3	0,94	0	6	8	1,25	5	190	50
4	0,96	5	7	7	1,3	6	180	60
5	0,98	10	8	6	1,35	7	170	70
6	1.0	15	9	5	1,15	8	160	80
7	1,02	20	10	4	1,2	3	150	90
8	1,04	25	11	3	1,25	4	160	100
9	1,06	30	12	3	1,3	5	170	110
10	1,08	35	13	4	1,35	6	180	120
11	1,1	40	14	5	1,15	7	190	130
12	1,08	-10	15	6	1,2	8	200	140
13	1,06	-5	16	7	1,25	3	210	150
14	1,04	0	17	8	1,3	4	150	160
15	1,02	5	18	9	1,35	5	160	170
16	1,0	10	19	10	1,15	6	170	160
17	0,98	15	20	10	1,2	7	180	150
18	0,96	20	21	9	1,25	8	190	140
19	0,94	25	22	8	1,3	3	200	130
20	0,92	30	23	7	1,35	4	210	120
21	0,94	35	24	6	1,15	5	200	110
22	0,96	40	25	5	1,2	6	190	100
23	0,98	-10	26	4	1,25	7	180	90
24	1,0	-5	27	3	1,3	8	170	80
25	1,02	0	28	2	1,35	9	160	70
26	1,0	2	28	10	1,15	9	150	30
27	1,02	10	27	9	1,2	8	160	40
28	1,04	15	26	8	1,25	7	170	50
29	1,06	20	25	7	1,3	6	180	60
30	1,08	25	24	6	1,35	5	190	70

### Завдання 6. Розрахунок циклів ДВЗ



Для ідеального циклу двигуна внутрішнього згорання зі змішаним підведенням теплоти визначити параметри робочого тіла в характерних точках циклу, термічний ККД, кількість підведеної та відведеної теплоти, корисну роботу, якщо початкові параметри  $P_1$  і  $t_1$ , ступінь стиснення  $\epsilon$ , ступінь підвищення тиску  $\lambda$ , ступінь попереднього розширення  $\rho$ . Робоче тіло має властивості повітря.

Також визначити для циклу двигуна внутрішнього згорання з підведенням теплоти при  $\nu = const$  параметри робочого тіла в характерних точках циклу, термічний ККД, кількість підведеної та відведеної теплоти, корисну роботу, якщо початкові параметри робочого тіла такі, як у циклі зі змішаним підведенням теплоти.

Розглянути два випадки:

- ступінь стиснення  $\epsilon$  та кількість підведеної теплоти у циклах однакові;

- максимальні тиск та температура в циклах однакові.

Побудувати цикли у діаграмах  $P-\nu$  і  $T-s$  в масштабі.

Вихідні дані до завдання 6 наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Вихідні дані до завдання 6

Варіант	$P_1$ , бар	$t_1$ , °C	$\epsilon$	$\lambda$	$\rho$
1	2	3	4	5	6
1	0,9	-10	7	1,6	1,2
2	0,92	-5	8	1,7	1,3
3	0,94	0	9	1,8	1,4
4	0,96	5	10	1,9	1,5
5	0,98	10	11	2,0	1,6
6	1,0	15	12	2,2	1,7
7	1,02	20	13	2,3	1,8
8	1,04	25	14	2,4	1,9
9	1,06	30	15	2,5	2,0
10	1,08	35	16	2,6	1,9
11	1,1	40	17	2,5	1,8
12	1,08	-10	18	2,4	1,7

Продовження таблиці 2.3

1	2	3	4	5	6
---	---	---	---	---	---

13	1,06	-5	19	2,3	1,6
14	1,04	0	20	2,2	1,5
15	1,02	5	19	2,1	1,4
16	1,0	10	18	2,0	1,3
17	0,98	15	17	1,9	1,2
18	0,96	20	16	1,8	1,3
19	0,94	25	15	1,7	1,4
20	0,92	30	14	1,6	1,5
21	0,94	35	13	1,5	1,6
22	0,96	40	12	1,6	1,7
23	0,98	-10	11	1,7	1,8
24	1,0	-5	10	1,8	1,9
25	1,02	0	9	1,9	2,0
26	1,0	5	20	1,6	1,2
27	1,02	10	19	1,7	1,3
28	1,04	15	18	1,8	1,4
29	1,06	20	17	1,9	1,5
30	1,08	25	16	2,0	1,6

### Завдання 7. Розрахунок циклів ГТУ

Для ідеального циклу газотурбінної установки з підведенням теплоти при сталому тиску визначити параметри робочого тіла в характерних точках циклу, термічний ККД, кількість підведеної та відведеної теплоти, корисну роботу.

Початкові параметри  $P_1$  і  $t_1$  такі, як у завданні 6, ступінь підвищення тиску  $\pi$ , а ступінь збільшення температури  $\theta$ .

Робоче тіло має властивості повітря.

Побудувати цикл у діаграмах  $P-v$  і  $T-s$  в масштабі.

Виконати аналіз впливу ступеня підвищення тиску  $\pi$  та ступеня регенерації теплоти  $\sigma$  на термічний ККД  $\eta_t$  ГТУ, враховуючи, що кількість підведеної теплоти не змінюється (побудувати графіки залежності  $\eta_t$  від  $\pi$  та  $\sigma$ ).

Вихідні дані до завдання 7 наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Вихідні дані до завдання 7

Варіант	$\pi$	$\theta$	Варіант	$\pi$	$\theta$	Варіант	$\pi$	$\theta$
---------	-------	----------	---------	-------	----------	---------	-------	----------

01	4	2,5	11	5,0	2,5	21	6,0	2,1
02	4,1	2,4	12	5,1	2,4	22	6,1	2,0
03	4,2	2,3	13	5,2	2,3	23	6,2	2,1
04	4,3	2,2	14	5,3	2,2	24	6,3	2,2
05	4,4	2,1	15	5,4	2,1	25	6,4	2,3
06	4,5	2,0	16	5,5	2,0	26	4	2,0
07	4,6	2,1	17	5,6	2,5	27	4,1	2,1
08	4,7	2,2	18	5,7	2,4	28	4,2	2,2
09	4,8	2,3	19	5,8	2,3	20	4,3	2,3
10	4,9	2,4	20	5,9	2,2	30	4,4	2,4

## Методичні вказівки до виконання завдань

### Процеси в компресорі (завдання 5)

Завдання складається з двох частин. У першому випадку розглядається одноступеневий компресор, у другому – багаступеневе стиснення при однакових початкових умовах.

Теоретична потужність привода одноступеневого поршневого компресора при політропному стисненні визначається за формулою, кВт,

$$N_n = n \cdot L_n = \frac{n}{n-1} p_1 V \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]; \quad (2.1)$$

- при адіабатному стисненні

$$N_a = k \cdot L_a = \frac{k}{k-1} p_1 V \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]; \quad (2.2)$$

- при ізотермічному стисненні

$$N_t = L_t = p_1 V \frac{p_2}{p_1}. \quad (2.3)$$

Витрата охолодної води  $G_{wn}$  при політропному стисненні визначається рівнянням теплового балансу

$$G_{wn}c_{pw} \Delta t = G c_n (T_1 - T_{2n}), \quad (2.4)$$

де  $c_{pw} = 4,19$  кДж/(кг·К) – теплоємність води;

$c_n = c_v \frac{n-k}{n-1}$ , кДж/(кг·К) – теплоємність політропного процесу стиснення повітря;

$G$ , кг – маса всмоктуваного повітря;

$$G = \frac{p_1 V}{RT_1}; \quad (2.5)$$

$c_v$  – ізохорна теплоємність повітря;

$$c_v = \frac{R}{k-1}; \quad (2.6)$$

$T_{2n}$  – температура повітря наприкінці політропного процесу стиснення

$$T_{2n} = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}. \quad (2.7)$$

При ізотермічному стисненні рівняння теплового балансу має вигляд

$$G_{wt} c_{pw} \Delta t = L_t. \quad (2.8)$$

При  $z$ -східчастому стисненні газу в компресорі відношення тисків у кожному ступені  $\left( \frac{p_{вих}}{p_{вх}} \right)_{ст}$  пов'язано з початковим  $p_1$  і кінцевим  $p_k$  тисками повітря співвідношенням

$$\left( \frac{p_{вых}}{p_{вх}} \right)_{ст} = \sqrt[z]{\frac{p_к}{p_1}}, \quad (2.9)$$

а з температурами повітря на вході  $T_1$  і на виході  $T_{2 ст}$  зі ступенів співвідношенням

$$\left( \frac{T_{2 ст}}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}} = \left( \frac{p_{вых}}{p_{вх}} \right)_{ст}. \quad (2.10)$$

Прирівнявши  $T_{2 ст} = T_{\max}$  за умовою задачі, визначаємо  $\left( \frac{p_{вых}}{p_{вх}} \right)_{ст}$ .

