

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

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

О. В. Гвоздецький, І. О. Редько

СПЕЦІАЛЬНІ НАУКОВІ ПИТАННЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

(для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності G19 – Будівництво та цивільна інженерія галузі знань G – Інженерія, виробництво та будівництво, освітня програма «Будівництво та цивільна інженерія»)

**Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2026**

УДК 624:697.34](076.6)

Гвоздецький О. В. Спеціальні наукові питання теплопостачання : конспект лекцій для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності G19 – Будівництво та цивільна інженерія галузі знань G – Інженерія, виробництво та будівництво, освітня програма «Будівництво та цивільна інженерія» / О. В. Гвоздецький, І. О. Редько ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. – 151 с.

Автори:

канд. техн. наук, доц. О. В. Гвоздецький,
д-р техн. наук, проф. І. О. Редько

Рецензент

О. М. Міланко, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова)

*Рекомендовано кафедрою теплогазопостачання і вентиляції,
протокол № 4 від 15.09.2025*

© О. В. Гвоздецький, І. О. Редько, 2026
© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ТА КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ.....	9
1.1 Система теплопостачання як складна технічна система.....	9
1.2 Принципи системного підходу в аналізі систем теплопостачання.....	12
1.3 Класифікація методів аналізу систем теплопостачання	14
1.4 Комплексний (багатокритеріальний) аналіз систем теплопостачання..	16
Питання для самоконтролю.....	18
2 ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ ТА ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЕЛЕМЕНТІВ І СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ.....	19
2.1 Термодинамічні основи аналізу систем теплопостачання.....	19
2.2 Методи термодинамічного аналізу елементів систем теплопостачання	20
2.3 Ексергетичний аналіз та оцінювання втрат ексергії.....	22
2.4 Порівняльна оцінка ефективності систем за енергетичними та ексергетичними показниками.....	23
Питання для самоконтролю.....	25
3 ГІДРАВЛІЧНИЙ І ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ.....	26
3.1 Основи гідравлічного аналізу теплових мереж.....	26
3.2 Методи розрахунку гідравлічних режимів теплових мереж	27
3.3 Теплогідравлічний аналіз теплових мереж	30
3.4 Застосування гідравлічного та теплогідравлічного аналізу для оптимізації роботи мереж.....	31
Питання для самоконтролю.....	33
4 МЕТОДИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ	34
4.1 Математичні моделі систем теплопостачання	34
4.2 Ідентифікація параметрів і верифікація моделей.....	35
4.3 Методи оптимізації систем теплопостачання	36
4.4 Застосування математичного моделювання та оптимізації в наукових дослідженнях	37
Питання для самоконтролю.....	39

5 СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ЧЕТВЕРТОГО ТА П'ЯТОГО ПОКОЛІНЬ (4GDH, 5GDH)	40
5.1 Еволюція та концепції систем теплопостачання 4GDH і 5GDH.....	40
5.2 Принципи функціонування та технологічні рішення.....	42
5.3 Переваги та виклики впровадження 4GDH і 5GDH	44
5.4 Європейський і світовий досвід та перспективи розвитку	47
Питання для самоконтролю	48
6 ІНТЕГРАЦІЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ	49
6.1 Технологічні рішення інтеграції ВДЕ в централізовані та децентралізовані системи теплопостачання	49
6.1.1 Сонячні теплові колектори.....	49
6.1.2 Теплові насоси	50
6.1.3 Біоенергетичні установки.....	50
6.1.4 Геотермальні джерела.....	51
6.1.5 Основні підходи до інтеграції ВДЕ.....	51
6.2 Моделювання, оптимізація та управління системами теплопостачання з високою часткою ВДЕ.....	52
6.3 Акумулювання теплової енергії	54
6.4 Економічна, екологічна та нормативна оцінка впровадження ВДЕ в системи теплопостачання	57
Питання для самоконтролю	60
7 ТЕПЛОВІ НАСОСИ ТА ГІБРИДНІ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ	61
7.1 Класифікація теплових насосів та джерела низькопотенційної теплоти	61
7.2 Показники енергетичної та сезонної ефективності теплових насосів...	64
7.3 Принципи побудови гібридних систем теплопостачання на основі теплових насосів.....	67
7.4 Інтеграція теплових насосів з традиційними та відновлюваними джерелами тепла.....	70
Питання для самоконтролю.....	72
8 СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ	73
8.1 Короткотривале та довготривале теплове акумулювання	73
8.2 Фазозмінні матеріали (PCM) у системах акумулювання тепла	76
8.3 Підземні та сезонні акумулятори теплової енергії	80
Питання для самоконтролю	83

9 ЦИФРОВІЗАЦІЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОПОСТАЧААННЯМ	84
9.1 Smart Heat Grids як кіберфізичні системи теплопостачання	84
9.2 Автоматизовані та інтелектуальні системи керування теплопостачанням.....	86
9.3 Цифрові двійники та штучний інтелект у теплопостачанні	90
Питання для самоконтролю	93
10 ІНТЕГРАЦІЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧААННЯ В МУЛЬТИЕНЕРГЕТИЧНІ ТА СЕКТОРНО-ЗВ'ЯЗАНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ.....	95
10.1 Концептуальні підходи та архітектура секторно-зв'язаних енергетичних систем	95
10.2 Технології Power-to-Heat та гнучкість систем теплопостачання.	96
10.3 Моделювання, оптимізація та оцінка ефективності інтегрованих енергетичних систем	98
Питання для самоконтролю	99
11 МОДЕРНІЗАЦІЯ ТА РЕКОНСТРУКЦІЯ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧААННЯ.....	100
11.1 Технологічні рішення модернізації джерел тепла та теплових мереж....	100
11.2 Стратегії реконструкції, економічна ефективність та управління переходом.....	103
Питання для самоконтролю	106
12 ЗНИЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ВТРАТ У СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧААННЯ..	107
12.1 Сучасні теплоізоляційні матеріали та конструктивні рішення теплових мереж.....	107
12.2 Безканалні тепломережі та низькотемпературні режими теплопостачання	110
12.3 Методи діагностики, моніторингу та інтелектуального управління тепловими втратами	113
Питання для самоконтролю.....	116
13 ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧААННЯ..	117
13.1 Регулювання теплових навантажень у системах теплопостачання ...	117
13.2 Погодозалежне керування та інтелектуальні алгоритми управління теплопостачанням.....	119
13.3 Балансування теплових мереж та оптимізація гідравлічних режимів	120
Питання для самоконтролю.....	122

14 ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ	124
14.1 Зменшення шкідливих викидів у системах теплопостачання	124
14.2 Впровадження чистих та низьковуглецевих технологій теплопостачання	126
14.3 Екологічні критерії та методи оцінювання систем теплопостачання	127
Питання для самоконтролю.....	129
15 АДАПТАЦІЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ДО ЗМІН КЛІМАТУ ТА КОЛИВАНЬ ПОПИТУ	131
15.1 Адаптація систем теплопостачання до змін клімату та екстремальних умов.....	131
15.2 Залучення споживачів та розвиток індивідуального регулювання теплопостачання	132
15.3 Розвиток децентралізованих та локальних систем теплопостачання	134
Питання для самоконтролю.....	136
16 ЕКОНОМІЧНІ ТА ОРГАНІЗАЦІЙНІ АСПЕКТИ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ	137
16.1 Економічна ефективність та фінансові механізми модернізації систем теплопостачання	137
16.2 Організаційні моделі управління та регулювання розвитку систем теплопостачання	138
16.3 Управління проєктами модернізації та ризиками в системах теплопостачання	140
Питання для самоконтролю.....	142
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ	144

ВСТУП

Дисципліна «Спеціальні наукові питання з теплопостачання» належить до циклу професійної підготовки здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти та спрямована на формування системного наукового бачення сучасних і перспективних проблем теплопостачання. Вона орієнтована на поглиблення теоретичних знань, розвиток аналітичних і дослідницьких компетентностей, а також на підготовку здобувачів до самостійної наукової та інженерної діяльності.

Сучасні системи теплопостачання функціонують в умовах енергетичного переходу, декарбонізації, цифровізації та зростаючих вимог до енергоефективності й екологічної безпеки. Це потребує застосування міждисциплінарних методів аналізу, впровадження інноваційних технологій, інтеграції відновлюваних і вторинних джерел енергії, а також оптимізації режимів роботи на основі сучасних інформаційних та математичних інструментів.

У межах дисципліни розглядаються:

- фундаментальні методи аналізу систем теплопостачання як складних ієрархічних технічних систем;
- новітні технологічні рішення (4GDH, 5GDH, теплові насоси, акумулювання тепла, цифрові мережі);
- практичні напрями удосконалення існуючих систем з урахуванням технічних, екологічних та економічних чинників.

