

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до проведення практичних занять та організації самостійної роботи  
з навчальної дисципліни

**«ТЕПЛОНАСОСНЕ ОБЛАДНАННЯ»**

*(для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти всіх форм  
навчання галузі знань 19 – Архітектура та будівництво зі спеціальності  
192 – Будівництво та цивільна інженерія, освітня програма «Цивільна  
інженерія»)*

Методичні рекомендації до проведення практичних занять та організації самостійної роботи з навчальної дисципліни «Теплонасосне обладнання» (для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти всіх форм навчання галузі знань 19 – Архітектура та будівництво зі спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія, освітня програма «Цивільна інженерія» / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. Ю. О. Півненко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. – 40 с.

Укладач канд. техн. наук, Ю. О. Півненко

Рецензент

**Ю. О. Бурда**, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою теплогазопостачання і вентиляції,  
протокол № 5 від 12.12.2024*

Методичні рекомендації призначені для здобувачів спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія. Подано методи розрахунків теплових насосів, теоретичні питання, практичні задачі для розв’язання, список рекомендованих джерел.

## ЗМІСТ

|                                           |                                                                                               |    |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1                                         | РОЗРАХУНОК ПАРОКОМПРЕСІЙНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА .....                                          | 5  |
| 1.1                                       | Розрахунок параметрів циклу .....                                                             | 5  |
| 1.2                                       | Побудова циклу на $p$ - $h$ діаграмі.....                                                     | 6  |
| 1.3                                       | Розрахунок параметрів теплового насоса.....                                                   | 6  |
| ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 1 .....     |                                                                                               | 7  |
| 2                                         | РОЗРАХУНОК ТЕРМОКОМПРЕСІЙНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА....                                           | 9  |
| 2.1                                       | Розрахунок параметрів циклу .....                                                             | 9  |
| 2.2                                       | Побудова циклу на $p$ - $h$ діаграмі.....                                                     | 10 |
| 2.3                                       | Розрахунок параметрів теплового насоса.....                                                   | 10 |
| ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 2 .....     |                                                                                               | 11 |
| 3                                         | РОЗРАХУНОК АБСОРБЦІЙНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА.....                                               | 13 |
| 3.1                                       | Розрахунок параметрів циклу .....                                                             | 14 |
| 3.2                                       | Побудова циклу на $p$ - $h$ діаграмі.....                                                     | 14 |
| 3.3                                       | Розрахунок параметрів теплового насоса.....                                                   | 15 |
| ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 3 .....     |                                                                                               | 15 |
| 4                                         | РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ВІДБОРУ ТЕПЛОТИ .....                                                      | 18 |
| 4.1                                       | Розробка системи відбору теплоти горизонтальними колекторними теплообмінниками.....           | 18 |
| 4.2                                       | Розробка системи відбору теплоти вертикальними теплообмінниками (зондами) у свердловинах..... | 19 |
| ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ ТЕМА 4..... |                                                                                               | 19 |
| 5                                         | ГІДРАВЛІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ТРУБОПРОВІДІВ СИСТЕМ ВІДБОРУ ТЕПЛОТИ .....                            | 22 |
| 5.1                                       | Побудова гідравлічної схеми .....                                                             | 22 |
| 5.2                                       | Гідравлічний розрахунок.....                                                                  | 23 |
| ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 5 .....     |                                                                                               | 24 |
| 6                                         | ПІДБІР ОБЛАДНАННЯ .....                                                                       | 26 |
| 6.1                                       | Компресори.....                                                                               | 26 |
| 6.2                                       | Випарники.....                                                                                | 26 |
| 6.3                                       | Конденсатори.....                                                                             | 27 |
| ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 6 .....     |                                                                                               | 27 |

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 7 РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВОГО НАСОСА ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ<br>СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ..... | 30 |
| 7.1 Розрахунок геліоколектора .....                                      | 30 |
| 7.2 Підбір теплового насоса .....                                        | 31 |
| ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 7 .....                                    | 31 |
| 8 РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ ДЛЯ РІЗНИХ СИСТЕМ<br>ТЕПЛОСПОЖИВАННЯ.....  | 34 |
| 8.1 Розрахунок теплового насоса для системи вентиляції.....              | 34 |
| 8.2 Розрахунок теплового насоса для системи повітряного опалення .....   | 34 |
| 8.3 Розрахунок теплового насоса для системи водяного опалення .....      | 35 |
| ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 8 .....                                    | 35 |
| СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ .....                                       | 38 |

# 1 РОЗРАХУНОК ПАРОКОМПРЕСІЙНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА

**Мета заняття** – ознайомлення з принципом дії парокомпресійного теплового насоса, набуття навичок розрахунку термодинамічних параметрів робочого циклу, побудови  $p$ - $h$  діаграми та визначення основних техніко-енергетичних характеристик системи.

**Теоретичні положення.** Парокомпресійний тепловий насос (ТН) – це теплова машина, яка переносить теплоту від джерела з нижчою температурою до середовища з вищою температурою за рахунок роботи компресора. Основними елементами теплового насоса є: компресор, конденсатор, дроселювальний вентиль та випарник. Процес проходить у замкненому циклі з використанням робочого тіла (холодоагенту), яке переходить із парової фази в рідку і навпаки.

Термодинамічний цикл парокомпресійного ТН складається з чотирьох основних процесів:

- 1) адіабатного стискання пари в компресорі;
- 2) ізобарної конденсації в конденсаторі;
- 3) ізентальпійного дроселювання до низького тиску;
- 4) ізобарного випаровування у випарнику.

Цикл можна зобразити на  $p$ - $h$  діаграмі (діаграмах Мольє), що дозволяє візуально аналізувати енергетичні процеси та визначати основні параметри.

## 1.1 Розрахунок параметрів циклу

На цьому етапі виконується термодинамічний аналіз чотирьох основних процесів циклу:

1. **Адіабатне стискання пари в компресорі (1–2):**
  - вихідні дані: тиск та температура пари на вході в компресор (точка 1);
  - визначається тиск на виході з компресора (точка 2) – тиск конденсації;
  - знаходяться ентальпії  $h_1$  та  $h_2$ , температура після стискання, а також питома робота компресора.
2. **Ізобарна конденсація (2–3):**
  - тепло віддається у зовнішнє середовище;
  - за постійного тиску холодоагент переходить із пари у рідкий стан;
  - визначається ентальпія  $h_3$  у разі повної конденсації.
3. **Ізентальпійне дроселювання (3–4):**
  - через дросель холодоагент зменшується до тиску випаровування ( $p_4 = p_1$ );
  - температура знижується, але ентальпія залишається сталою.

#### 4. **Ізобарне випаровування (4–1):**

– за постійного низького тиску холодоагент поглинає теплоту з навколишнього середовища та випаровується;

– визначається ентальпія  $h_1$  після повного випаровування.

Після визначення всіх ентальпій обчислюються:

– теплота, що віддається у конденсаторі;

– теплота, що поглинається у випарнику;

– холодильний коефіцієнт (коефіцієнт перетворення).

### 1.2 Побудова циклу на p-h діаграмі

Мета цього етапу – візуалізувати цикл на діаграмі Мольє (p-h) для обраного холодоагенту.

#### **Кроки побудови:**

1. Нанести чотири точки, що відповідають станам холодоагенту в кожному з процесів:

– точка 1 – вхід у компресор;

– точка 2 – вихід із компресора (сухий перегрітий пар);

– точка 3 – рідкий холодоагент після конденсатора;

– точка 4 – суміш рідини і пари після дроселювання.

2. З'єднати ці точки у відповідній послідовності, позначити процеси:

– 1–2: вертикальна лінія вправо і вгору (адіабатне стискання);

– 2–3: горизонтальна лінія вліво (ізобарна конденсація);

– 3–4: вертикальна лінія вниз (дроселювання);

– 4–1: горизонтальна лінія вправо (випаровування).

3. Оцінити положення точок щодо ізотерм і кривої насичення.

Діаграма дозволяє краще зрозуміти взаємозв'язок між процесами, виявити перегрів або недоконденсацію, а також візуально оцінити ефективність циклу.

### 1.3 Розрахунок параметрів теплового насоса

Цей розділ містить розрахунок основних характеристик теплового насоса, необхідних для техніко-економічної оцінки його роботи:

#### 1. **Холодопродуктивність ( $Q_0$ )**

$$Q_0 = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4), \quad (1.1)$$

де  $\dot{m}$  – масова витрата холодоагенту.

#### 2. **Теплова потужність ( $Q_1$ )**

$$Q_1 = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3). \quad (1.2)$$

#### 3. **Споживана потужність компресора (N)**

$$N = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1). \quad (1.3)$$

#### 4. Коефіцієнт перетворення (COP):

Для режиму тепlopостачання

$$COP_{\text{тепл.}} = \frac{Q_1}{N}. \quad (1.4)$$

Для холодильного режиму

$$COP_{\text{хол.}} = \frac{Q_0}{N}. \quad (1.5)$$

## ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 1

### Теоретичні питання

1. Що таке парокомпресійний тепловий насос і як він працює?
2. Які основні елементи входять до складу парокомпресійного теплового насоса?
3. Які фізичні процеси відбуваються на кожному етапі циклу теплового насоса (ТН)?
4. Що таке холодоагент і які його основні властивості?
5. У чому полягає різниця між ідеальним і реальним парокомпресійним циклом?
6. Яка роль компресора у циклі ТН?
7. Що відбувається у конденсаторі парокомпресійного теплового насоса?
8. Як працює дросельний вентиль і яка його функція?
9. Що таке ізоентальпійне дроселювання і чому воно важливе?
10. Як визначити ентальпії в основних точках циклу?
11. Яка фізична суть коефіцієнта перетворення (COP)?
12. Як змінюється COP зі зміною температур зовнішнього середовища?
13. Як побудувати цикл парокомпресійного теплового насоса на p-h діаграмі?
14. Чим корисна p-h діаграма для аналізу роботи теплового насоса?
15. Як впливає вибір холодоагенту на ефективність теплового насоса?
16. Що таке адіабатне стиснення і яка його роль у циклі?
17. Як розраховується теплова та холодопродуктивність ТН?
18. У чому полягають переваги та недоліки використання ТН у системах опалення?
19. Які можливі втрати енергії в реальному циклі ТН?