Прологарифмувавши рівняння (2.9), знаходимо

$$z = \frac{\ln \left( \frac{p_2}{p_1} \right)}{\ln \left( \frac{p_{вых}}{p_{вх}} \right)_{ст}}. \quad (2.11)$$

Отримане значення  $z$  потрібно округлити у більший бік до найближчого цілого числа, після чого визначити за формулою

(2.9) дійсне значення  $\left( \frac{p_{вых}}{p_{вх}} \right)_{ст}$  та  $T_{2 ст}$ , скориставшись

формулою (2.10). Порівняти отримане значення  $T_{2 ст}$  з  $T_{\max}$ . Повинно виконуватися співвідношення  $T_{2 ст} \leq T_{\max}$ .

Розрахувати політропний процес стиснення в багатоступеневому компресорі та побудувати його в діаграмах  $p-v$  та  $T-s$  у масштабі.

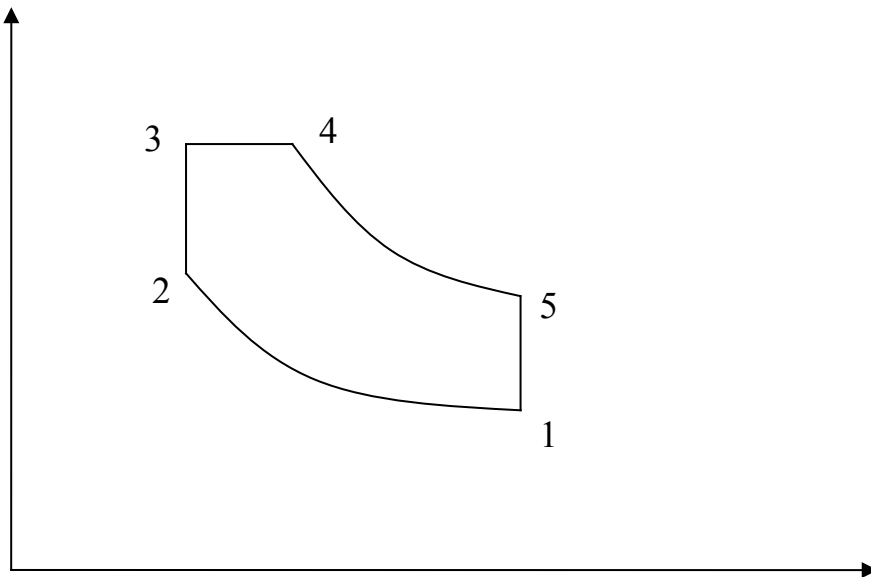
Література: [1,с.223-233; 2,с.325-333].

## Розрахунок циклів ДВЗ (завдання 6)

Розрахунок ідеального циклу ДВЗ зі змішаним підведенням теплоти виконується з урахуванням процесів, з яких складається цикл (рисунок 2.1):

- 1-2 – адіабатне стиснення робочого тіла;
- 2-3 – ізохорний процес підведення теплоти до робочого тіла;
- 3-4 – ізобарний процес підведення теплоти;
- 4-5 – адіабатне розширення (робочий хід);
- 5-1 – ізохорний процес відведення теплоти від робочого тіла у навколишнє середовище.

←



←

Рисунок 2.1 – Ідеальний цикл ДВЗ зі змішаним підведенням теплоти

У другій частині завдання потрібно перебудувати отриманий цикл у цикл з ізохорним підведенням теплоти. При цьому необхідно розглянути два випадки, зазначені в умові.

Усі три цикли необхідно зобразити на одному рисунку.

Література: [1,с.276-286; 2,с.278-281].

## Розрахунок циклу ГТУ (до завдання 7)

Методика розрахунку циклу ГТУ така ж, як і ДВЗ. Тут тільки варто врахувати, що підведення теплоти до робочого тіла здійснюється в ізобарному процесі 2-3, а відведення теплоти від робочого тіла у навколишнє середовище в ізобарному процесі 4-1 (рисунок 2.2).

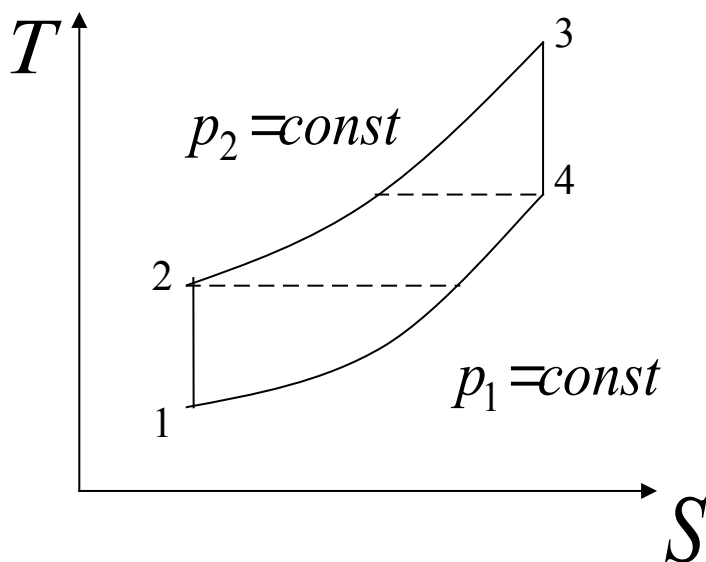


Рисунок 2.2 – Ідеальний цикл газотурбінної установки ГТУ

Термічний ККД регенеративного циклу обчислюється за формулою

$$\eta_t = 1 - \frac{T_4 - T_1 - \sigma(T_4 - T_2)}{T_3 - T_2 - \sigma(T_4 - T_2)}, \quad (2.12)$$

де  $\sigma$  – ступінь регенерації теплоти.  $\sigma = 0$  відповідає циклу без регенерації, а  $\sigma = 1$  циклу з граничною регенерацією теплоти. Задаючись значеннями  $\sigma$  з інтервалу  $0 \leq \sigma \leq 1$ , необхідно обчислити відповідні значення  $\eta_t$  і побудувати графік залежності  $\eta_t$  від  $\sigma$ .

Залежність  $\eta_t$  від  $\pi = \frac{p_2}{p_1}$  визначається за формулою



$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} \quad (2.13)$$

Для побудови графіка  $\eta_t(\pi)$  необхідно задатися значеннями  $\pi$  з інтервалу  $2 \leq \pi \leq 8$  та обчислити відповідні значення  $\eta_t$ .

Література: [1, с.286-301; 2, с.287-295].

### КОНТРОЛЬНА РОБОТА 3

Для студентів денної форми навчання третя контрольна робота включає завдання 8–12; для заочної форми навчання – відповіді на два теоретичні питання та завдання 8–11.

Таблиця 3.1 – Варіанти до контрольної роботи 3

Варіант	Питання	Варіант	Питання	Варіант	Питання
1	1, 16	11	11, 16	21	6, 16
2	2, 17	12	12, 17	22	7, 17
3	3, 18	13	13, 18	23	8, 18
4	4, 19	14	14, 19	24	9, 19
5	5, 20	15	15, 20	25	10, 20
6	6, 21	16	1, 21	26	11, 21
7	7, 22	17	2, 22	27	12, 22
8	8, 23	18	3, 23	28	13, 23
9	9, 24	19	4, 24	29	14, 24
10	10, 25	20	5, 25	30	15, 25

#### Питання до контрольної роботи 3

1 Чи можна використовувати цикл Карно для здійснення паросилової установки? Зобразіть схему установки і термодинамічний цикл. Назвіть практичні недоліки такої ПСУ.

2 Наведіть схему паросилової установки, що працює за циклом Ренкіна, а також її цикл в  $p-v$  і  $T-s$  координатах.

Позначте і поясніть процеси. Чим відрізняється цикл Ренкіна від циклу Карно?