Особлива увага приділяється термодинамічному, ексергетичному, гідравлічному та оптимізаційному підходам, а також оцінюванню ефективності систем на основі багатокритеріального аналізу. Дисципліна формує методологічну базу для виконання дисертаційних досліджень у галузі теплопостачання, енергетичних систем та енергоефективних технологій.

У результаті вивчення освітнього компоненту здобувач повинен:

- ЗНАТИ: теоретичні основи функціонування та розвитку систем теплопостачання, сучасні методи їх аналізу, моделювання й оптимізації; принципи побудови, модернізації та інтеграції систем теплопостачання з відновлюваними й вторинними джерелами енергії, а також вимоги до енергоефективності та екологічної безпеки; сучасні технічні, економічні та нормативні підходи до оцінювання ефективності, надійності й сталого розвитку систем теплопостачання;

– ВМІТИ: аналізувати та моделювати складні системи теплопостачання; обґрунтовувати технічні та наукові рішення в умовах невизначеності; розробляти та оцінювати інноваційні проєкти з позицій енергоефективності, екологічної доцільності та економічної ефективності.

Вивчення дисципліни формує у здобувачів цілісне наукове бачення сучасних систем теплопостачання як складних техніко-економічних та екологічних об'єктів. Набуті знання та компетентності є теоретичною й методологічною основою для виконання дисертаційних досліджень, розроблення інноваційних рішень і практичної діяльності у сфері сталого розвитку теплопостачання.

1 СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ТА КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

1.1 Система теплопостачання як складна технічна система

Система теплопостачання – це сукупність взаємопов’язаних технічних засобів, процесів і організаційних рішень, призначених для виробництва, транспортування, розподілу та використання теплової енергії з метою забезпечення опалення, вентиляції, гарячого водопостачання та технологічних потреб споживачів.

З позицій системного підходу система теплопостачання належить до складних технічних систем, оскільки:

- складається з великої кількості різнорідних елементів;
- має ієрархічну структуру;
- функціонує в умовах змінних зовнішніх і внутрішніх впливів;
- характеризується наявністю прямих і зворотних функціональних зв’язків;
- вимагає автоматизованого керування та регулювання.

1. Елементи системи теплопостачання.

Елементи системи теплопостачання умовно поділяють на кілька функціональних груп.

1. Джерела теплової енергії.

До джерел тепла належать установки, в яких відбувається виробництво теплової енергії:

- котельні (газові, твердопаливні, електричні);
- теплоелектроцентралі (ТЕЦ);
- теплові насоси;
- установки з використанням відновлюваних джерел енергії (сонячні колектори, біомаса, геотермальна енергія).

2. Системи транспортування тепла.

Призначені для передачі теплової енергії від джерела до споживачів:

- магістральні теплові мережі (подавальні та зворотні трубопроводи);
- розподільні теплові мережі (подавальні та зворотні трубопроводи).

3. Деталі, вузли та обладнання теплових мереж:

- вузли теплофікаційні, компенсатори, опори;
- циркуляційні насоси;
- теплообмінні апарати.

3. Розподільні та регулювальні елементи.

Забезпечують розподіл і регулювання теплових потоків:

- центральні, індивідуальні та квартирні теплові пункти (ЦТП, ІТП, КТП);
- запірні та регулююча арматура;
- системи автоматичного регулювання.

4. Системи споживання тепла.

Безпосередньо використовують теплову енергію:

- системи опалення;
- системи гарячого водопостачання;
- системи вентиляції та кондиціювання;
- технологічні теплові споживачі.

5. Системи керування, контролю та обліку.

Забезпечують ефективну та безпечну роботу системи:

- датчики температури, тиску, витрати;
- контролери та регулятори;
- прилади обліку;
- диспетчерські та BMS/SCADA-системи.

2. Структура системи теплопостачання.

Система теплопостачання має ієрархічну структуру, що включає кілька рівнів:

- 1) верхній рівень – джерела теплової енергії та системи загального керування;
- 2) середній рівень – теплові мережі, теплові пункти, насосні станції;
- 3) нижній рівень – внутрішні системи будівель та кінцеві теплові прилади.

Відповідно до ДБН «Теплові мережі», залежно від джерела теплопостачання розрізняють:

- централізовані системи теплопостачання;
- децентралізовані та автономні системи.