20. Як порівнюється ефективність теплового насоса із традиційними системами опалення?

### Задачі

1. Визначити питому роботу компресора, якщо ентальпія на вході становить 410 кДж/кг, а на виході – 460 кДж/кг.

2. Розрахувати кількість теплоти, що відводиться в конденсаторі, якщо ентальпія пари перед конденсацією 460 кДж/кг, після — 280 кДж/кг, масова витрата холодоагенту – 0,06 кг/с.

3. Визначити холодопродуктивність теплового насоса, якщо ентальпія на вході до випарника становить 280 кДж/кг, а на виході – 410 кДж/кг, витрата холодоагенту – 0,05 кг/с.

4. Побудувати цикл на  $p$ - $h$  діаграмі, якщо відомі значення ентальпії в чотирьох точках:  $h_1 = 410$  кДж/кг,  $h_2 = 460$  кДж/кг,  $h_3 = 280$  кДж/кг,  $h_4 = 280$  кДж/кг.

5. Розрахувати COP теплового насоса, якщо теплова потужність системи становить 8,1 кВт, а потужність компресора – 2,7 кВт.

6. Визначити температуру холодоагенту після дроселювання, якщо до дроселювання температура становила 40 °С; тип холодоагенту – R134a.

7. Розрахувати економію енергії за місяць (30 днів), якщо теплова потреба будинку – 60 кВт·год/добу, а COP ТП дорівнює 3.

8. Визначити масову витрату холодоагенту, якщо холодопродуктивність становить 5,2 кВт, ентальпія на вході до випарника – 410 кДж/кг, на виході – 280 кДж/кг.

9. Обрати компресор, якщо потрібно перекачувати 0,06 кг/с холодоагенту у разі питомої роботи 50 кДж/кг. Розрахувати потужність компресора.

10. Визначити тиск конденсації, якщо температура конденсації становить 35 °С, тип холодоагенту – R22 (дані взяти з таблиці).

11. Розрахувати втрати теплоти у навколишнє середовище, якщо  $COP = 3$ , теплова потужність 9 кВт.

12. Порівняти COP ТП за температури джерела теплоти +5 °С і -5 °С, якщо відома залежність  $COP = 6 - 0,2T$  ( $T$  – температура у °С).

13. Розрахувати параметри циклу для холодоагенту R407C, якщо  $t_1 = 5$  °С,  $t_2 = 70$  °С, використовуючи довідкові таблиці.

14. Визначити роботу на стискання, якщо масова витрата холодоагенту становить 0,04 кг/с, ентальпія після стиснення – 480 кДж/кг, до – 420 кДж/кг.

15. Розрахувати кількість теплоти, що передається у систему опалення за 6 годин роботи теплового насоса із потужністю 9 кВт.

16. Побудувати енергетичний баланс циклу, якщо відомі значення:  $h_1 = 410$ ,  $h_2 = 460$ ,  $h_3 = 280$ ,  $h_4 = 280$  кДж/кг,  $m = 0,05$  кг/с.

17. Нанести ізотерми та ізобари на  $p$ - $h$  діаграму для холодоагенту R134a за температури 0 °С, 5 °С, 10 °С, використовуючи таблиці насичення.

18. Розрахувати щомісячну економію електроенергії у разі заміни електронагрівача (ККД = 1) на ТН з COP = 3, якщо щомісячне споживання – 900 кВт·год.

19. Розрахувати час окупності теплового насоса, якщо його вартість – 85 000 грн, а щомісячна економія електроенергії – 1 500 грн.

20. Побудувати графік залежності COP від зовнішньої температури в діапазоні від -10 °С до +10 °С, якщо  $COP(T) = 3 + 0,1T$ .

## 2 РОЗРАХУНОК ТЕРМОКОМПРЕСІЙНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА

**Мета заняття** – ознайомлення із принципами роботи термокомпресійного теплового насоса, вивчення методики розрахунку параметрів циклу, побудови  $p$ - $h$  діаграми та розрахунку теплових характеристик установки.

**Теоретичні положення.** Термокомпресійні теплові насоси – це установки, у яких використовується пара для перенесення теплоти від джерела із нижчою температурою до середовища з вищою температурою. Компресія пари відбувається за допомогою струминного ежектора або термокомпресора. Основними етапами циклу є випаровування, стиснення, конденсація та дроселювання. Основна робоча речовина – пара рідини (часто – вода або фреон).

### 2.1 Розрахунок параметрів циклу

Розрахунок починається з вибору типу холодоагенту (часто це вода, фреон або інші робочі рідини з відомими термодинамічними властивостями). Основними розрахунковими параметрами є:

1. Тиск у випарнику  $p_{\text{вип}}$  та тиск у конденсаторі  $p_{\text{конд}}$  визначаються за температурою насичення, яку задають або беруть з умов завдання.

2. Ентальпії робочого тіла в основних точках циклу:

–  $h_1$  – ентальпія пари після випарника (вторинна пара);

–  $h_2$  – ентальпія після стискання у струминному компресорі;

- $h_3$  – ентальпія після конденсації;
- $h_4$  – ентальпія після дроселювання.

3. Питома теплота, що підводиться у випарнику

$$q_{\text{вип}} = h_1 - h_4. \quad (2.1)$$

4. Питома теплота, що відводиться у конденсаторі

$$q_{\text{конд}} = h_2 - h_3. \quad (2.2)$$

5. Питома робота компресії (у випадку термокомпресії оцінюється умовно, через співвідношення ентальпій або гідравлічну потужність насоса)

$$L = h_2 - h_1. \quad (2.3)$$

Усі значення ентальпій беруться зі статичних таблиць насичених пар або діаграм (для обраного робочого тіла).

## 2.2 Побудова циклу на p-h діаграмі

Цикл термокомпресійного ТН будується на діаграмі p-h за такими етапами:

1.  $1 \rightarrow 2$  – змішування пари з випарника із мотиваційною парою та подальше стиснення в ежекторі до тиску конденсації.
2.  $2 \rightarrow 3$  – охолодження та конденсація пари в теплообміннику (конденсаторі).
3.  $3 \rightarrow 4$  – дроселювання частини рідини до тиску випаровування (через регулюючий вентиль).
4.  $4 \rightarrow 1$  – випаровування в теплообміннику з низькопотенційним джерелом теплоти.

На діаграмі ці процеси позначаються відповідними точками. Важливо пам'ятати, що процес стиснення у термокомпресорі не є ізоентропійним, тому траєкторія переходу  $1 \rightarrow 2$  має криву форму.

## 2.3 Розрахунок параметрів теплового насоса

Після розрахунку ентальпій та визначення всіх точок циклу проводиться обчислення ключових показників теплового насоса:

- **масова витрата вторинної пари** (що випаровується з джерела)

$$\dot{m}_{\text{вип}} = \frac{q_{\text{вип}}}{h_1 - h_4}; \quad (2.3)$$

- **масова витрата мотиваційної пари** (з генератора), що визначається зі співвідношення масових витрат у струминному компресорі за умови енергетичного балансу;

- **теплова потужність, яку передає ТН у систему опалення**

$$Q_{\text{конд}} = (\dot{m}_{\text{вип}} + \dot{m}_{\text{мот}}) \cdot (h_2 - h_3); \quad (2.4)$$

– коефіцієнт перетворення (ефективності)

$$COP = \frac{Q_{\text{конд}}}{Q_{\text{мот}}}, \quad (2.5)$$

де  $Q_{\text{мот}}$  – теплова енергія, витрачена на генерацію мотиваційної пари;

– гідравлічна потужність насоса, якщо конденсат перекачується у генератор:

$$N = \frac{m_{\text{конденсат}} \cdot g \cdot H}{\eta}, \quad (2.6)$$

де  $H$  – геометрична висота,  $\eta$  – ККД насоса.

## ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 2

### Теоретичні питання

1. Що таке термокомпресійний тепловий насос, і в чому його принципова відмінність від парокомпресійного?
2. Які основні елементи входять до складу термокомпресійного теплового насоса?
3. Які термодинамічні процеси реалізуються в циклі термокомпресійного теплового насоса?
4. Що таке мотиваційна пара і яку роль вона відіграє в термокомпресійному циклі?
5. Що таке струминний (ежекторний) компресор і як він працює?
6. Як визначаються тиск і температура на різних ділянках циклу ТТН?
7. Що таке коефіцієнт перетворення (COP) теплового насоса і як його обчислити?
8. Як впливає вибір холодоагенту на роботу ТТН?
9. У чому полягає суть процесу випаровування у тепловому насосі?
10. Що таке дроселювання і яка його роль у циклі ТТН?
11. Як визначається теплова потужність теплового насоса?
12. Які основні втрати теплової енергії виникають у ТТН?
13. Чим відрізняється ізоентропійне стиснення від процесу у струминному компресорі?
14. Як побудувати цикл термокомпресійної теплового насоса на  $p$ - $h$  діаграмі?
15. У чому полягає відмінність між первинним і вторинним теплоносієм у ТТН?
16. Як впливає температура джерела низькопотенційного тепла на ефективність насоса?

17. Які переваги і недоліки має термокомпресійний тепловий насос порівняно з компресійним?
18. У яких сферах застосування доцільно використовувати ТТН?
19. Які вимоги висуваються до теплообмінників у складі термокомпресійного теплового насоса?
20. Як можна підвищити ефективність роботи термокомпресійного теплового насоса?