3 Від чого залежить термічний ККД циклу Ренкіна? Проілюструйте графічно вплив різних параметрів на величину ККД циклу.

4 Накресліть схему установки і цикл з вторинним перегрівом пари. Як обчислюється термічний ККД циклу? У чому полягають переваги циклу з вторинним перегрівом у порівнянні з циклом Ренкіна?

5 Опишіть схему ПСУ з регенеративним підігрівом живильної води. Наведіть формули для обчислення роботи і термічного ККД регенеративного циклу.

6 У чому полягає сутність і енергетична ефективність спільного вироблення теплоти й електроенергії на ТЕЦ? Що таке коефіцієнт використання теплоти палива?

7 Як змінюється ступінь сухості пари за турбіною при збільшенні початкового тиску?

8 Як впливає початкова температура перегрітої пари на ступінь її сухості при виході з турбіни?

9 Як впливає на ККД циклу Ренкіна і ступінь сухості пари за турбіною процес дроселювання перед турбіною?

10 Для чого застосовуються парогазові цикли? Нарисуйте принципову схему установки. Дайте необхідні пояснення.

11 Як визначається питома витрата пари в паросилових установках?

12 У чому полягають достоїнства і недоліки води як робочого тіла?

13 Для чого застосовуються бінарні цикли? У чому полягають достоїнства і недоліки ртуті як робочого тіла?

14 Що таке внутрішній відносний ККД турбіни? Напишіть формулу і поясніть графічно за допомогою  $h-s$ -діаграми.

15 Як обчислюється внутрішній абсолютний ККД турбіни? Як він пов'язаний з термічним ККД і внутрішнім відносним ККД?

16 На які групи поділяються холодильні установки? Як оцінюється ефективність роботи холодильної машини?

17 Перерахуйте найбільш відомі холодоагенти, дайте порівняльну характеристику їхніх термічних властивостей.

18 Розгляньте схему і цикл повітряної холодильної машини. У чому її недоліки?

19 Наведіть найпростішу схему і цикл ідеальної парокомпресійної холодильної установки в  $T-s$ -діаграмі. Які переваги парокомпресійної холодильної установки перед повітряною?

20 Для чого застосовується переохолоджувач і перегрівник у парокомпресійних холодильних установках? Складіть рівняння теплового балансу ПКХУ і покажіть цикл у  $\lg p-h$ -діаграмі.

21 Зобразіть схему абсорбційної холодильної установки і надайте опис принципу її роботи.

22 Покажіть схему і цикл роботи пароежекторної холодильної установки, опишіть принцип її дії.

23 Чим відрізняється цикл теплового насоса від циклу холодильної машини? Як оцінюється ефективність роботи теплонасосної установки?

24 Як здійснюється безмашинне перетворення енергії? Назвіть методи прямого перетворення тепла в електроенергію. Поясніть принцип роботи термогенератора і термоелектронного перетворювача.

25 На якому принципі заснована робота МГД-генератора? Розгляньте схему установки і цикл у  $T-s$  координатах.

### **Розрахунково-графічні завдання до контрольної роботи 3**

#### **Завдання 8. Розрахунок циклу Ренкіна**

Для циклу Ренкіна з перегрівом пари, який має початкові параметри  $P_1$  і  $t_1$  і тиск у конденсаторі  $P_2$ , визначити питому кількість підведеної та відведеної теплоти, роботу циклу та його термічний ККД.

Як зміниться термічний ККД, якщо перед розширенням пари на турбіні початковий тиск зменшиться за рахунок дроселювання до  $P_1' = \varphi \cdot P_1$ .

Навести принципову схему паросилової установки (ПСУ) та показати її цикл у діаграмі  $h-s$ .

Вихідні дані до завдання наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Вихідні дані до завдань 8 – 10

Варіант	$P_1$ , бар	$t_1$ , °C	$P_2$ , бар	$\varphi$
1	25	470	0,04	0,85
2	24	450	0,05	0,86
3	23	430	0,06	0,87
4	22	400	0,07	0,88
5	21	480	0,08	0,89
6	20	460	0,09	0,90
7	19	440	0,1	0,89
8	18	420	0,12	0,88
9	17	400	0,14	0,87
10	16	420	0,16	0,86
11	15	440	0,18	0,85
12	14	460	0,20	0,85
13	13	480	0,22	0,86
14	12	500	0,24	0,87
15	10	420	0,26	0,88
16	11	440	0,28	0,89
17	12	460	0,3	0,90
18	13	480	0,32	0,85
19	14	500	0,34	0,86
20	15	480	0,36	0,87
21	16	460	0,38	0,88
22	17	440	0,4	0,89
23	18	420	0,45	0,90
24	19	410	0,50	0,85
25	20	400	0,55	0,90
26	10	470	0,04	0,90
27	11	450	0,05	0,89
28	12	430	0,06	0,88
29	13	400	0,07	0,87
30	14	480	0,08	0,86

**Завдання 9. Розрахунок циклу з проміжним (вторинним) перегрівом**

Для циклу ПСУ з проміжним перегрівом пари визначити питому кількість підведеної та відведеної теплоти, роботу циклу та його термічний ККД, якщо попереднє розширення відбувається до стану сухої насиченої пари, а проміжний перегрів здійснюється при постійному тиску до початкової температури. Початкові параметри та кінцевий тиск пари прийняти такими, як у завданні 8.

Порівняти показники циклу (термічний ККД та кінцеву сухість пари) з проміжним перегрівом і без проміжного перегріву (останні взяти із завдання 8).

Навести принципову схему ПСУ та її цикл у діаграмах  $T - s$  та  $h - s$ .

### **Завдання 10. Розрахунок регенеративного циклу ПСУ**

Визначити показники циклу ПСУ з двома регенеративними відборами пари при тисках

$$P_{01} = P_1 - \frac{1}{3} \cdot (P_1 - P_2),$$
$$P_{02} = P_1 - \frac{2}{3} \cdot (P_1 - P_2).$$

Вихідні дані прийняти такими, як у завданні 8.

Порівняти термічні ККД циклів з регенерацією теплоти (завдання 10), Ренкіна (завдання 8) та циклу ПСУ з проміжним перегрівом пари (завдання 9).

Навести принципову схему ПСУ та її цикл у діаграмах  $T - s$  та  $h - s$ .

### **Завдання 11. Розрахунок циклу холодильної машини**

Визначити питоме холодовиробництво, теплове навантаження на конденсатор, роботу компресора, холодильний коефіцієнт для циклу парокомпресійної холодильної машини (ПКХМ), яка працює на холодоагенті R-12 (дозволяється замінити на R-22), якщо температура у випарнику  $t_b$ , температура

конденсації  $t_k$ , перегрів пари після випарника  $\Delta t_b = 4$  °С, переохолодження пари після конденсатора  $\Delta t_k = 3$  °С. Визначити загальну теоретичну потужність компресора, якщо холодовиробництво складає  $Q_0$ .

Навести принципову схему ПКХМ та її цикл у діаграмі  $\lg p - h$ .

Вихідні дані до завдання наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 3.3 – Вихідні дані до завдання 11, 12

Варіант	$t_b$ , °С	$t_k$ , °С	$Q_0$ , кВт	$Q$ , кВт
1	2	3	4	5
1	-40	+20	10	10
2	-35	+20	15	15
3	-30	+20	20	20
4	-25	+20	25	25
5	-20	+20	30	30
6	-15	+20	35	35
7	-10	+20	40	40
8	-5	+20	45	45
9	0	+20	50	50
10	+5	+20	55	55
11	-40	+30	60	60
12	-35	+30	65	65
13	-30	+30	70	70
14	-25	+30	75	75
15	-20	+30	80	80
16	-15	+30	85	85
17	-10	+30	90	90
18	-5	+30	95	95
19	0	+30	100	100
20	+5	+30	10	10
21	-15	+40	15	15
22	-10	+40	20	20

Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4	5
23	-5	+40	25	25

24	0	+40	30	30
25	+5	+40	35	35
26	-30	+5	10	10
27	-30	+10	15	15
28	-30	+15	20	20
29	-30	+20	25	25
30	-30	+25	30	30

## **Завдання 12. Розрахунок циклу теплового насоса**

Розрахувати цикл теплового насоса, якщо теплові витрати з приміщення складають  $Q$ , температура навколишнього середовища  $t_0$ , а температура поверхні нагрівальних приладів у приміщенні  $t_n$ . Насос працює на холодоагенті R-22.