За можливістю приготування гарячої води системи теплопостачання можуть бути відкритими або закритими.

За видом теплоносія розрізняють на водяні та парові.

За кількістю трубопроводів бувають:

- однотрубні;
- двотрубні;
- тритрубні;
- чотирьох трубні;

- багатотрубні.

3. Функціональні зв'язки в системі теплопостачання.

Функціональні зв'язки визначають взаємодію між елементами системи та забезпечують її цілісність.

1. Енергетичні зв'язки.

Відображають передачу теплової енергії:

- від джерела тепла до споживача;
- між окремими підсистемами.

2. Матеріальні зв'язки.

Пов'язані з рухом теплоносія в системі.

3. Інформаційні зв'язки.

Забезпечують керування та контроль:

- передача сигналів від датчиків;
- зворотний зв'язок для регулювання температури, тиску та витрати;
- диспетчерське управління.

4. Керуючі зв'язки.

Формуються системами автоматизації:

- регулювання потужності джерела тепла;
- погодозалежне керування;
- оптимізація режимів роботи.

4. Межі системи теплопостачання.

Межі системи визначають, які елементи належать до системи, а які – до зовнішнього середовища.

1. Просторові межі.

Охоплюють:

- джерело тепла;
- теплові мережі;
- теплові пункти;
- внутрішні системи будівель до теплових приладів включно.

2. Функціональні межі.

Обмежують:

- процес виробництва теплової енергії;
- транспортування;
- розподіл;
- споживання тепла.

3. Інформаційні та керуючі межі.

Включають:

- системи обліку теплової енергії;

- системи автоматизації та диспетчеризації.

Зовнішнім середовищем для системи теплопостачання є:

- кліматичні умови;
- споживачі як об'єкти з випадковими тепловими навантаженнями;
- енергетичні та паливні ресурси;
- нормативно-правові та економічні фактори.

1.2 Принципи системного підходу в аналізі систем теплопостачання

Системний підхід – це методологія дослідження складних об'єктів, яка розглядає систему теплопостачання як цілісне утворення з множиною взаємопов'язаних елементів, що функціонують для досягнення спільної мети – надійного, ефективного та економічно доцільного забезпечення споживачів тепловою енергією.

Застосування системного підходу є особливо важливим для систем теплопостачання, оскільки вони характеризуються складною структурою, просторовою розгалуженістю, змінними режимами роботи та значним впливом зовнішнього середовища. Основними принципами системного підходу є цілісність, ієрархічність, взаємодія підсистем та багатокритеріальність.

1. Принцип цілісності.

Цілісність означає розгляд системи теплопостачання як єдиного функціонального об'єкта, властивості якого не зводяться до простої суми властивостей окремих елементів.

У системі теплопостачання:

- ефективність роботи залежить від узгодженості всіх складових – джерела тепла, мереж, теплових пунктів і споживачів;
- зміна параметрів одного елемента (наприклад, температурного графіка джерела) впливає на режими роботи всієї системи;
- з'являються емерджентні властивості, такі як загальна надійність, енергоефективність та стійкість до аварій.

При аналізі системи з позицій цілісності враховують:

- тепловий та гідравлічний баланс системи в цілому;
- сумарні втрати теплової енергії;
- узгодження режимів генерації, транспортування та споживання тепла.

2. Принцип ієрархічності.

Ієрархічність відображає структурованість системи теплопостачання за рівнями організації та керування. Кожен рівень виконує визначені функції та має власні параметри регулювання.

У межах цього принципу:

- система поділяється на окремі рівні (виробництво тепла, транспорт, розподіл, споживання);
- керування реалізується від локального (на рівні обладнання) до централізованого (на рівні системи в цілому);
- складні задачі аналізу спрощуються шляхом декомпозиції.

Ієрархічний підхід дозволяє ефективно застосовувати автоматизовані системи керування та забезпечувати узгодженість дій між різними елементами системи.

3. Взаємодія підсистем.

Принцип взаємодії підсистем базується на визнанні того, що жодна частина системи теплопостачання не функціонує ізольовано. Між підсистемами постійно відбувається обмін енергією, речовиною та інформацією.

У процесі аналізу враховують:

- залежність параметрів теплоносія від стану мережі та режимів споживання;
- вплив автоматичного регулювання в одній підсистемі на роботу інших;
- можливість виникнення небажаних ефектів через порушення узгодженості взаємодії.