### Задачі

1. Необхідно визначити питому теплоту, що підводиться у випарнику, якщо тиск у випарнику становить 0,3 МПа, після дроселювання ентальпія дорівнює 450 кДж/кг, а після випаровування – 1 150 кДж/кг.
2. Визначити масову витрату вторинної пари, якщо теплова потужність випарника становить 25 кВт, ентальпія до випарника – 470 кДж/кг, а після випарника – 1 190 кДж/кг.
3. Побудувати цикл на  $p$ - $h$  діаграмі, якщо тиск у випарнику дорівнює 0,4 МПа, тиск у конденсаторі – 1,2 МПа, а ентальпії: після випарника – 1 180 кДж/кг, після стиснення – 1 450 кДж/кг, після конденсатора – 460 кДж/кг.
4. Визначити теплову потужність, що віддається в конденсаторі, якщо масова витрата пари дорівнює 0,06 кг/с, ентальпія до конденсатора – 1 420 кДж/кг, а після – 450 кДж/кг.
5. Визначити COP теплового насоса, якщо теплова потужність у конденсаторі становить 20 кВт, а теплова потужність, витрачена на генерацію мотиваційної пари – 9 кВт.
6. Визначити масову витрату мотиваційної пари, якщо теплова потужність генератора становить 15 кВт, а ентальпія мотиваційної пари – 2 780 кДж/кг.
7. Для заданої схеми термокомпресійного теплового насоса побудувати  $p$ - $h$  цикл у діаграмі та визначити: тиск у випарнику – 0,45 МПа, тиск у конденсаторі – 1,1 МПа, температури кипіння і конденсації – відповідно 120 °С і 180 °С, ентальпії у характерних точках:  $h_1 = 1 160$  кДж/кг,  $h_2 = 1 440$  кДж/кг,  $h_3 = 470$  кДж/кг,  $h_4 = 440$  кДж/кг.
8. Визначити гідравлічну потужність насоса, якщо витрата конденсату – 0,03 кг/с, висота підйому – 8 м, ККД насоса – 0,6.
9. Визначити кількість теплоти, що поглинається у випарнику, за умови, що хладагент – вода, тиск у випарнику – 0,2 МПа, температура випаровування – 105 °С, масова витрата – 0,05 кг/с.

10. Визначити загальну теплову потужність насоса, якщо масова витрата вторинної пари – 0,07 кг/с, масова витрата мотиваційної пари – 0,03 кг/с, ентальпія після стиснення – 1 440 кДж/кг, ентальпія після конденсації – 460 кДж/кг.

11. Визначити витрату теплоти на генерацію мотиваційної пари, якщо ентальпія насиченої пари на вході в ежектор – 2 760 кДж/кг, а конденсат має ентальпію 470 кДж/кг у разі витрати 0,02 кг/с.

12. Для заданого процесу побудувати цикл у координатах  $p$ - $h$  за значеннями: тиск у випарнику 0,3 МПа, тиск у конденсаторі 1,0 МПа, ентальпії:  $h_1 = 1\,155$  кДж/кг,  $h_2 = 1\,410$  кДж/кг,  $h_3 = 455$  кДж/кг,  $h_4 = 435$  кДж/кг.

13. Визначити ефективність системи термокомпресійного теплового насоса, якщо температура джерела тепла становить +35 °С, температура споживача +75 °С, теоретичний COP дорівнює 4, а фактичний – 2,8.

14. Для заданого типу хладагенту (фреон R134a) визначити теплоємність із тиском 1,1 МПа у паровій фазі та обчислити питому ентальпію за заданої температури 90 °С.

15. Обчислити зміну ентальпії під час дроселювання, якщо перед клапаном  $h_3 = 470$  кДж/кг, а після –  $h_4 = 445$  кДж/кг. Визначити втрати енергії.

16. Визначити економічний ефект від впровадження термокомпресійного теплового насоса, якщо за рік заощаджується 45 МВт·год теплової енергії, а тариф становить 1,8 грн/кВт·год, вартість насоса – 130 000 грн.

17. Визначити продуктивність насоса у кг/год, якщо він виробляє 24 кВт тепла за різниці ентальпій 980 кДж/кг.

18. Визначити температуру конденсації, якщо тиск у конденсаторі дорівнює 1,2 МПа, хладагент – вода.

19. Розрахувати об'єм пари на вході в ежектор, якщо масова витрата становить 0,08 кг/с, а питома об'ємна ентальпія – 1,4 м<sup>3</sup>/кг.

20. Визначити середній ККД системи, якщо у трьох режимах COP становив: 2,6; 3,1; 2,9. Оцінити зміну ефективності із підвищенням температури джерела на 5 °С.

### 3 РОЗРАХУНОК АБСОРБЦІЙНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА

**Мета заняття** – опанувати принцип дії й основні етапи циклу абсорбційного теплового насоса, навчитися розраховувати її термодинамічні параметри, будувати цикл на  $p$ - $h$ -діаграмі і визначати ключові енергетичні характеристики установки.

**Теоретичні положення.** Абсорбційний тепловий насос використовує пару робочого тіла (наприклад, аміак – вода чи вода – літій – бромід), яка у випарнику за низького тиску поглинає теплоту з холодного джерела. Далі під дією абсорбера і насоса-підйомника розчин збагачується робочою парою. У генераторі під час подання зовнішнього тепла ця пара відокремлюється, стикається з теплообмінниками й конденсується за високого тиску, після чого конденсат через дроселювання повертається у випарник. Учасник процесу вивчає взаємодію фаз, зміну концентрацій розчину та енергетичні потоки між випарником, абсорбером, генератором і конденсатором.

### 3.1 Розрахунок параметрів циклу

Спочатку за заданими температурами випарника та конденсатора з таблиць насиченої пари знаходять тиск низького рівня  $p_{\text{вип}}$  і тиск високого рівня  $p_{\text{конд}}$ . Далі в чотирьох характерних точках циклу визначають ентальпії:

- $h_1$  – ентальпію пари після випарника;
- $h_2$  – ентальпію суміші пари і розчину після абсорбера;
- $h_3$  – ентальпію пари після генератора до конденсатора;
- $h_4$  – ентальпію конденсату після дроселювання.

Питома теплота випаровування

$$q_{\text{вип}} = h_1 - h_4. \quad (3.1)$$

Питома теплота конденсації

$$q_{\text{конд}} = h_3 - h_2. \quad (3.2)$$

Питома теплота, подана у генератор

$$q_{\text{ген}} = h_2 - h_1. \quad (3.3)$$

На основі цих значень розраховують масові витрати розчину  $\dot{m}_p$  і холодоагенту  $\dot{m}_{\text{хл}}$  для заданих холодопродуктивності та теплової потужності.

### 3.2 Побудова циклу на p-h діаграмі

Розраховані точки циклу відкладають на діаграмі залежності тиску від ентальпії для обраного робочого тіла. Спочатку наносять точку випаровування у разі  $p_{\text{вип}}$ , потім точку абсорбції (такий самий тиск), далі точку десорбції (генерації пари) у разі  $p_{\text{конд}}$  і точку конденсації за того ж високого тиску. Між ними проводять криві процесів:

- 1 → 2 ізобарне абсорбування й підігрів розчину;
- 2 → 3 десорбція й відокремлення пари;
- 3 → 4 ізобарна конденсація;
- 4 → 1 дроселювання й випаровування.

Ця візуалізація допомагає перевірити правильність розрахунків, оцінити перегрів чи недоконденсацію та побачити втрати ентальпії на кожному етапі.

### 3.3 Розрахунок параметрів теплового насоса

Тепловий потік у випарнику

$$Q_{\text{вип}} = \dot{m}_{\text{хл}} (h_1 - h_4). \quad (3.4)$$

Тепловий потік в абсорбері

$$Q_{\text{абс}} = \dot{m}_{\text{хл}} (h_2 - h_1). \quad (3.5)$$

Тепловий потік у конденсаторі

$$Q_{\text{конд}} = \dot{m}_p (h_3 - h_2). \quad (3.6)$$

Теплова потужність генератора

$$Q_{\text{ген}} = \dot{m}_p (h_2 - h_1). \quad (3.7)$$

Коефіцієнт перетворення

$$COP = \frac{Q_{\text{конд}} + Q_{\text{абс}}}{Q_{\text{ген}}}. \quad (3.8)$$

За результатами цих розрахунків оцінюють ефективність системи, обирають потужність насосів і теплообмінників, а також встановлюють оптимальні температурно-тискові режими.

## ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 3

### Теоретичні питання

1. Що таке абсорбційний тепловий насос і в чому його принципова відмінність від компресійного?
2. Які основні компоненти входять до складу абсорбційного теплового насоса?
3. Як у абсорбційному циклі відбувається процес генерації пари у генераторі?
4. Яка роль абсорбера в абсорбційному циклі, і які фізичні процеси там відбуваються?
5. Які робочі пари найчастіше використовуються в абсорбційних теплових насосах і чому?
6. У чому полягають особливості теплового обміну між багатим і бідним розчинами?
7. Як визначаються тиск і температура насиченої пари у випарнику та конденсаторі?

8. Що таке коефіцієнт перетворення (COP) абсорбційного теплового насоса і за якою формулою він обчислюється?
9. Які основні теплові потоки потрібно врахувати у разі енергетичного балансу абсорбційного теплового насоса?
10. Як впливає концентрація робочого розчину на ефективність абсорбційного циклу?
11. Які втрати теплоти виникають в абсорбційній установці і як їх мінімізувати?
12. Як процес дроселювання впливає на роботу абсорбційного теплового насоса?
13. Чим відрізняється процес абсорбції пари від випаровування рідини?
14. Як вибір типу теплообмінника в абсорбері позначається на продуктивності насоса?
15. Який вплив має температура зовнішнього джерела тепла на COP абсорбційного насоса?
16. Що таке розкладання робочого розчину і за яких умов воно може статися?
17. Як змінюється масова витрата розчину й холодоагенту за різних режимів роботи насоса?
18. Які методи термічної регенерації застосовуються в генераторі абсорбційного циклу?
19. Як проводиться налаштування системи контролю концентрації та температури в абсорбційному контурі?
20. У яких галузях промисловості та побуті найбільш доцільно використовувати абсорбційні теплові насоси?

### **Задачі**

1. Визначити масову витрату холодоагенту у випарнику, якщо теплопродуктивність випарника становить 30 кВт, ентальпія пари на вході – 2 400 кДж/кг, а на виході – 1 800 кДж/кг.
2. Розрахувати теплову потужність генератора, якщо масова витрата багатого розчину дорівнює 0,05 кг/с, ентальпія розчину перед генератором – 300 кДж/кг, після – 1 100 кДж/кг.
3. Визначити питому теплоту конденсації, якщо тиск у конденсаторі становить 1,2 МПа, ентальпія пари до конденсації – 1 100 кДж/кг, після конденсації – 400 кДж/кг.