Вихідні дані до завдання приведено у таблиці 3.3.

Навести принципову схему теплового насоса та його цикл у діаграмі  $\lg p - h$ .

### **Методичні вказівки до виконання завдань**

#### **Цикли паросилових установок (до завдань 8 – 10)**

Завдання 8–10, у яких розглядаються такі цикли паросилових установок, як цикл Ренкіна (рисунок 3.1), цикл з проміжним (вторинним) перегрівом пари (рисунок 3.2) і регенеративний цикл (рисунок 3.3), виконуються за допомогою  $h - S$ -діаграми водяної пари (додаток Ж).

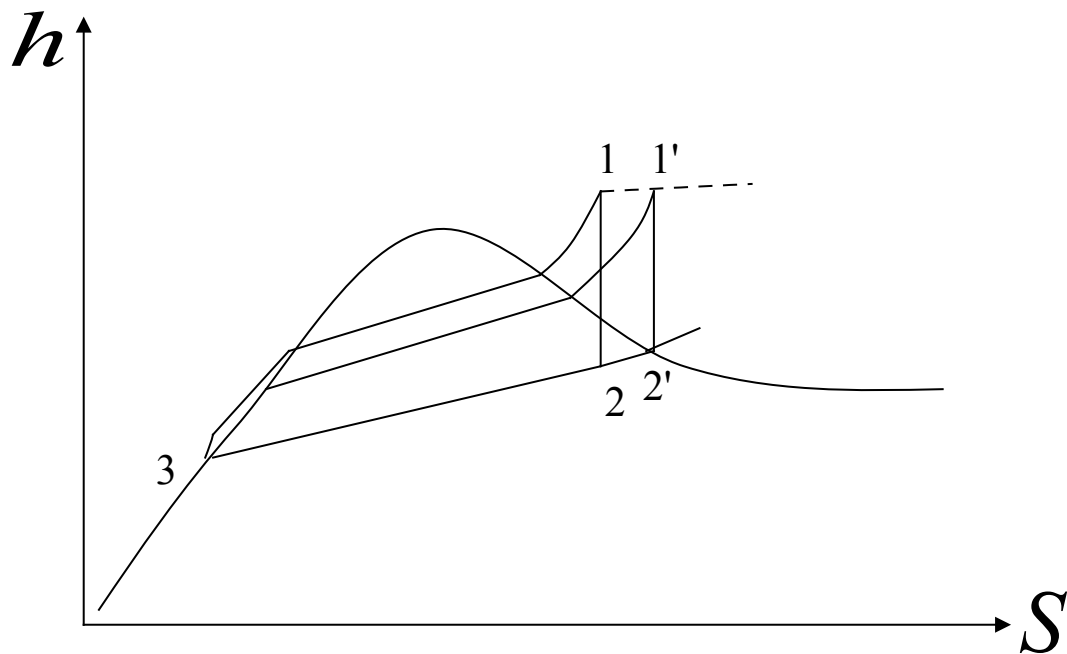


Рисунок 3.1 – Цикл Ренкіна з дрослюванням пари перед турбіною

Термічний ККД найпростішого циклу ПСУ – циклу Ренкіна – розраховується за формулою

$$\eta_t = \frac{l_u}{q_1} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}, \quad (3.1)$$

де  $h_1$  – ентальпія пари на вході в турбіну, обумовлена точкою перетину ізобари  $P_1$  й ізотерми  $t_1$  (рисунок 3.1);

$h_2$  – ентальпія пари, що відробило, на вході в конденсатор, обумовлена точкою перетину адіабати розширення пари в турбіні 1-2 з ізобарою  $P_2$ ;

$h_3$  – ентальпія рідини (конденсату) при тиску в конденсаторі, який можна обчислити за формулою

$$h_3 = 4,19 t_n \Big|_{P_2}, \quad (3.2)$$



де  $t_n \Big|_{p_2}$  – температура насичення водяної пари при тиску  $p_2$ , обумовлена на  $h$ - $S$ -діаграмі точкою перетину ізобари  $p_2$  з прикордонною кривою  $x=1$ .

$$\text{Кількість підведеної теплоти} \quad q_1 = h_1 - h_3. \quad (3.3)$$

$$\text{Кількість відведеної теплоти} \quad q_2 = h_2 - h_3. \quad (3.4)$$

$$\text{Робота циклу} \quad l_y = q_1 - q_2 = h_1 - h_2. \quad (3.5)$$

Процес дроселювання умовно зображують у термодинамічних діаграмах лінією  $h = \text{const}$ . Тому точка 1', що визначає стан пари після дроселювання перед турбіною, лежить на перетині ізоентальпи  $h_1$  й ізобари  $p_1' = \varphi \cdot p_1$ . Точка 2' визначає стан пари за турбіною, лежить на перетині адіабати 1'-2' з ізобарою  $p_2$ .

Термічний ККД ПСУ з дроселюванням

$$\eta_t = \frac{h_1' - h_2'}{h_1' - h_3}. \quad (3.6)$$

Термічний ККД циклу з проміжним (вторинним) перегрівом пари (завдання 9) визначається за загальною формулою

$$\eta_t = \frac{l_y}{q_1}. \quad (3.7)$$

$$\text{Робота циклу} \quad l_y = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4). \quad (3.8)$$

$$\text{Кількість підведеної теплоти} \quad q_1 = (h_1 - h_6) + (h_3 - h_2). \quad (3.9)$$

$$\text{Кількість відведеної теплоти} \quad q_2 = q_1 - l_y = h_4 - h_6. \quad (3.10)$$

Точка 1 (рисунок 3.2) – загальна точка для всіх циклів ПСУ. Вона визначає стан пари після пароперегрівача.

Точка 2 визначає стан пари за турбіною високого тиску і лежить на перетині адіабати 1-2 з верхньою прикордонною кривою  $x=1$ .

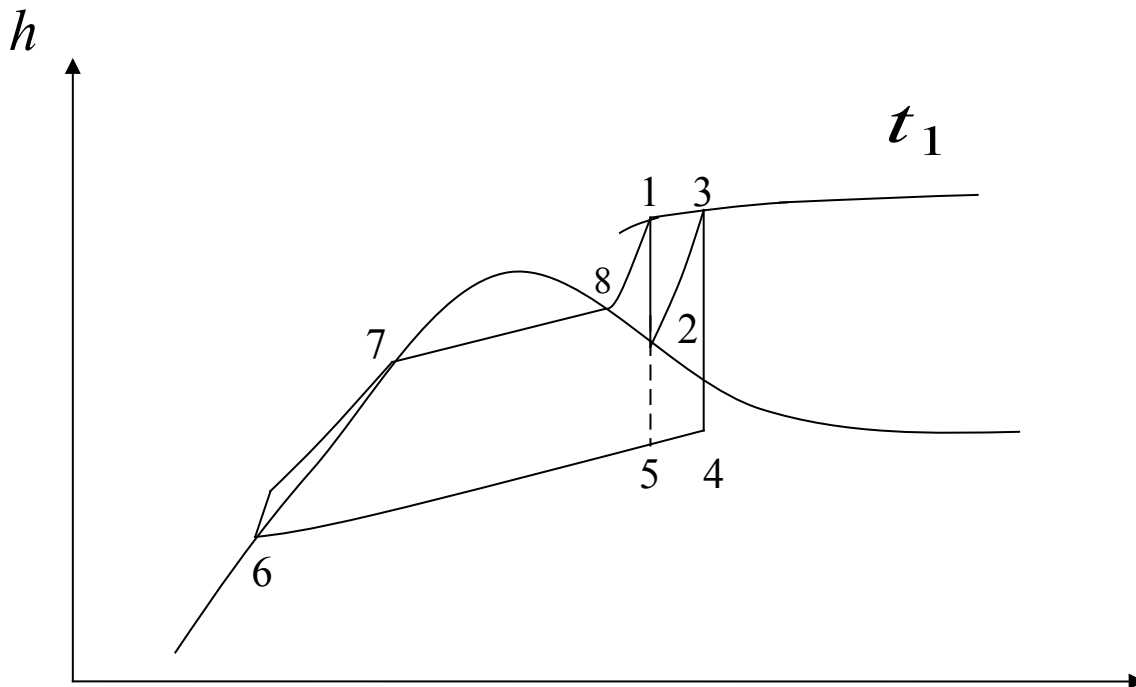


Рисунок 3.2 – Цикл паросилової установки (ПСУ) з проміжним перегрівом пари

Точка 3 визначає стан пари після вторинного перегріву і лежить на перетині ізобари  $p_1' = const$ , яка проходить через точку 2, і ізотерми  $t_1 = const$ .