Ефективність теплопостачання значною мірою визначається якістю цих взаємозв'язків, а не лише технічними характеристиками окремих вузлів.

4. Багатокритеріальність аналізу та рішень.

Багатокритеріальність означає необхідність одночасного врахування кількох показників під час оцінювання та оптимізації систем теплопостачання. На практиці це пов'язано з тим, що система має відповідати різним, часто суперечливим вимогам.

До основних критеріїв належать:

- мінімізація енергетичних і паливних витрат;
- зниження капітальних та експлуатаційних затрат;
- забезпечення надійності та безперервності теплопостачання;
- відповідність екологічним нормам;
- підтримання нормативного теплового комфорту.

Системний підхід не передбачає оптимізації лише за одним показником, а спрямований на пошук збалансованого рішення з урахуванням усієї сукупності критеріїв.

1.3 Класифікація методів аналізу систем теплопостачання

Аналіз систем теплопостачання здійснюється з використанням різних методів, які відрізняються рівнем деталізації, точністю, трудомісткістю та сферою застосування. Вибір методу залежить від мети дослідження, стадії проектування або експлуатації системи, а також від доступності вихідних даних. Основні методи аналізу поділяють на аналітичні, чисельні, експериментальні, імітаційні та статистичні.

1. Аналітичні методи.

Аналітичні методи ґрунтуються на використанні математичних залежностей, отриманих на основі фізичних законів теплопередачі, гідравліки та термодинаміки. Вони дозволяють отримати розрахункові формули для визначення параметрів системи в загальному вигляді.

Ці методи застосовують:

- на ранніх етапах проектування;
- для оцінки впливу окремих параметрів на роботу системи;
- для отримання узагальнених закономірностей.

Обмеженням аналітичних методів є необхідність спрощення реальної системи, що знижує точність для складних або нелінійних режимів роботи.

2. Чисельні методи.

Чисельні методи передбачають розв'язання систем рівнянь за допомогою обчислювальних алгоритмів. Вони дозволяють аналізувати складні системи теплопостачання з урахуванням реальної геометрії, змінних навантажень і нелінійних характеристик обладнання.

Основні сфери застосування:

- теплогідравлічні розрахунки розгалужених мереж;
- аналіз нестаціонарних режимів;
- оптимізація параметрів системи.

Чисельні методи потребують значних обчислювальних ресурсів, але забезпечують вищу точність порівняно з аналітичними підходами.

3. Експериментальні методи

Експериментальні методи базуються на безпосередніх вимірюваннях параметрів системи теплопостачання в реальних або лабораторних умовах. Вони дозволяють отримати достовірні дані про фактичну роботу системи.

Застосовуються для:

- перевірки правильності розрахункових моделей;
- дослідження нових технічних рішень;
- налагодження та випробування обладнання.

Недоліком є висока вартість і обмежені можливості масштабування результатів.

4. Імітаційні методи.

Імітаційні методи полягають у створенні моделей, що відтворюють поведінку системи теплопостачання в часі при різних сценаріях експлуатації. На відміну від суто чисельних методів, вони дозволяють аналізувати динаміку процесів і взаємодію багатьох факторів одночасно.

Ці методи ефективні для:

- оцінки роботи системи при змінних кліматичних умовах;
- аналізу аварійних або перехідних режимів;
- дослідження впливу стратегій керування.

Імітаційні моделі широко застосовуються при цифровому проєктуванні та оптимізації режимів експлуатації.

5. Статистичні методи.

Статистичні методи використовують результати експлуатаційних спостережень і масиви даних для виявлення закономірностей у роботі систем теплопостачання. Вони ґрунтуються на методах математичної статистики та аналізу даних.

Основні напрями застосування:

- аналіз споживання теплової енергії;
- прогнозування теплових навантажень;
- оцінка надійності та виявлення відхилень у роботі системи.

Статистичні методи є особливо актуальними для енергоаудиту та впровадження систем інтелектуального керування.

6. Термодинамічний та ексергетичний аналіз.

Термодинамічний аналіз ґрунтується на законах термодинаміки та спрямований на оцінювання енергетичних процесів у системі теплопостачання. Він дозволяє визначити теплові потоки, енергетичні баланси та ефективність перетворення енергії в окремих елементах і системі загалом.