4. Розрахувати COP абсорбційного теплового насоса, якщо теплова потужність у конденсаторі дорівнює 25 кВт, теплова потужність у абсорбері – 10 кВт, теплова потужність генератора – 18 кВт.
5. Визначити концентрацію робочого розчину перед генератором, якщо масова частка холодоагенту в багатому розчині становить 0,55, а в бідному – 0,15.
6. Розрахувати масову витрату бідного розчину, якщо масова витрата холодоагенту у випарнику – 0,04 кг/с, а коефіцієнт абсорбції дорівнює 1,2.
7. Визначити втрати теплоти у дросельному пристрої, якщо ентальпія розчину до дроселювання дорівнює 1200 кДж/кг, після – 1 180 кДж/кг, масова витрата – 0,03 кг/с.
8. Розрахувати температуру насиченої пари у випарнику, якщо відома точка кипіння води із тиском 0,2 МПа.
9. Визначити необхідну теплову потужність підводки в абсорбері, якщо масова витрата холодоагенту становить 0,06 кг/с, ентальпія на вході – 400 кДж/кг, на виході – 1 500 кДж/кг.
10. Розрахувати питомий холодопродукт у випарнику, якщо теплова потужність становить 20 кВт та масова витрата холодоагенту – 0,05 кг/с.
11. Визначити об'єм розчину, що циркулює, якщо масова витрата багатого розчину – 0,07 кг/с, щільність розчину – 1 200 кг/м<sup>3</sup>.
12. Розрахувати потрібний перепад тиску на дросельному пристрої, якщо тиск перед ним – 1,1 МПа, а після – 0,35 МПа.
13. Визначити втрати на змішування пари і розчину в ежекторі, якщо ентальпії пари і розчину до змішування – 1 150 кДж/кг і 500 кДж/кг, а після змішування – 900 кДж/кг.
14. Розрахувати ефективність абсорбційного насоса, якщо теплова потужність у конденсаторі – 22 кВт, теплова потужність генератора – 19 кВт.
15. Визначити температуру конденсації, якщо насичена пара має тиск 1,3 МПа.
16. Розрахувати питому роботу перекачки розчину, якщо потрібен перепад висоти 10 м, масова витрата – 0,04 кг/с, ККД насоса – 0,65.
17. Визначити тепловий баланс циклу, якщо  $Q_{\text{вип}} = 28$  кВт,  $Q_{\text{конд}} = 18$  кВт,  $Q_{\text{ген}} = 22$  кВт.
18. Розрахувати зміну концентрації розчину після абсорбера, якщо на вході масова частка холодоагенту 0,2, масова витрата – 0,05 кг/с, а на виході – 0,08.
19. Визначити необхідну площу теплообмінника генератора, якщо теплова потужність 18 кВт, коефіцієнт теплопередачі – 800 Вт/м<sup>2</sup>·К, перепад температур – 20 К.

20. Розрахувати річну економію енергії у разі використання абсорбційного насоса, якщо щодня працює 8 годин і має COP = 1,2, теплова потреба – 50 кВт·год/день.

## 4 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ВІДБОРУ ТЕПЛОТИ

**Мета заняття** – опанувати методику проектування ґрунтових теплообмінників різного типу, навчитися оцінювати їхню продуктивність, визначати необхідні геометричні параметри горизонтальних колекторів і глибину розташування вертикальних зондів для забезпечення заданої теплової потужності системи.

**Теоретичні положення.** Згідно з [1] теплові пункти бувають індивідуальні (які обслуговують одного споживача) і центральні (які обслуговують групу споживачів). Якщо до теплового пункту приєднана система або системи теплоспоживання одного будинку, частини будинку або технологічна установка, то його називають – індивідуальним тепловим пунктом (ІТП). Зазвичай система теплопостачання є одноступеневою. Одноступенева схема використовується для обмеженої кількості споживачів від джерела теплопостачання із невеликою довжиною теплових мереж.

Центральні теплові пункти (ЦТП) використовують у багатоступеневих системах теплопостачання. Вони обслуговують групу споживачів.

### 4.1 Розробка системи відбору теплоти горизонтальними колекторними теплообмінниками

Проект починається з визначення необхідної річної теплової продуктивності  $Q_p$ , яку має забезпечити ґрунтовий колектор. За теплопровідністю ґрунту  $\lambda$  та диференціалом температур між носієм і ґрунтом  $\Delta T$  обчислюють питому теплову потужність одного метра контуру

$$q_{\text{гор}} = 2\pi\lambda \frac{\Delta T}{\ln(r_{\text{вп}}/r_0)}, \quad (4.1)$$

де  $r_0$  – ефективний радіус поліетиленової труби;

$r_p$  – радіус впливу тепла в ґрунті. Загальну довжину колекторів

$$L_{\text{гор}} = \frac{Q_p}{q_{\text{гор}}} \quad (4.2)$$

розподіляють у траншеях на глибині  $h$ , щоб запобігти промерзанню поверхневого шару. Відстань між паралельними контурами обирають залежно від  $\lambda$  і сезонного навантаження, зазвичай 1,0–1,5 м.

## 4.2 Розробка системи відбору теплоти вертикальними теплообмінниками (зондами) у свердловинах

Для зондів визначають тепловіддачу одного стрижня завглибшки  $H$ , використовуючи термальний опір цементного замикання  $R_{cem}$  та внутрішнього теплообмінника  $R_{int}$

$$R_{заг} = R_{int} + \frac{\ln(r_{котл}/r_0)}{2\pi\lambda} + R_{cem}. \quad (4.3)$$

Далі питома потужність зонду

$$q_{верт} = \frac{\Delta T}{R_{заг}} \quad (4.4)$$

і необхідна глибина одного зонду

$$H = \frac{Q_p}{n q_{верт}}, \quad (4.5)$$

де  $n$  – кількість зондів у полі.

Відстань між свердловинами обирають не менше за 5 м, щоб уникнути теплової інтерференції. Висоту свердловин коригують з урахуванням сезонного балансу, мінімальної температури ґрунту та гідрогеологічних обмежень.

## ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ ТЕМА 4

### Теоретичні питання

1. Що таке ґрунтовий теплообмінник і які його типи застосовують для відбору теплоти?
2. Які основні властивості ґрунту необхідно враховувати під час проєктування горизонтального колекторного теплообмінника?
3. Як впливає теплопровідність та теплоємність ґрунту на питому теплову потужність контуру?
4. Що таке радіус впливу теплового поля у ґрунті і як його визначають?
5. За якою формулою розраховують питому потужність одного метра горизонтального контуру  $q_{гор}$ ?
6. Як обрати глибину закладення труб у траншеях, щоб уникнути промерзання ґрунту?
7. Які чинники визначають відстань між паралельними горизонтальними контурами?
8. Що таке сезонний баланс теплової продуктивності і як його враховують під час розрахунку колектора?
9. Як визначають загальну довжину горизонтального колектора  $L_{гор}$  на основі необхідної потужності  $Q_p$ ?

10. У чому суть теплової інтерференції між сусідніми контурами і як її мінімізувати?
11. Які гідрогеологічні обмеження впливають на проектування горизонтального поля теплообмінників?
12. Якими формулами оцінюють сумарний термічний опір свердловинного зонду  $R_{заг}$ ?
13. Як визначають питому потужність одного вертикального зонду  $q_{верт}$  у разі відомої  $\Delta T$  і  $R_{заг}$ ?
14. За якою формулою обчислюють необхідну глибину зонду  $H$  для заданої кількості свердловин?
15. Як впливає внутрішній опір теплообміну  $R_{int}$  та опір цементного замикання  $R_{сет}$  на продуктивність зонду?
16. Які мінімальні відстані між свердловинами необхідні для уникнення теплової інтерференції?
17. Як коригувати глибину зонду з урахуванням сезонного мінімуму температури ґрунту?
18. Які ризики пов'язані з підвищенням рівня ґрунтових вод під час вертикального буріння?
19. Як проводять гідравлічний розрахунок мережі колекторів і які втрати тиску потрібно враховувати?
20. Які критерії ефективності системи відбору теплоти і як оцінюють її довгострокову стабільність?

### Задачі

1. Визначити питому теплову потужність одного метра горизонтального контуру, якщо теплопровідність ґрунту становить  $1,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , різниця температур між теплоносієм і ґрунтом дорівнює  $7 \text{ К}$ , ефективний радіус труби  $0,02 \text{ м}$ , а радіус впливу тепла у ґрунті  $0,5 \text{ м}$ .
2. Обчислити загальну довжину горизонтального колекторного поля, якщо необхідна річна теплова продуктивність становить  $25 \text{ кВт}$ , а питома потужність одного метра контуру за умовою задачі  $q_{гор} = 30 \text{ Вт/м}$ .
3. Визначити оптимальну відстань між паралельними трубопроводами у траншеї, якщо теплопровідність ґрунту  $1,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , сезонне теплове навантаження  $20 \text{ Вт/м}^2$  і глибина закладення труби  $1,2 \text{ м}$ .
4. Розрахувати загальну площу траншеї, необхідну для монтажу колектора довжиною  $400 \text{ м}$  із відстанню між контурами  $1,2 \text{ м}$ .

5. Визначити об'єм ґрунту, який потрібно вирити, якщо труба прокладається у траншеї глибиною 1,2 м і шириною 0,3 м на загальну довжину  $L = 500$  м.

6. Обчислити втрати тиску у горизонтальному колекторі довжиною 200 м, діаметром труби 32 мм, витратою теплоносія 0,03 кг/с і кинематичною в'язкістю  $1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

7. Визначити потужність насоса для циркуляції теплоносія у колекторі, якщо втрати тиску за умовою задачі 6 становлять  $\Delta p$ , витрата 0,03 кг/с і ККД насоса 0,65.

8. Розрахувати тепловий баланс горизонтального колекторного поля, якщо  $Q_{\text{потр}} = 15$  кВт, втрати у ґрунті 10 % і витрата теплоносія 0,02 кг/с.

9. Визначити радіус зони впливу теплоносія у ґрунті, якщо за 24 години відбору теплоти питома потужність контуру  $q_{\text{гор}} = 50$  Вт/м і теплопровідність ґрунту 1,0 Вт/(м·К).

10. Обчислити внутрішній опір теплообміну зонду  $R_{\text{int}}$ , якщо внутрішній діаметр труби 0,025 м, коефіцієнт теплопередачі на стінці труби 800 Вт/(м<sup>2</sup>·К), довжина зонду 100 м.