Точка 4 визначає стан пари за турбіною низького тиску і лежить на перетині адіабати 3-4 з ізобарою  $p_2 = const$ .

Термічний ККД циклу без проміжного перегріву

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_5}{h_1 - h_6}, \quad (3.11)$$

де точка 5 визначається перетином адіабати, проведеної з точки 1, з ізобарою  $p_2$ .

У циклі ПСУ з двома регенеративними відборами (завдання 10) точки 2, 3 і 4 (рисунок 3.3) лежать на перетині адіабати розширення пари в турбіні, проведеної з точки 1, з ізобарами  $p_{01}$ ,  $p_{02}$  і  $p_2$  відповідно.

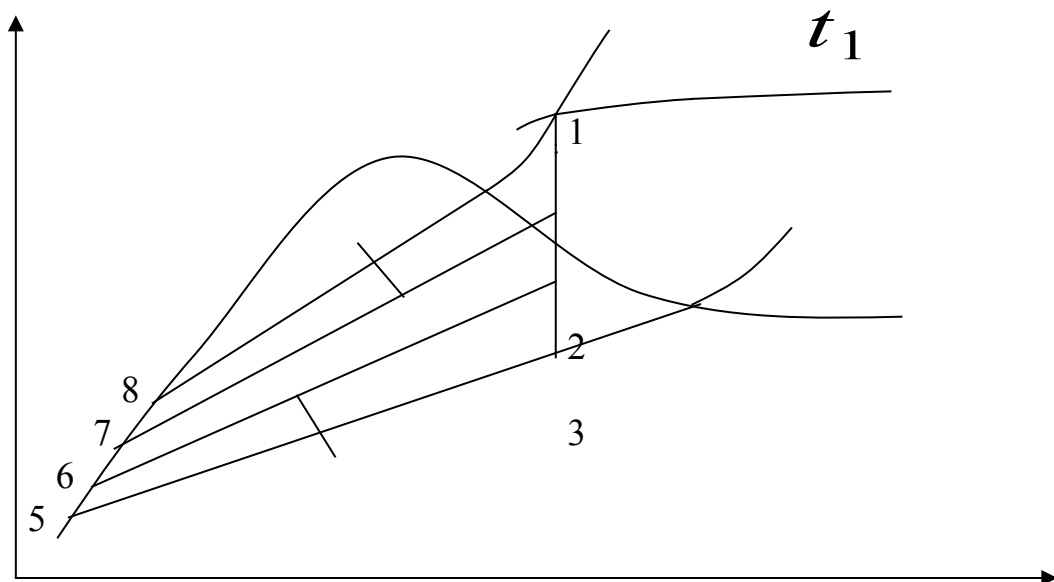


Рисунок 3.3 – Регенеративний цикл ПСУ з двома відборами

Точки 5, 6 і 7 лежать на перетині прикордонної кривої  $x = 0$  з ізобарами  $p_2$ ,  $p_{02}$  і  $p_{01}$  відповідно.

Частини витрати робочого тіла, що відводяться в кожному відборі, визначаються виразами:

$$\alpha_1 = \frac{h_7 - h_6}{h_2 - h_6}; \quad (3.12)$$

$$\alpha_2 = \frac{(1 - \alpha_1)(h_6 - h_5)}{h_3 - h_5}. \quad (3.13)$$

Ентальпії рідкого стану робочого тіла розраховуються за температурами насичення при даному тиску.

Робота регенеративного циклу

$$l_{рег} = h_1 - h_4 - \alpha_1(h_2 - h_4) - \alpha_2(h_3 - h_4). \quad (3.14)$$

Термічний ККД циклу  $\eta_t = \frac{l_{рег}}{q_1}.$  (3.15)

Кількість підведеної теплоти  $q_1 = h_1 - h_7.$  (3.16)

Кількість відведеної теплоти  $q_2 = q_1 - l_{рег}.$  (3.17)

Література: [1,с.309-343; 2,с.306-311, 313-315].

### **Розрахунок циклів холодильних установок (до завдань 11, 12)**

При виконанні завдань 11 і 12 необхідно користуватися  $\lg p - h$  - діаграмою холодоагенту R12, що наведена в додатку К.

Питома холодопродуктивність парокompресійної холодильної установки визначається як кількість теплоти, яка підводиться до 1 кг робочого тіла у випарнику

$$q_0 = h_6 - h_5, \quad (3.18)$$

де  $h_5$  – ентальпія вологої пари, що надходить у випарник (рисунок 3.4);

$h_6$  – ентальпія сухої насиченої пари, що надходить у пароперегрівник.

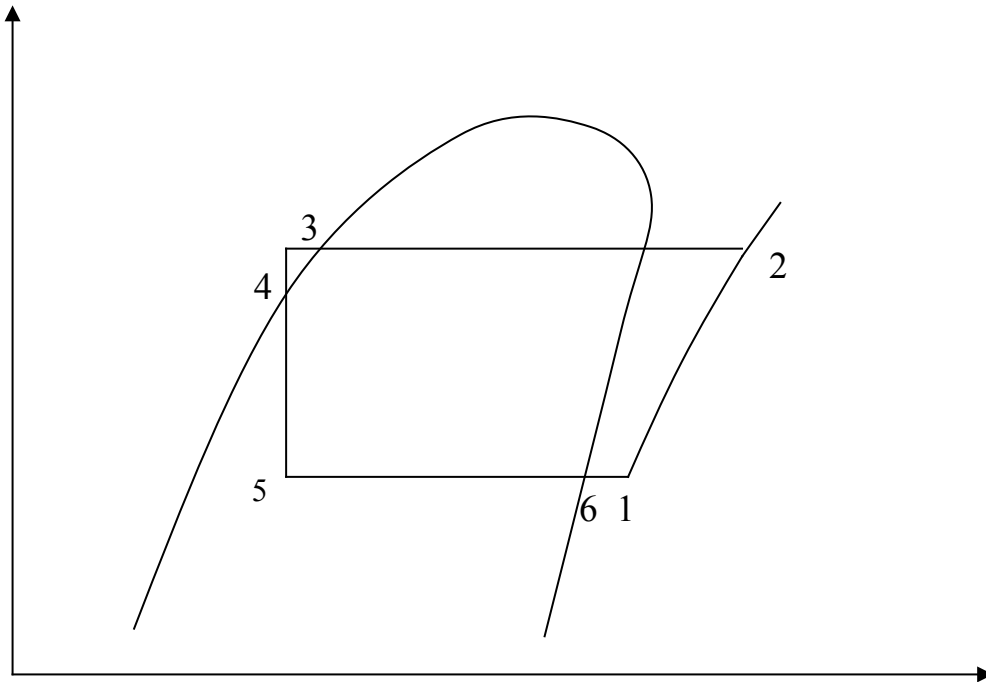


Рисунок 3.4 – Цикл холодильної установки

Підведення тепла в пароперегрівник становить

$$q_{np} = h_1 - h_6, \quad (3.19)$$

де  $h_1$  – ентальпія перегрітої пари на вході в компресор.

Робота циклу парокompресійної холодильної машини дорівнює роботі компресора.

Теоретична потужність компресора

$$N_m = G \cdot l_u, \quad (3.20)$$

де  $G = \frac{Q_0}{q_0}$  - масова витрата пари через компресор, кг/с.

При  $G = 1 \text{ кг/с}$   $N_m = l_u = h_2 - h_1, \quad (3.21)$

де  $h_2$  – ентальпія пари холодоагенту на виході з компресора.

Теплове навантаження на конденсатор обчислюється як різниця ентальпій перегрітої пари на вході  $h_2$  і рідини на виході  $h_3$  з конденсатора

$$q_{кн} = h_2 - h_3. \quad (3.22)$$

Кількість теплоти, що відводиться в переохолоджувачі, становить

$$q_{но} = h_3 - h_4, \quad (3.23)$$

де  $h_4$  – ентальпія рідини на вході в регулюючий дросельний вентиль.