Основні завдання термодинамічного аналізу:

- складання енергетичних балансів джерел тепла, теплових мереж і споживачів;
- визначення коефіцієнтів корисної дії установок;
- оцінка втрат теплової енергії при транспортуванні та перетворенні;
- аналіз впливу режимів роботи на енергетичну ефективність системи.

Обмеженням термодинамічного підходу є те, що він не враховує якість енергії та незворотні втрати, пов'язані з реальними процесами.

Ексергетичний аналіз є розвитком термодинамічного підходу та базується на другому законі термодинаміки. Його мета – оцінювання корисної частини енергії (ексергії) та втрат, пов’язаних із незворотностю процесів.

Ексергетичний аналіз дозволяє:

- виявляти основні джерела термодинамічних втрат у системі теплопостачання;
- порівнювати ефективність різних технологічних рішень;
- обґрунтовувати доцільність використання низькопотенційних джерел тепла;
- підвищувати загальну ефективність системи завдяки оптимальному розподілу температурних рівнів.

Особливе значення ексергетичний аналіз має при оцінці сучасних систем теплопостачання з тепловими насосами, відновлюваними джерелами енергії та низькотемпературними мережами.

1.4 Комплексний (багатокритеріальний) аналіз систем теплопостачання

Комплексний аналіз систем теплопостачання застосовується для обґрунтування інженерних рішень в умовах зростання вимог до енергоефективності, економічної доцільності та екологічної безпеки. На відміну від однокритеріального підходу, він базується на одночасному врахуванні кількох груп показників, що дозволяє отримати збалансовану оцінку ефективності системи протягом усього життєвого циклу.

1. Загальні положення комплексного аналізу.

Комплексний підхід передбачає формування набору критеріїв, нормування їх значень та подальше порівняння альтернативних варіантів теплопостачання. При цьому аналіз охоплює не лише технічні параметри, а й експлуатаційні, фінансові та природоохоронні аспекти.

Основною метою є вибір такого варіанта системи, який забезпечує оптимальне співвідношення між ефективністю використання енергоресурсів, економічними витратами та мінімальним негативним впливом на довкілля.

2. Енергетичні критерії.

Енергетична складова комплексного аналізу характеризує здатність системи теплопостачання ефективно перетворювати, транспортувати та використовувати теплову енергію.

До ключових енергетичних показників належать:

- питомі витрати первинної енергії;
- коефіцієнти перетворення та сезонна ефективність;
- рівень теплових і гідравлічних втрат;

- відповідність температурних режимів фактичним потребам споживачів.

Ці критерії дозволяють оцінити раціональність енергетичних рішень і потенціал енергозбереження.

3. Економічні критерії.

Економічна оцінка спрямована на визначення фінансової доцільності впровадження та експлуатації системи тепlopостачання. Вона враховує як початкові інвестиції, так і довгострокові витрати.

Основні економічні показники:

- капітальні витрати на обладнання та монтаж;
- експлуатаційні витрати (паливо, електроенергія, обслуговування);
- термін окупності;
- приведені або дисконтовані витрати за період експлуатації.

Економічний аналіз дозволяє зіставляти альтернативні технічні рішення з урахуванням їх реальної вартості у часі.

4. Екологічні критерії.

Екологічна складова комплексного аналізу відображає вплив системи тепlopостачання на навколишнє середовище. Вона набуває особливої ваги в умовах жорсткіших екологічних норм та політики декарбонізації.

До екологічних критеріїв належать:

- обсяги викидів парникових газів;
- рівень локального забруднення повітря;
- споживання невідновлюваних ресурсів;
- екологічні ризики протягом життєвого циклу системи.

Ці показники дозволяють оцінити сталість і відповідність системи принципам сталого розвитку.

5. Узгодження критеріїв та ухвалення рішень

Оскільки енергетичні, економічні та екологічні критерії часто суперечать один одному, комплексний аналіз передбачає застосування методів узгодження та компромісного вибору. У результаті формується інтегральна оцінка ефективності системи тепlopостачання, яка відображає її загальну доцільність.

Такий підхід дозволяє:

- обґрунтовувати стратегічні рішення з модернізації тепlopостачання;
- порівнювати традиційні та інноваційні системи;
- забезпечувати баланс між технічною ефективністю, економічною вигодою та екологічною відповідальністю.