11. Визначити загальний термічний опір свердловинного зонду  $R_{\text{заг}}$ , якщо  $R_{\text{int}}$  за умовою 10 рівний, радіус цементного замикання 0,07 м, радіус труби 0,025 м, теплопровідність ґрунту 1,2 Вт/(м·К), а опір цементу  $R_{\text{cem}} = 0,05$  К·м/Вт.

12. Розрахувати питому потужність одного зонду  $q_{\text{верт}}$  за різниці температур  $\Delta T = 8$  К і загального опору  $R_{\text{заг}}$  за умовою 11.

13. Визначити необхідну глибину зонду  $H$ , якщо кількість зондів  $n = 4$ , загальна теплотужність  $Q_{\text{потр}} = 30$  кВт і питома потужність одного зонду  $q_{\text{верт}}$  за умовою 12.

14. Обчислити відстань між свердловинами в полі, якщо глибина зонду 120 м, теплопровідність ґрунту 1,3 Вт/(м·К) і щільність встановлених зондів така, що поділ відстані не менше ніж 5 м.

15. Визначити об'єм теплоносія, необхідний для заповнення всіх зондів у полі, якщо діаметр труби 32 мм, кількість зондів 6 і глибина кожного 100 м.

16. Розрахувати тепловий внесок горизонтального поля у літній період (охолодження ґрунту), якщо середня віддача за фактом  $q_{\text{гор}} = 40$  Вт/м, довжина 300 м і час роботи 6 місяців.

17. Визначити середню температуру ґрунту на глибині 1,5 м, якщо питома тепла потужність колонатора 30 Вт/м, теплопровідність ґрунту 1,4 Вт/(м·К) і радіус впливу 0,6 м.

18. Обчислити енерговитрати на циркуляцію теплоносія у зонді, якщо витрата 0,04 кг/с, втрати тиску 15 кПа, теплова потужність зонду 5 кВт, а насос працює 2 000 годин на рік.

19. Визначити зміну глибинного градієнта температури у ґрунті через 10 років експлуатації системи, якщо початковий градієнт 3 К/10 м, питома теплова потужність зонду  $q_{\text{верт}} = 60$  Вт/м, відстань до наступного зонду 7 м.

20. Розрахувати окупність системи ґрунтового теплообмінника, якщо загальна вартість монтажу 450 000 грн, щорічна економія енергії 15 МВт·год, тариф на тепло 2,0 грн/кВт·год.

## 5 ГІДРАВЛІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ТРУБОПРОВІДІВ СИСТЕМ ВІДБОРУ ТЕПЛОТИ

**Мета заняття** – навчитися будувати гідравлічну схему системи відбору теплоти та виконувати повний гідравлічний розрахунок, включно із визначенням втрат тиску та підбір насосного обладнання.

**Теоретичні положення.** Системи відбору теплоти (ґрунтові колектори або свердловинні зонди) вимагають забезпечення сталого руху теплоносія по трубопроводах. Для цього проводиться гідравлічний розрахунок, який дає змогу оцінити тиск, втрати напору та визначити параметри циркуляційного насоса.

У гідравлічному розрахунку беруть участь лінійні та місцеві втрати тиску. Лінійні втрати виникають через тертя рідини об стінки труби, а місцеві – на поворотах, звуженнях, арматурі тощо. Загальні втрати напору використовуються для визначення потужності насосного агрегату, здатного підтримувати необхідну циркуляцію.

### 5.1 Побудова гідравлічної схеми

На цьому етапі виконується побудова умовної схеми трубопровідної системи відбору теплоти (горизонтальних або вертикальних теплообмінників), у якій зазначаються всі елементи мережі – колектори, розгалуження, вузли з'єднання, ділянки труб різного діаметра, насосне обладнання та арматура. Схема повинна відображати реальну конфігурацію системи, а також напрямки руху теплоносія, витрати за кожною гілкою та розрахункові довжини. На основі цієї схеми проводиться розрахунок витрат у вузлах і тисків на ділянках трубопроводів.

## 5.2 Гідравлічний розрахунок

Гідравлічний розрахунок полягає у визначенні втрат тиску в окремих елементах трубопровідної мережі системи відбору теплоти та підборі насосного обладнання, яке забезпечує необхідну циркуляцію теплоносія. Основним параметром розрахунку є втрати напору, які складаються з лінійних та місцевих. Лінійні втрати визначаються за формулою Дарсі – Вейсбаха:

$$\Delta h_l = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (5.1)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору;

$L$  – довжина трубопроводу;

$d$  – внутрішній діаметр труби;

$v$  – швидкість потоку;

$g$  – прискорення вільного падіння.

Коефіцієнт опору  $\lambda$  залежить від режиму течії (ламінарного або турбулентного) та визначається за числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (5.2)$$

де  $\nu$  – кінематична в'язкість теплоносія.

Для турбулентного режиму використовується формула Колбрука – Уайта або емпіричні таблиці. Місцеві втрати тиску обчислюються за формулою

$$\Delta h_m = \sum \zeta_i \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (5.2)$$

де  $\zeta_i$  – коефіцієнти місцевого опору на ділянках з арматурою, вигинами, трійниками тощо.

Загальні втрати напору в системі

$$\Delta H = \Delta h_l + \Delta h_m. \quad (5.3)$$

На підставі знайдених втрат тиску визначається необхідна потужність циркуляційного насоса

$$N = \frac{\rho \cdot g \cdot \Delta H \cdot Q}{\eta}, \quad (5.4)$$

де  $\rho$  – густина теплоносія,

$Q$  – об'ємна витрата,

$\eta$  – ККД насоса.

## ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 5

### Теоретичні питання

1. Що таке гідравлічна схема системи відбору теплоти і які її основні елементи?
2. У чому полягає мета гідравлічного розрахунку трубопроводів?
3. Які втрати тиску враховуються під час гідравлічного розрахунку?
4. Що таке лінійні втрати тиску і від чого вони залежать?
5. Як впливає довжина та діаметр труби на лінійні втрати тиску?
6. Як розраховується коефіцієнт гідравлічного опору  $\lambda$ ?
7. Що таке число Рейнольдса і яку роль воно відіграє в розрахунках?
8. Які режими течії визначаються за значенням числа Рейнольдса?
9. Як впливає в'язкість теплоносія на гідравлічні втрати?
10. Які формули використовуються для визначення місцевих втрат тиску?
11. Що таке коефіцієнти місцевого опору і як вони визначаються?
12. Які типові місцеві опори існують у системах тепловідбору?
13. Як обчислити загальні втрати тиску в системі?
14. Як визначити необхідну потужність циркуляційного насоса?
15. Які характеристики теплоносія необхідно знати для розрахунку?
16. Як впливає швидкість потоку на втрати тиску в трубопроводі?
17. Які вимоги до підбору діаметра труб для систем тепловідбору?
18. У чому полягає різниця між відкритими і закритими гідравлічними системами?
19. Які помилки найчастіше допускаються під час гідравлічного розрахунку?
20. Як впливає конфігурація трубопровідної мережі на ефективність роботи теплового насоса?

### Задачі

1. Визначити лінійні втрати тиску в сталевій трубі довжиною 60 м та діаметром 32 мм, якщо швидкість теплоносія становить 0,8 м/с, кінематична в'язкість –  $1,2 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.
2. Розрахувати загальні втрати тиску в системі, що складається з труби довжиною 40 м, діаметром 25 мм зі швидкістю потоку 0,6 м/с, якщо відомо, що місцеві опори дорівнюють 3,5.
3. Знайти число Рейнольдса для потоку води у трубі діаметром 20 мм зі швидкістю 1,1 м/с і кінематичною в'язкістю  $1 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

4. Визначити тип потоку (ламінальний чи турбулентний) у трубі діаметром 40 мм за умови, що швидкість потоку становить 0,9 м/с, а в'язкість –  $1,1 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .
5. Розрахувати місцеві втрати тиску у системі з трьома поворотами ( $\zeta = 0,5$  кожен) та вентилям ( $\zeta = 1,2$ ), якщо швидкість потоку 0,7 м/с.
6. Визначити необхідну потужність насоса для переміщення води зі щільністю  $998 \text{ кг/м}^3$  у разі об'ємної витрати 0,4 л/с, загальних втрат напору 8,5 м та ККД насоса 65 %.
7. Обчислити довжину труби, за якої втрати тиску становитимуть 5 м водяного стовпа, якщо швидкість 0,85 м/с, діаметр 25 мм, коефіцієнт опору 0,032.
8. Розрахувати загальні втрати тиску для горизонтального колектора довжиною 80 м, діаметром 32 мм, із трьома колінами та двома з'єднаннями.
9. Знайти швидкість потоку, якщо число Рейнольдса має бути 4 000, діаметр труби 25 мм, в'язкість  $1,1 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .
10. Визначити втрати тиску на ділянці труби довжиною 50 м, якщо потік має швидкість 1,2 м/с, діаметр 20 мм,  $\lambda = 0,04$ .
11. Розрахувати ККД насоса, якщо щільність води  $997 \text{ кг/м}^3$ , напір 12 м, об'ємна витрата  $0,0006 \text{ м}^3/\text{с}$ , а потужність споживання 90 Вт.
12. Обчислити швидкість потоку в трубі діаметром 40 мм, якщо об'ємна витрата становить  $0,002 \text{ м}^3/\text{с}$ .
13. Визначити загальні втрати тиску в системі з трубою довжиною 100 м, діаметром 50 мм, із шістьма місцевими опорами загальним  $\zeta = 3$ .
14. Обчислити питомі втрати тиску в трубі діаметром 25 мм на 1 м довжини зі швидкістю потоку 0,9 м/с,  $\lambda = 0,03$ .
15. Визначити потужність насоса для системи з трубопроводом довжиною 90 м, діаметром 32 мм, втратами напору 10,5 м, витратою  $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$ , ККД насоса 0,6.
16. Розрахувати втрати тиску на одному коліні ( $\zeta = 0,7$ ), якщо швидкість потоку 1 м/с.
17. Визначити, яка швидкість потоку допустима в трубі діаметром 20 мм для турбулентного режиму, якщо  $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .
18. Знайти витрати об'єму у трубі діаметром 50 мм зі швидкістю 1,4 м/с.
19. Розрахувати загальні втрати тиску, якщо лінійні втрати становлять 6,2 м, а місцеві – 2,4 м.
20. Визначити, наскільки зміняться втрати тиску зі збільшенням швидкості вдвічі, якщо інші параметри залишаються незмінними.