Холодильний коефіцієнт установки

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l_u}. \quad (5.24)$$

Побудову циклу холодильної машини варто починати з точки 6, що задається перетином прикордонної кривої  $x=1$  з ізотермою  $t_v$ . Потім потрібно визначити положення точки 1. Для цього необхідно обчислити температуру робочого тіла, що надходить у компресор:  $t_1 = t_v + \Delta t_v$ , і знайти на діаграмі ізобару  $p_v$ , скориставшись тим, що в області вологої пари ізотерми збігаються з ізобарами. Перетин ліній  $p_v = const$  і  $t_1 = const$  дасть точку 1. Вважаючи стиснення перегрітої пари в компресорі адіабатним, проводять лінію 1-2 по ізентропі  $S = const$  до перетину з ізобарою  $p_k$ , положення якої також визначають за заданою ізотермою  $t_k$  (точка 2). Точка 3 лежить на перетині прикордонної кривої рідини  $x=0$  й ізотерми  $t_k$ . Точку 4 варто визначати на перетині ізотерми  $(t_k - \Delta t_k)$  з прикордонною кривою  $x=0$ . Оскільки в процесі дроселювання ентальпія робочого тіла не змінюється, то положення точки 5 визначиться перетином ізоентальпи  $h_5 = h_4$  з ізотермою  $t_v$ .

Якщо цикл побудований правильно, то повинна виконуватися умова теплового балансу холодильної установки:

- для 1 кг/с холодоагенту

$$q_0 + l_{\text{ц}} + q_{\text{пр}} = q_{\text{кн}} + q_{\text{по}}, \quad (3.25)$$

- для  $G$  кг/с холодоагенту

$$Gq_0 + N_m l_{\text{ц}} + Gq_{\text{пр}} = Gq_{\text{кн}} + Gq_{\text{по}} \quad (3.26)$$

Ідеальний цикл теплового насоса (рисунок 3.5) аналогічний циклу холодильної машини.

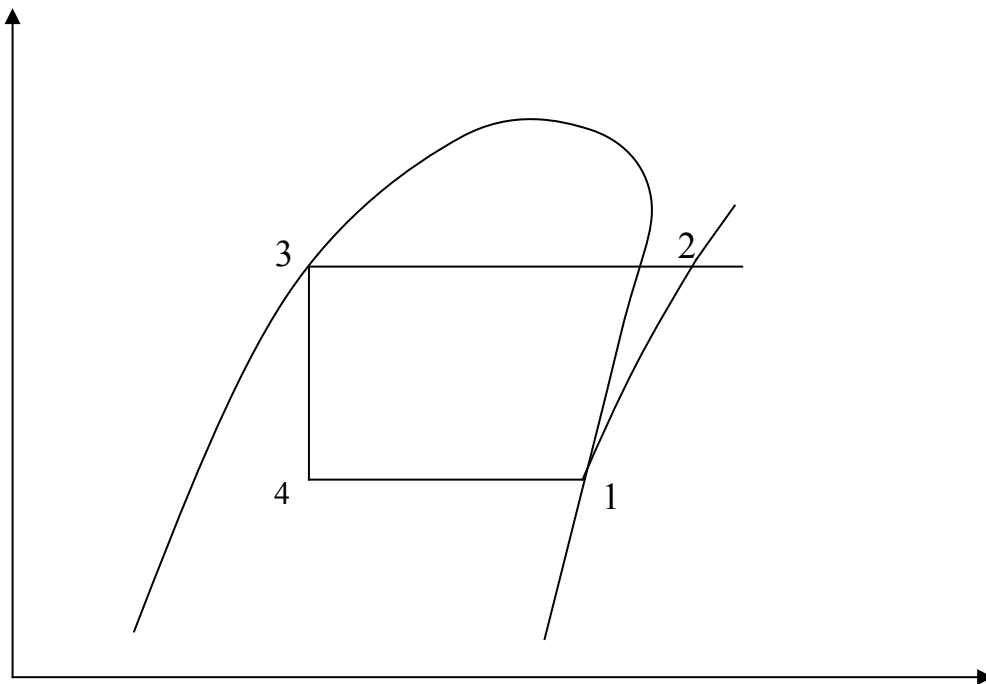


Рисунок 3.5 – Цикл теплонасосної холодильної установки

При виконанні завдання 12 розраховують такі величини:

– питома холодовидатність, кДж/кг,

$$q_0 = h_1 - h_4; \quad (3.27)$$

– теплота, передана в теплообміннику нагрівальним пристроєм на опалення приміщення, кДж/кг,

$$q = h_2 - h_3; \quad (3.28)$$

– теоретична робота циклу, кДж/кг,

$$l_u = h_2 - h_1; \quad (3.29)$$

– холодильний коефіцієнт

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l_u}; \quad (3.30)$$

– опалювальний коефіцієнт

$$\varphi = \frac{q}{l_u}; \quad (3.31)$$

– витрата холодоагенту, кг/с,

$$m = \frac{Q}{q}. \quad (3.32)$$

– теоретична потужність приводного двигуна компресора, кВт,

$$N_m = m \cdot l_u. \quad (3.33)$$

Рівняння теплового балансу має вигляд:

- для 1 кг/с холодоагенту

$$q_0 + l_u = q, \quad (3.34)$$

або

- для  $G$  кг/с холодоагенту

$$Gq_0 + N_m l_u = Gq. \quad (3.35)$$



Якщо параметри циклу знайдені правильно, повинне виконуватися також співвідношення

$$\varphi = \varepsilon + 1. \quad (3.36)$$

Література: [1,с.370-373, 377-384; 2,с.333-338, 340-343].

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

### Основна

- 1 Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейдлин А.Е. Техническая термодинамика. – М.: Энергия, 1974. – 447 с.
- 2 Техническая термодинамика: Учеб. пособие для вузов/ В.И.Крутов; Под ред. В.И.Крутова. – М.: Высш. шк., 1991. – 344 с.
- 3 Бурлянда О.Ф. Технічна термодинаміка. – К.: Техніка, 2001. – 320 с.

### Додаткова

- 4 Новиков И.И. Термодинамика: Учеб пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1984. – 592с.
- 5 Беляев Н.М. Термодинамика. – К.: Вищ. шк., 1987. – 344 с.
- 6 Сборник задач по технической термодинамике / Андрианова Т. Н., Дзампов Б. В., Зубарев В. Н., Ремизов С. А. – М., 1981. – 206 с.
- 7 Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. – М.: Машиностроение, 1973. – 344 с.

## Додаток А

Таблиця А.1 – Фізичні постійні деяких газів

Газ	Хімічна формула	Молекулярна маса, $\frac{кг}{кмоль}$	Газова постійна $R$ , $\frac{Дж}{кг \cdot К}$
Кисень	$O_2$	32	259,8
Азот	$N_2$	28,026	296,6
Повітря	-	28,96	287,04
Вуглекислий газ	$CO_2$	44,01	188,9
Водяна пара	$H_2O$	18,016	461,5

## Додаток Б

Таблиця Б.1 – Мольні теплоємності і показник адиабати при постійному об'ємі і постійному тиску газів

Атомність газу	$\frac{\mu c_v,}{\text{кДж}} \cdot \text{кмоль} \cdot \text{К}$	$\frac{\mu c_p,}{\text{кДж}} \cdot \text{кмоль} \cdot \text{К}$	$k$
Одноатомний	12,5	20,8	1,67
Двоатомний	20,8	29,1	1,4
Трьох-багатоатомний і	29,1	37,4	1,33

## Додаток В

Таблиця В.1 — Середня масова теплоємність газів при постійному тиску

$t, ^\circ\text{C}$	$O_2$	$N_2$	$CO_2$	$H_2O$
0	0,9148	1,0304	0,8148	1,8594
100	0,9232	1,0316	0,8658	1,8728
200	0,9353	1,0346	0,9102	1,8937
300	0,9500	1,0400	0,9487	1,9192
400	0,9651	1,0475	0,9826	1,9477
500	0,9793	1,0567	1,0128	1,9778
600	0,9927	1,0668	1,0396	2,0092
700	1,0048	1,0777	1,0639	2,0419
800	1,0157	1,0881	1,0852	2,0754
900	1,0258	1,0982	1,1045	2,1097
1000	1,0350	1,1078	1,1225	2,1436
1100	1,0434	1,1170	1,1384	2,1771
1200	1,0509	1,1258	1,1530	2,2106
1300	1,0580	1,1342	1,1660	2,2429
1400	1,0647	1,1422	1,1782	2,2743
1500	1,0714	1,1497	1,1895	2,3048
1600	1,0773	1,1584	1,1995	2,3346
1700	1,0831	1,1631	1,2091	2,3630
1800	1,0886	1,1690	1,2179	2,3907
1900	1,0940	1,1748	1,2259	2,4166
2000	1,0990	1,1803	1,2334	2,4422
Примітка – Одиниці вимірювання середньої масової теплоємності газів при постійному тиску $C_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$				

## Додаток Г

Таблиця Г.1 — Середня масова теплоємність газів при постійному об'ємі

$t, ^\circ\text{C}$	$O_2$	$N_2$	$CO_2$	$H_2O$
0	0,6548	0,7352	0,6259	1,3980
100	0,6632	0,7365	0,6770	1,4114
200	0,6753	0,7394	0,7214	1,4323
300	0,6900	0,7448	0,7599	1,4574
400	0,7051	0,7524	0,7938	1,4863
500	0,7193	0,7616	0,8240	1,5160
600	0,7327	0,7716	0,8508	1,5474
700	0,7448	0,7821	0,8746	1,5805
800	0,7557	0,7926	0,8964	1,6140
900	0,7658	0,8030	0,9157	1,6483
1000	0,7750	0,8127	0,9332	1,6823
1100	0,7834	0,8219	0,9496	1,7158
1200	0,7913	0,8307	0,9638	1,7488
1300	0,7984	0,8390	0,9772	1,7815
1400	0,8051	0,8470	0,9893	1,8129
1500	0,8114	0,8541	1,0006	1,8434
1600	0,8173	0,8612	1,0107	1,8728
1700	0,8231	0,8675	1,0203	1,9016
1800	0,8286	0,8738	1,0291	1,9293
1900	0,8340	0,8792	1,0371	1,9552
2000	0,8390	0,8847	1,0446	1,9804
Примітка — Одиниці вимірювання середньої масової теплоємності газів при постійному об'ємі $C_v, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$				

## Додаток Д

Таблиця Д.1 — Середня об'ємна теплоємність газів при постійному тиску

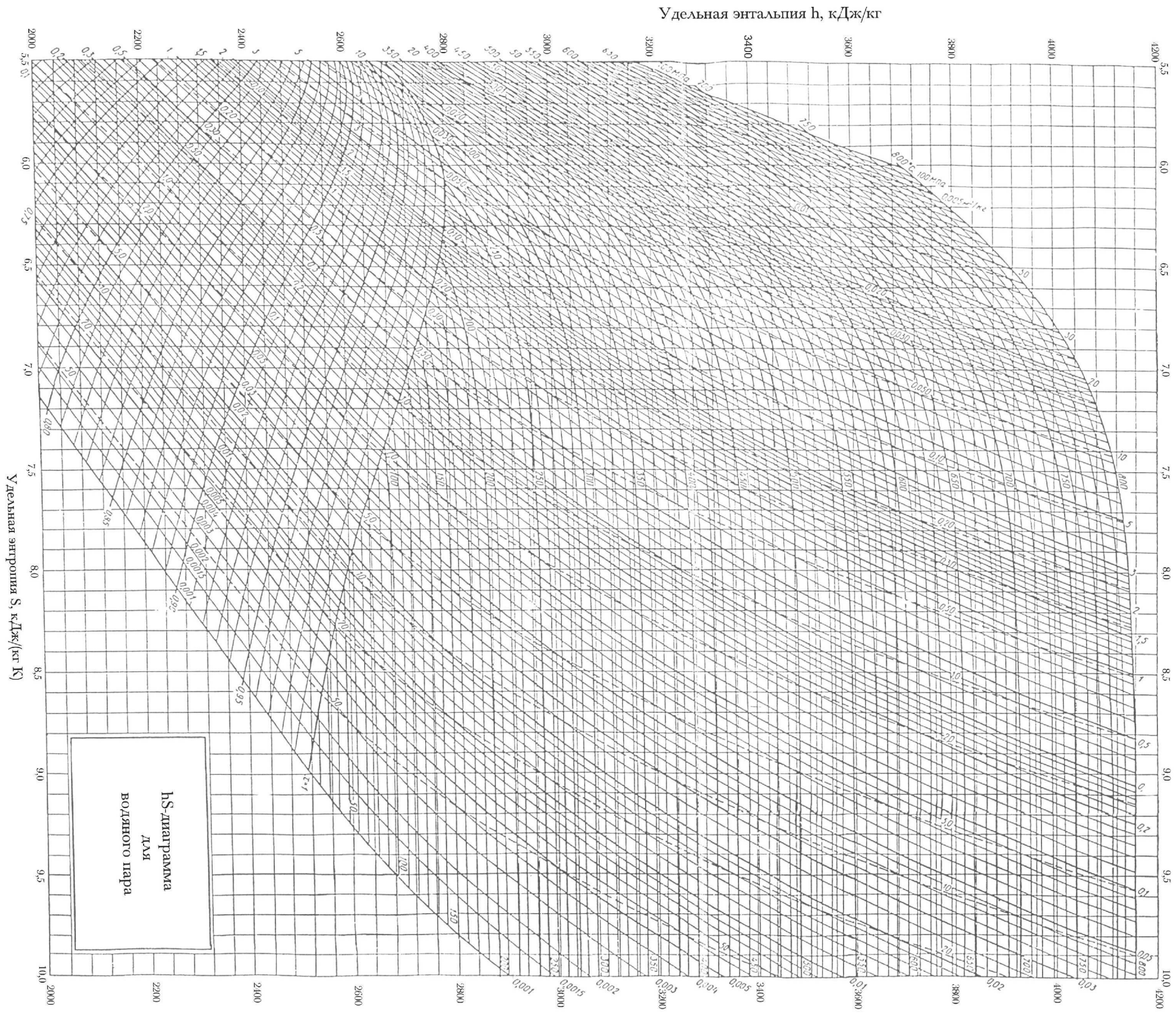
$t, ^\circ\text{C}$	$O_2$	$N_2$	$CO_2$	$H_2O$
0	1,3059	1,2946	1,5998	1,4943
100	1,3176	1,2958	1,7003	1,5052
200	1,3352	1,2996	1,7873	1,5223
300	1,3561	1,3067	1,8627	1,5424
400	1,3775	1,3163	1,9297	1,5654
500	1,3980	1,3276	1,9887	1,5897
600	1,4168	1,3402	2,0411	1,6148
700	1,4344	1,3536	2,0884	1,6412
800	1,4499	1,3670	2,1311	1,6680
900	1,4645	1,3796	2,1692	1,6957
1000	1,4775	1,3917	2,2035	1,7229
1100	1,4892	1,4034	2,2349	1,7501
1200	1,5005	1,4143	2,2638	1,7769
1300	1,5106	1,4252	2,2898	1,8028
1400	1,5202	1,4348	2,3136	1,8280
1500	1,5294	1,4440	2,3354	1,8527
1600	1,5378	1,4528	2,3555	1,8761
1700	1,5462	1,4612	2,3743	1,8996
1800	1,5541	1,4687	2,3915	1,9213
1900	1,5617	1,4758	2,4074	1,9423
2000	1,5692	1,4825	2,4221	1,9628
Примітка – Одиниці вимірювання середньої об'ємної теплоємності газів при постійному тиску $C_p', \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$				