## 6 ПІДБІР ОБЛАДНАННЯ

**Мета заняття** – ознайомити студентів із принципами підбору основного обладнання теплових насосів – компресорів, випарників і конденсаторів. Навчити обґрунтовано вибирати обладнання залежно від теплових навантажень, параметрів циклу та умов експлуатації.

**Теоретичні положення.** Тепловий насос – це термодинамічна система, що передає тепло від низькотемпературного джерела до високотемпературного споживача за допомогою робочого тіла, яке циркулює у замкненому циклі. Основні елементи, які забезпечують роботу циклу: компресор, випарник, конденсатор.

### 6.1 Компресори

Компресор – основний енергоспоживач теплового насоса, який забезпечує стиснення пари холодоагенту до високого тиску. У разі підбору компресора враховують такі параметри: масову витрату холодоагенту, ступінь стиснення, продуктивність за об'ємом, потужність споживання, ККД.

Потужність компресора розраховується за такою формулою:

$$N = \frac{G \cdot (h_2 - h_1)}{\eta}, \quad (6.1)$$

де  $G$  – масова витрата холодоагенту;

$h_2, h_1$  – ентальпія холодоагенту на виході і вході відповідно;

$\eta$  – ККД компресора.

Вибір типу компресора (поршневого, спірального, гвинтового) залежить від масштабів установки та вимог до надійності, шуму, обслуговування.

### 6.2 Випарники

Випарник – теплообмінник, у якому холодоагент кипить, поглинаючи тепло з джерела низької температури (наприклад, ґрунту чи повітря). Вибір випарника ґрунтується на необхідній тепловій потужності, температурі кипіння, площі теплообміну, типі теплоносія.

Теплова потужність випарника визначається так:

$$Q = G \cdot (h_1 - h_4), \quad (6.2)$$

де  $Q$  – теплова потужність;

$h_1, h_4$  – ентальпії холодоагенту до і після випарника;

$G$  – масова витрата.

Важливі параметри під час вибору – тип теплоносія, ступінь перегріву пари, гідравлічні характеристики та розміри пристрою.

### 6.3 Конденсатори

Конденсатор – теплообмінник, у якому холодоагент віддає тепло воді або повітрю, конденсуючись за високого тиску. Він має забезпечити ефективну тепловіддачу, щоб передати тепло споживачу (нагрів приміщення, води тощо).

Розрахунок теплової потужності, аналогічний випарнику

$$Q = G \cdot (h_2 - h_3), \quad (6.3)$$

де  $h_2, h_3$  – ентальпія пари до та після конденсації.

Під час вибору враховують матеріали теплообмінника, температурний перепад, умови охолодження (повітряне чи водяне), площу теплообміну та допустимий тиск.

## ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 6

### Теоретичні питання

1. Що таке тепловий насос і які його основні компоненти?
2. Яке функціональне призначення компресора у складі теплового насоса?
3. За якими основними параметрами здійснюється підбір компресора?
4. У чому полягає різниця між поршневим, гвинтовим і спіральним компресорами?
5. Як впливає ступінь стиснення на енергоефективність компресора?
6. Якими є основні критерії вибору випарника для теплового насоса?
7. Який процес відбувається у випарнику і як він впливає на цикл?
8. Що таке площа теплообміну і як вона впливає на ефективність випарника?
9. Чому важливо враховувати ступінь перегріву пари на виході з випарника?
10. Якими характеристиками визначається ефективність роботи конденсатора?
11. У чому відмінність між повітряним і водяним охолодженням у конденсаторах?
12. Як визначається теплова потужність випарника та конденсатора?
13. Чому необхідно враховувати втрати тиску в теплообмінному обладнанні?
14. Як впливає тип холодоагенту на підбір компресора і теплообмінників?

15. Що таке ентальпія та як вона використовується під час розрахунків обладнання?

16. Як змінюється теплова потужність обладнання зі зміною температурного перепаду?

17. Чому важливо враховувати коефіцієнт теплопередачі під час вибору випарника і конденсатора?

18. Які конструктивні особливості компресорів визначають їх придатність до певних умов експлуатації?

19. Як впливає швидкість потоку теплоносія на роботу теплообмінного обладнання?

20. Які заходи підвищення ефективності можна застосувати під час вибору або експлуатації компресора, випарника та конденсатора?

### Задачі

1. Розрахуйте необхідну потужність компресора, якщо масова витрата холодоагенту становить 0,025 кг/с, ентальпія на вході 210 кДж/кг, на виході 410 кДж/кг, а ККД компресора – 0,8.

2. Підберіть тип компресора для теплового насоса із тепловою потужністю 12 кВт, який працює із тисками 0,3 МПа і 1,8 МПа, з використанням холодоагенту R-134a.

3. Визначте теплову потужність випарника, якщо масова витрата холодоагенту дорівнює 0,03 кг/с, ентальпія на вході 190 кДж/кг, на виході 390 кДж/кг.

4. Розрахуйте площу теплообміну випарника, якщо необхідно передати 10 кВт тепла за середнього температурного перепаду 5 °C і коефіцієнта теплопередачі 550 Вт/м<sup>2</sup>·K.

5. Визначте ентальпію на вході у компресор, якщо на виході 430 кДж/кг, потужність компресора 5 кВт, витрата холодоагенту 0,02 кг/с, ККД 0,75.

6. Для теплового насоса із тепловим навантаженням 15 кВт підберіть випарник, який працює з водою температури 5–10 °C і холодоагентом R-407C.

7. Порівняйте два варіанти компресорів (поршневий і гвинтовий) за критеріями енергоефективності, спрацьованості та вартості для установки потужністю 18 кВт.

8. Визначте кількість теплоти, яка передається у конденсаторі, якщо ентальпія на вході 460 кДж/кг, на виході 240 кДж/кг, масова витрата 0,03 кг/с.

9. Розрахуйте необхідну площу теплообміну конденсатора, якщо передається 14 кВт тепла, коефіцієнт теплопередачі  $600 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ , температурний перепад  $6^\circ\text{С}$ .

10. Підберіть тип конденсатора (повітряний чи водяний), якщо система встановлена у регіоні з літніми температурами повітря до  $35^\circ\text{С}$ , з урахуванням потреб у ГВП (гарячому водопостачанні).

11. Визначте, за якого тиску працюватиме компресор, якщо ступінь стиснення 6, а вхідний тиск –  $0,25 \text{ МПа}$ .

12. Для заданої схеми теплового насоса потрібно підібрати компресор, що працює з холодоагентом R-410A, з урахуванням ентальпій  $430 \text{ кДж/кг}$  та  $220 \text{ кДж/кг}$  і витрати  $0,015 \text{ кг/с}$ .

13. Обчисліть потужність, яку повинен передати випарник, якщо холодоагент кипить за температури  $5^\circ\text{С}$  і отримує тепло від води з температурою  $10^\circ\text{С}$ , витрата холодоагенту  $0,04 \text{ кг/с}$ , ентальпії  $190 \text{ кДж/кг}$  і  $390 \text{ кДж/кг}$ .

14. Оцініть вплив зменшення температурного перепаду в конденсаторі з  $8^\circ\text{С}$  до  $4^\circ\text{С}$  на необхідну площу теплообміну, якщо теплова потужність  $12 \text{ кВт}$  і коефіцієнт теплопередачі  $500 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ .

15. Визначте теплове навантаження на випарник, якщо система забезпечує охолодження з температурою на вході теплоносія  $15^\circ\text{С}$ , на виході  $10^\circ\text{С}$ , витрата теплоносія  $0,1 \text{ кг/с}$ , теплоємність  $4,2 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$ .

16. Підберіть компресор для установки, яка має працювати безперервно протягом року з тепловим навантаженням  $8 \text{ кВт}$  і холодоагентом R-290.

17. Розрахуйте втрати тиску в конденсаторі за витрати  $0,05 \text{ кг/с}$ , якщо довжина каналу  $5 \text{ м}$ , діаметр  $8 \text{ мм}$ , динамічна в'язкість  $0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , щільність  $1200 \text{ кг/м}^3$ .

18. Для заданої площі теплообміну  $1,2 \text{ м}^2$  і теплової потужності  $9 \text{ кВт}$  визначте середній температурний перепад у випарнику із коефіцієнтом теплопередачі  $400 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ .

19. Визначте необхідну продуктивність компресора у  $\text{м}^3/\text{год}$ , якщо витрата холодоагенту  $0,03 \text{ кг/с}$ , щільність пари на вході  $5 \text{ кг/м}^3$ .

20. Для випарника, який працює з холодоагентом R-32, визначте температуру кипіння, якщо тиск у випарнику становить  $0,6 \text{ МПа}$ .

## 7 РОЗРАХУНОК ТЕПЛООВОГО НАСОСА ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

**Мета заняття** – ознайомлення з принципами використання сонячної енергії для живлення теплових насосів. Формування навичок розрахунку параметрів геліоколектора та підбору теплового насоса для конкретних умов. Аналіз ефективності інтегрованої системи та розуміння факторів, що впливають на її продуктивність.

**Теоретичні положення.** Сонячна енергія є одним з найперспективніших джерел відновлюваної енергії. Її можна ефективно використовувати у комбінації з тепловими насосами, особливо в системах опалення та гарячого водопостачання. Геліоколектори – це пристрої, що перетворюють сонячну радіацію на теплову енергію, яку можна використовувати як джерело низькопотенційного тепла для випарника теплового насоса. Ефективність такої системи залежить від площі колектора, орієнтації, кліматичних умов та параметрів самого теплового насоса.

### 7.1 Розрахунок геліоколектора

На цьому етапі здійснюється підбір площі геліоколектора відповідно до сонячної радіації, середньої температури навколишнього середовища, необхідної кількості теплоти для системи. Використовується така формула:

$$Q = G \cdot A \cdot \eta, \quad (7.1)$$

де  $Q$  – кількість корисної теплоти, що передається теплоносію, Вт;

$G$  – середня щільність сонячної радіації, Вт/м<sup>2</sup>;

$A$  – площа геліоколектора, м<sup>2</sup>;

$\eta$  – ефективність колектора (враховуючи втрати).

Необхідно врахувати також тип геліоколектора (плоский, вакуумний тощо), температуру робочого теплоносія, тепловтрати, час інсоляції на день і сезонні зміни.

Здійснюється вибір теплоносія (вода, гліколь тощо) і визначення кількості теплоти, яку він може перенести з урахуванням температурного перепаду

$$Q = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T, \quad (7.2)$$

де  $\dot{m}$  – масова витрата теплоносія, кг/с;

$c$  – теплоємність, кДж/кг·К;

$\Delta T$  – температурний перепад, К.

## 7.2 Підбір теплового насоса

Після розрахунку кількості теплоти, яку може надати геліосистема, підбирається тепловий насос з урахуванням таких параметрів: теплова потужність, тип холодоагенту, температура на вході/виході, коефіцієнт перетворення (COP), електрична потужність компресора.

Розрахунок теплової потужності виконується за такою формулою:

$$Q_{\text{тепл}} = Q_{\text{сонячне}} + Q_{\text{електр}}, \quad (7.3)$$

де  $Q_{\text{тепл}}$  – загальна теплова потужність системи;

$Q_{\text{сонячне}}$  – теплота від геліосистеми;

$Q_{\text{електр}}$  – теплота, отримана за рахунок роботи компресора.

Також розраховується коефіцієнт перетворення

$$COP = \frac{Q_{\text{тепл}}}{W}, \quad (7.4)$$

де  $W$  – електрична потужність компресора.

З урахуванням розрахунків здійснюється підбір типу теплового насоса (повітря – вода, вода – вода, ґрунт – вода), який найкраще підходить до умов об'єкта. Також враховуються умови монтажу, наявність джерел низькопотенційної енергії, сезонність використання.

## ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 7

### Теоретичне питання

1. Що таке геліосистема та з яких основних елементів вона складається?
2. Який принцип роботи теплового насоса під час використання сонячної енергії?
3. Які типи геліоколекторів існують і в чому їх відмінність?
4. Як визначається ефективність геліоколектора?
5. Які фактори впливають на продуктивність сонячного колектора?
6. Як визначається необхідна площа геліоколектора для системи опалення?
7. Чим відрізняється вакуумний геліоколектор від плоского?
8. Яку роль відіграє теплоносій у геліосистемі, і які рідини найчастіше використовуються?
9. Як впливає кут нахилу геліоколектора на ефективність його роботи?

10. Які переваги має система теплопостачання з комбінованим використанням теплового насоса і геліоколектора?
11. Що таке COP (коефіцієнт перетворення) і як він визначається для теплового насоса?
12. Які чинники зменшують ефективність теплового насоса у системі з геліосонячним джерелом?
13. Як змінюється робота теплового насоса за нестачі сонячної радіації?
14. Чому важливо враховувати сезонність сонячного випромінювання під час проєктування системи?
15. Як визначити необхідну теплову потужність теплового насоса для системи з геліоколектором?
16. Які режими роботи можливі для систем із сонячними колекторами і тепловими насосами?
17. Як впливає температура зовнішнього повітря на продуктивність системи?
18. Яке значення має гідравлічний баланс системи під час інтеграції геліоколектора з тепловим насосом?
19. Які способи зберігання надлишкової сонячної енергії існують у таких системах?
20. Які нормативні документи або стандарти регулюють використання сонячної енергії в теплотехнічних системах?

### Задачі

1. Визначити корисну теплову енергію, яку може отримати геліоколектор площею  $12 \text{ м}^2$ , якщо середня щільність сонячної радіації становить  $620 \text{ Вт/м}^2$ , а ККД колектора – 72%.
2. Розрахувати необхідну площу геліоколектора для нагріву 180 літрів води з  $15^\circ\text{C}$  до  $55^\circ\text{C}$  за 4 години за середньої інсоляції  $500 \text{ Вт/м}^2$  і ККД 70 %.
3. Визначити добовий тепловий приріст від геліосистеми, якщо середня щільність сонячної радіації  $650 \text{ Вт/м}^2$ , площа колектора  $8 \text{ м}^2$ , ефективність – 0,68, тривалість інсоляції – 5,5 год.
4. Розрахувати теплову потужність теплового насоса, якщо температура джерела (геліоколектор)  $30^\circ\text{C}$ , температура споживача  $55^\circ\text{C}$ , COP дорівнює 4,2, споживана потужність компресора 1,5 кВт.
5. Підібрати геліоколектор для забезпечення 9 кВт теплової енергії протягом сонячного дня тривалістю 6 годин за інсоляції  $580 \text{ Вт/м}^2$  та ККД 75 %.

6. Визначити масову витрату теплоносія (води), якщо потужність геліоколектора 6 кВт, перепад температури 12 °С, теплоємність води 4,18 кДж/кг·К.

7. Розрахувати COP системи, якщо тепловий насос виробляє 10 кВт теплоти, а споживає 2,4 кВт електроенергії.

8. Визначити температуру на виході з геліоколектора, якщо вхідна температура 18 °С, площа 5 м<sup>2</sup>,  $G = 600 \text{ Вт/м}^2$ , ККД = 0,72, витрата води – 0,1 кг/с.

9. Визначити загальну кількість теплоти, яку можна отримати за 3 дні експлуатації геліоколектора площею 10 м<sup>2</sup> за середньої інсоляції 550 Вт/м<sup>2</sup>, ефективності 70% і 6 годинах роботи на добу.

10. Розрахувати економію електроенергії, якщо геліосистема покриває 60 % потреб теплового насоса потужністю 12 кВт, що працює 8 годин на добу, COP = 3,5.

11. Визначити, на скільки потрібно збільшити площу геліоколектора, якщо ККД зменшується з 75 % до 60 %, щоб отримати ту ж кількість теплоти.

12. Визначити продуктивність геліосистеми, якщо у системі використовується гліколь із теплоємністю 3,6 кДж/кг·К, витрата 0,08 кг/с, перепад температур 10 °С.

13. Розрахувати кількість сонячної енергії, що поглинається за 7 годин експлуатації геліосистеми площею 6 м<sup>2</sup> у разі  $G = 650 \text{ Вт/м}^2$  та ККД = 0,74.

14. Визначити кількість теплоти, яку потрібно зберегти в акумуляційному баку об'ємом 300 літрів, щоб підтримати температуру 55 °С за початкової температури води 20 °С.

15. Визначити необхідну теплову потужність теплового насоса, якщо в будівлі потрібна теплова енергія 18 МДж на добу, а геліосистема забезпечує 9 МДж.

16. Оцінити добову витрату електроенергії компресора, якщо тепловий насос виробляє 10 кВт теплоти, COP = 4, працює 6 годин на добу.

17. Визначити температуру теплоносія на виході з теплового насоса, якщо на вході температура 30 °С, а COP = 3,5, електроспоживання – 2 кВт.

18. Визначити кількість води, яку можна нагріти з 20 °С до 60 °С за рахунок геліоколектора потужністю 4 кВт за 2 години.

19. Визначити теплову потужність комбінованої системи, якщо геліосистема забезпечує 4,5 кВт, а тепловий насос – 6 кВт.

20. Визначити необхідну потужність теплового насоса для підтримання температури 45 °С у приміщенні площею 90 м<sup>2</sup> з тепловтратами 70 Вт/м<sup>2</sup>, якщо геліоколектор покриває 40 % потреб.

## 8 РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ ДЛЯ РІЗНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОСПОЖИВАННЯ

**Мета заняття** – ознайомити студентів з особливостями роботи та розрахунку теплових насосів для систем вентиляції, повітряного та водяного опалення; навчити виконувати інженерні розрахунки параметрів насосів з урахуванням специфіки кожного типу теплоспоживання.

**Теоретичні положення.** Теплові насоси можуть застосовуватись у різних системах теплоспоживання, таких як вентиляція, повітряне та водяне опалення. Кожна з цих систем має власні вимоги до температури, потужності та режимів роботи. У системах вентиляції головним завданням є підігрів припливного повітря до заданої температури. У повітряному опаленні теплоносієм є повітря, яке циркулює по приміщеннях, у той час як у водяному опаленні зазвичай використовується гаряча вода з температурою 35–55 °С. Вибір типу теплового насоса та його параметрів залежить від температурного графіка, теплових навантажень і характеристик будівлі.

### 8.1 Розрахунок теплового насоса для системи вентиляції

Під час розрахунку теплового насоса для вентиляції враховується об'єм припливного повітря, його початкова температура, а також температура, до якої його потрібно нагріти. Розраховується теплова потужність за такою формулою:

$$Q = G \cdot c_p \cdot (t_1 - t_2), \quad (8.1)$$

де  $Q$  – теплова потужність (Вт);

$G$  – масова витрата повітря (кг/с);

$c_p$  – теплоємність повітря ( $\approx 1,005$  кДж/кг·К);

$t_2$  і  $t_1$  – температура після і до нагріву відповідно.

Після цього визначається необхідна потужність теплового насоса та COP системи. Важливо враховувати, що через обмежену температуру подачі повітря (до 40 °С) теплові насоси мають працювати з високим COP, і частіше використовуються повітряні або повітряно-водяні типи.

### 8.2 Розрахунок теплового насоса для системи повітряного опалення

У повітряному опаленні тепло передається через нагріте повітря, яке циркулює через повітроводи. Потужність системи визначається за аналогічною формулою, але з урахуванням об'єму повітря і частоти його оновлення. Додатково визначається температура на виході з теплообмінника та враховується ККД вентиляційних каналів. Теплові насоси повинні забезпечувати достатній перепад температури за мінімальних витрат енергії.

Для цього важливо підібрати насос з оптимальним режимом роботи, що дозволить працювати без частого перемикання циклів.

### 8.3 Розрахунок теплового насоса для системи водяного опалення

Цей тип системи передбачає подачу гарячої води у радіатори або теплу підлогу. Розрахунок потужності насоса виконується за такою формулою:

$$Q = G \cdot c_p \cdot (t_1 - t_2), \quad (8.2)$$

де  $G$  – витрата води;

$c_p$  – теплоємність води (4,18 кДж/кг·К);

$t_1$  і  $t_2$  – температури подачі та звороту.