## Додаток Е

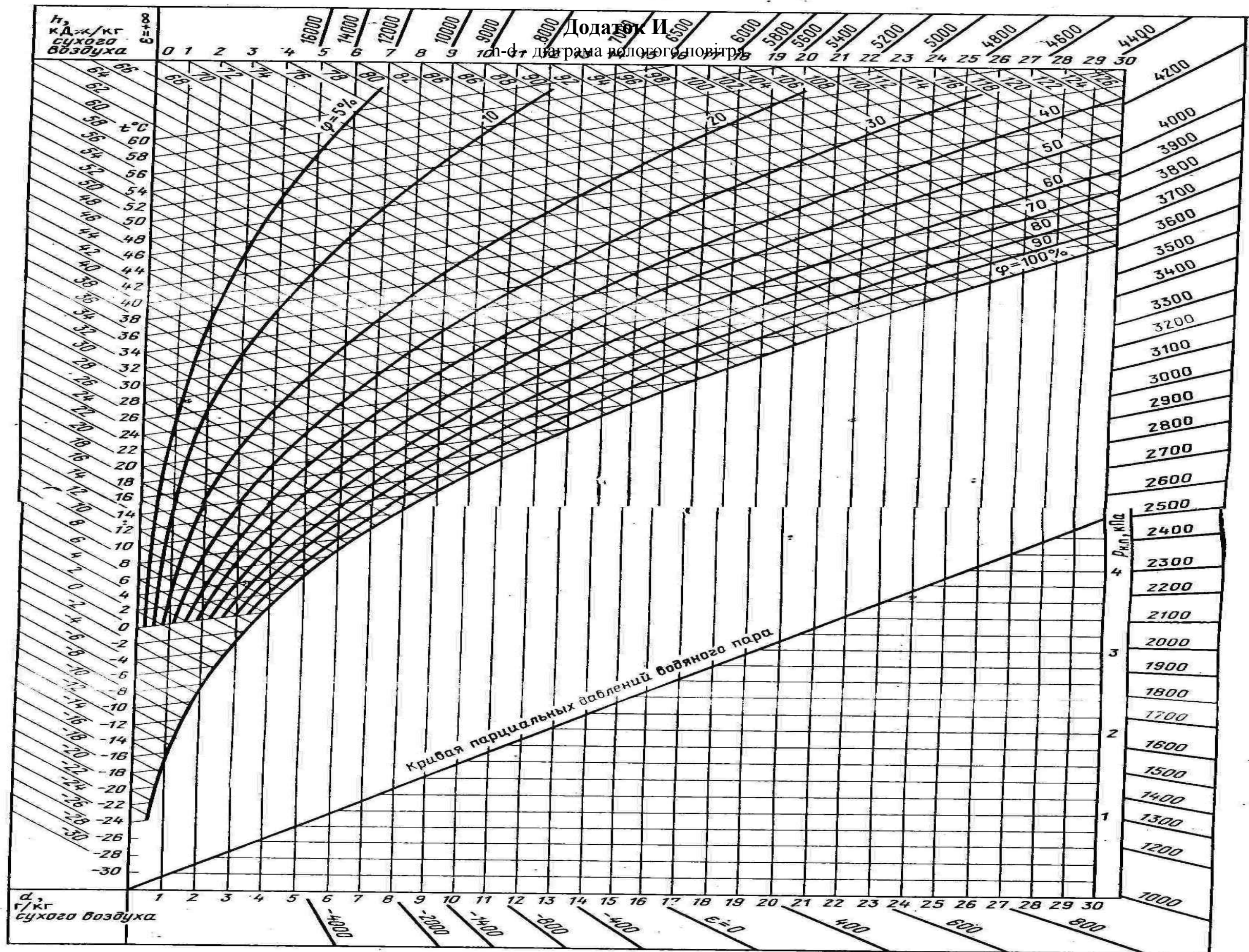
Таблиця Е.1 — Середня об'ємна теплоємність газів при постійному об'ємі

$t, ^\circ\text{C}$	$O_2$	$N_2$	$CO_2$	$H_2O$
0	0,9349	0,9236	1,2288	1,1237
100	0,9466	0,9249	1,3293	1,1342
200	0,9642	0,9286	1,4164	1,1514
300	0,9852	0,9357	1,4918	1,1715
400	1,0065	0,9454	1,5587	1,1945
500	1,0270	0,9567	1,6178	1,2188
600	1,0459	0,9692	1,6701	1,2439
700	1,0634	0,9826	1,7174	1,2703
800	1,0789	0,9960	1,7601	1,2971
900	1,0936	1,0086	1,7982	1,3247
1000	1,1066	1,0207	1,8326	1,3519
1100	1,1183	1,0325	1,8640	1,3791
1200	1,1296	1,0434	1,8929	1,4059
1300	1,1396	1,0542	1,9188	1,4319
1400	1,1493	1,0639	1,9427	1,4570
1500	1,1585	1,0731	1,9644	1,4817
1600	1,1669	1,0819	1,9845	1,5052
1700	1,1752	1,0902	2,0034	1,5286
1800	1,1832	1,0978	2,0205	1,5504
1900	1,1907	1,1049	2,0365	1,5713
2000	1,1978	1,1116	2,0511	1,5918
Примітка – Одиниці вимірювання середньої об'ємної теплоємності газів при постійному об'ємі $C'_v, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$				

Додаток Ж  
h-S - діаграма водяної пари

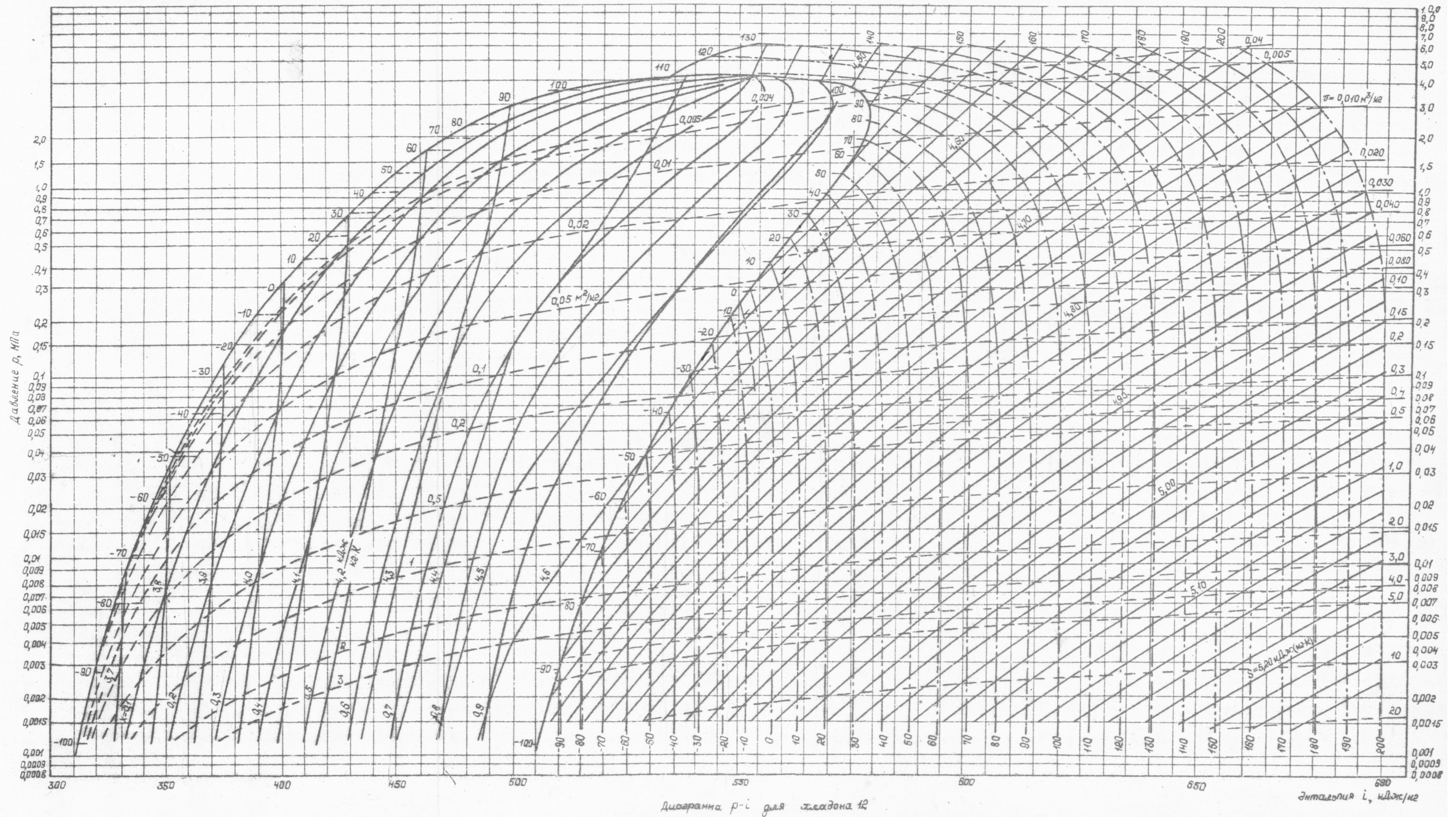








**Додаток К**  
lgP-h -діаграма холодоагенту R12



Діаграма p-i для хладагента R12