Зазвичай температура води у системах із тепловими насосами не перевищує 55 °С. Для систем з теплою підлогою – ще менше (близько 35–45 °С). Тому теплові насоси мають високу ефективність у таких умовах, особливо під час використання низькотемпературного джерела тепла. COP для таких систем може досягати 4–5 у разі правильного проєктування.

## ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 8

### Теоретичні питання

1. Які основні типи систем теплоспоживання застосовуються із тепловими насосами?
2. У чому полягає різниця між повітряним і водяним опаленням у контексті роботи теплового насоса?
3. Які переваги використання теплового насоса у системах вентиляції?
4. Які параметри необхідно знати для розрахунку потужності теплового насоса у системі повітряного опалення?
5. Як впливає температура зовнішнього повітря на ефективність теплового насоса?
6. Що таке COP і як його використовують у розрахунках теплових насосів?
7. Як розраховується теплова потужність, необхідна для підігріву повітря у вентиляційній системі?
8. Яким чином тепловий насос взаємодіє з вентиляційною установкою?
9. Як визначити витрату повітря для системи повітряного опалення?
10. Які температурні графіки характерні для системи водяного опалення з тепловим насосом?

11. Які є обмеження температури подачі теплоносія у системах повітряного та водяного опалення у разі використання ТН?
12. Як підвищення температури подачі впливає на ефективність теплового насоса?
13. Які типи теплових насосів найчастіше використовують для вентиляції та чому?
14. Як враховується ККД вентиляційної системи під час проектування системи з тепловим насосом?
15. Чому системи водяного опалення є більш енергоефективними під час використання теплового насоса?
16. Які вимоги до теплоізоляції будівлі важливі для ефективної роботи теплового насоса?
17. Як підібрати оптимальний тип теплового насоса для різних систем теплоспоживання?
18. Як впливає інерційність повітряного і водяного теплоносія на розрахунок системи?
19. Чим відрізняються режими роботи теплового насоса в опалювальний і перехідний періоди?
20. Які додаткові пристрої можуть підвищити ефективність роботи теплового насоса у системах повітряного опалення та вентиляції?

### **Задачі**

1. Для вентиляційної системи будівлі необхідно підігріти 500 м<sup>3</sup>/год повітря з температури -5 °С до +18 °С. Визначити необхідну теплову потужність теплового насоса.
2. У повітряному опаленні житлового будинку подається 800 м<sup>3</sup>/год повітря, яке необхідно нагріти з +2 °С до +22 °С. Знайти теплове навантаження системи.
3. Визначити COP теплового насоса для вентиляції, якщо теплова потужність 6 кВт, а електрична споживана потужність становить 1,8 кВт.
4. Для водяного опалення офісу потрібно забезпечити теплову потужність 10 кВт. Температура подачі – 45 °С, звороту – 35 °С. Визначити витрату води у системі.
5. Тепловий насос для повітряного опалення споживає 2,4 кВт електроенергії й забезпечує 9 кВт теплової енергії. Визначити ефективність установки.
6. Розрахувати необхідну масову витрату повітря у вентиляційній системі, якщо теплова потужність – 4,5 кВт, температура нагріву – із -10 °С до +20 °С.

7. У водяному опаленні для промислового об'єкта подається 2,5 м<sup>3</sup>/год води. Температура подачі – 50 °С, звороту – 40 °С. Обчислити теплову потужність системи.

8. Для вентиляційної системи школи потрібно забезпечити підігрів 1 000 м<sup>3</sup>/год повітря з -7 °С до +16 °С. Визначити необхідну потужність теплового насоса.

9. У повітряному опаленні офісу тепла потужність становить 8 кВт, температура повітря підвищується з +5 °С до +25 °С. Визначити об'ємну витрату повітря.

10. Визначити температуру на виході з системи вентиляції, якщо тепла потужність – 3 кВт, масова витрата повітря – 0,3 кг/с, початкова температура – -3 °С.

11. Тепловий насос системи водяного опалення споживає 1,8 кВт електроенергії і має COP 3,5. Визначити теплову потужність установки.

12. У повітряному опаленні необхідно нагріти 900 м<sup>3</sup>/год повітря з -2 °С до +19 °С. Визначити теплове навантаження системи.

13. Для житлового будинку встановлено тепловий насос водяного типу. Визначити витрату води, якщо температура подачі – 40 °С, звороту – 30 °С, тепла потужність – 7 кВт.

14. Визначити, скільки електроенергії споживає тепловий насос за добу, якщо тепла потужність становить 10 кВт, а COP – 4.

15. Визначити температуру зворотної води у системі водяного опалення, якщо подача має 50 °С, витрата – 1,5 м<sup>3</sup>/год, а тепла потужність – 15 кВт.

16. Розрахувати COP теплового насоса, який забезпечує 12 кВт теплової енергії і споживає 3,6 кВт електричної.

17. У вентиляційній системі потрібно підігріти 650 м<sup>3</sup>/год повітря з -8 °С до +17 °С. Знайти необхідну потужність теплового насоса.

18. Визначити масову витрату повітря, якщо тепла потужність системи вентиляції становить 5 кВт, а температура повітря підвищується з -10 °С до +15 °С.

19. Тепловий насос забезпечує систему повітряного опалення з тепловим навантаженням 7,2 кВт. COP становить 3,6. Визначити електричну потужність компресора.

20. Визначити об'ємну витрату повітря в системі вентиляції, якщо тепла потужність – 6,5 кВт, а температура повітря підвищується з -5 °С до +20 °С.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Lear W. E. Design Considerations of Jet Pumps with Supersonic Two – Phase Flow and Shocks for Refrigeration and Thermal Management Application / W. E. Lear, S. A. Sherf, J. M. Steadham // International Journal of Energy Research. – 2000. – Vol. 24. – P. 1373–1389.
2. Kandil S. M. Analysis of two-phase supersonic flow in jet pumps. Proceedings of FEDSM 2005 (2005 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting and Exhibition June 1932) / S. M. Kandil, W. E. Lear, S. A. Sherif. – Houston, TX, USA, 2005.
3. Groll E. A. Transcritical CO<sub>2</sub> refrigeration cycle with ejector – expansion device / E. A. Groll // International Journal, of Refrigeration. – 2005. – Vol. 28. – P. 766–773.
4. Bulinski Z. Comparison of heterogenous and homogenous models of two-phase transonic compressible CO<sub>2</sub> flow through a heat pump ejector / Z. Bulinski, J. Smolka, A. Fic, K. Banasiak and A. A. Nowak // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2010. – Vol. 10. – P. 1–9. – DOI:10.1088/1757-899X(10)1/012019.
5. Zhang Z. Effect of Suction Nozzle Pressure Drop on the Performance of an Ejector-Expansion Transcritical CO<sub>2</sub> Refrigeration Cycle / Z. Zhang, L. Titan // Entropy. – 2014. – Vol. 16. – P. 4309–4321.
6. Остапенко О. П. Холодильна техніка та холодильна технологія. Теплові насоси : конспект лекцій / О. П. Остапенко. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 62 с.
7. Ткаченко С. Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання: монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 176 с.
8. Безродний М. К. Ефективність теплонасосних систем опалення з використанням теплоти попередньо підігрітого атмосферного повітря / М. К. Безродний, Н. О. Притула // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – № 5 (8). – С. 24–28.
9. Бугай В. С. Техніко-економічний аналіз режимів відпуску теплової енергії для опалення від гібридного джерела теплоти «котел – тепловий насос» / В. С. Бугай, С. Л. Ліберман // Науковий вісник будівництва. – 2017. – Т. 88, № 2. – С. 207–212.
10. Калініченко А. В. Ефективність використання теплового насосу типу «повітря-вода» у системах теплопостачання. / А. В. Калініченко, В. М. Калініченко // Технічні науки, Вісник Полтавської державної аграрної академії. – 2011. – № 1. – С. 158–162.

11. Zlateva P. Experimental study of heat pump type air-water for heating system performance / P. Zlateva, K. Yordanov // E3S Web Conf. TE-RE-RD. – 2019. – Vol. 112. – P. 10–18.
12. Xinhui Zhao. Experimental Study on Heating Performance of Air – source Heat Pump with Water Tank for Thermal Energy Storage / Xinhui Zhao, Enshen Long, Yin Zhang, Qinjian Liu, Zhenghao Jin, Fei Liang // Procedia Engineering 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC 2017, 19–22 October 2017, Jinan, China. – 2017. – Vol. 205. – P. 3027–3034.
13. Босий М. В. Тепловий насос з використанням низькопотенційного джерела теплоти повітря / М. В. Босий // Наукові записи : зб. наук. пр. – Кіровоград : КНТУ, 2014. – Вип. 16. – С. 3–7.
14. Кулінко Є. О. Теплові насоси як джерела низькотемпературного теплопостачання / Є. О. Кулінко, І. Т. Кузицький, О. Г. Погосов // Energy-efficiency in civil engineering and architecture. – 2017. – № 9. – С. 132–136.
15. Калініченко А. В. Ефективність використання теплового насосу типу «повітря-вода» у системах теплопостачання / А. В. Калініченко, В. М. Калініченко // Технічні науки, Вісник Полтавської державної аграрної академії. – 2011. – № 1. – С. 158–162.
16. Яковчук П. Є. Тепловий насос як елемент енергозбереження / П. Є. Яковчук, В. Б. Цяпа, В. І. Комаров, Б. І. Крохмальний // Вісн. Нац. ун-ту «Львів. Політехніка». – 2008. – № 615. – С. 194–198.

*Електронне навчальне видання*

Методичні рекомендації

до проведення практичних занять та самостійної роботи  
з навчальної дисципліни

**«ТЕПЛОНАСОСНЕ ОБЛАДНАННЯ»**

*(для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти всіх форм  
навчання зі спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія,  
галузі знань 19 – Архітектура та будівництво,  
освітня програма «Цивільна інженерія»)*

Укладач **ПІВНЕНКО** Юрій Олександрович

Відповідальний за випуск *Ю. О. Півненко*

*Редактор Б. О. Хільська*

Комп'ютерне верстання *Ю. О. Півненко*

План 2025, поз. 524М

---

Підп.до друку 04.08.2025. Формат 60 × 84/16.

Ум. друк. арк. 2,3.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Чорноглазівська (Маршала Бажанова), 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: office@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.