Питання для самоконтролю

1. Чому система теплопостачання розглядається як складна технічна система та які її основні елементи й межі з позицій системного аналізу?
2. У чому полягає сутність системного підходу при аналізі систем теплопостачання та як проявляються принципи цілісності, ієрархічності й взаємодії підсистем?
3. Які методи аналізу застосовуються для дослідження систем теплопостачання та в яких випадках доцільно використовувати аналітичні, чисельні, експериментальні, імітаційні й статистичні підходи?
4. Яку роль відіграють термодинамічний та ексергетичний аналізи в оцінюванні ефективності систем теплопостачання та чим вони відрізняються між собою?
5. У чому полягає суть комплексного (багатокритеріального) аналізу систем теплопостачання та як узгоджуються енергетичні, економічні й екологічні критерії при виборі оптимального рішення?
6. Як вибір методу аналізу системи теплопостачання залежить від стадії її життєвого циклу (проектування, експлуатація, модернізація)?
7. Як автоматизація, системи диспетчеризації та цифрове моделювання підвищують ефективність аналізу й керування сучасними системами теплопостачання?

2 ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ ТА ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЕЛЕМЕНТІВ І СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

2.1 Термодинамічні основи аналізу систем теплопостачання

Термодинамічний аналіз є фундаментом дослідження процесів виробництва, передачі та використання теплової енергії в системах теплопостачання. Він дозволяє встановити кількісні взаємозв'язки між тепловими потоками, роботою, станом теплоносія та ефективністю функціонування окремих елементів і системи в цілому. Базою такого аналізу є перший і другий закони термодинаміки, які визначають можливості та обмеження теплових процесів.

Перший закон термодинаміки відображає закон збереження енергії та встановлює баланс між підведеною, відведеною і накопиченою енергією. У системах теплопостачання він застосовується для опису перетворень енергії в котлах, теплообмінниках, трубопроводах та теплових приладах.

З позицій першого закону:

- теплова енергія, що надходить у систему, розподіляється між корисно використаною частиною, втратами та зміною внутрішньої енергії;
- для усталених режимів зміна запасу енергії дорівнює нулю, що спрощує аналіз;
- для нестационарних режимів враховується акумулювання тепла в теплоносії та конструкціях.

Застосування першого закону дозволяє оцінювати енергетичну ефективність елементів і системи загалом.

Другий закон термодинаміки визначає напрямок протікання теплових процесів і встановлює принципову неможливість повного перетворення теплової енергії в корисну роботу. У системах теплопостачання він пояснює виникнення втрат, пов'язаних із незворотністю реальних процесів.

З практичної точки зору другий закон:

- обмежує максимально досяжну ефективність теплотехнічних установок;
- пояснює вплив температурних різниць на втрати корисності тепла;
- дозволяє аналізувати доцільність використання тепла різного потенціалу.

Другий закон є основою для оцінювання термодинамічної досконалості процесів теплопостачання.

Енергетичні баланси є практичним інструментом реалізації термодинамічних законів. Вони складаються для кожного елемента системи

теплопостачання та відображають співвідношення між вхідними і вихідними енергетичними потоками.

Баланс дозволяє:

- визначати втрати теплової енергії на окремих ділянках;
- оцінювати ефективність роботи обладнання;
- знаходити резерви підвищення енергоефективності.

У системному аналізі енергетичні баланси окремих елементів узгоджуються між собою, формуючи баланс системи в цілому.

Застосування термодинамічних законів у поєднанні з енергетичними балансами дозволяє:

- обґрунтовувати вибір технологічних рішень;
- оцінювати вплив режимів роботи на витрати енергії;
- забезпечувати раціональне використання теплових ресурсів.

Термодинамічні основи є необхідною передумовою для подальшого поглибленого аналізу, оптимізації та модернізації систем теплопостачання.

2.2 Методи термодинамічного аналізу елементів систем теплопостачання

Термодинамічний аналіз елементів систем теплопостачання спрямований на кількісну оцінку процесів перетворення, передачі та втрат теплової енергії в окремих функціональних вузлах. На відміну від загального системного аналізу, він дозволяє локалізувати джерела неефективності та визначити резерви підвищення техніко-економічних показників.

1. Аналіз котлів і теплогенераторів.

Для котлів і теплогенераторів основним методом є порівняння теплової потужності, отриманої теплоносієм, із теплотворною здатністю палива або підведеною електричною енергією. У процесі аналізу визначають структуру теплових втрат, пов'язаних із відхідними газами, випромінюванням та неповнотою згоряння.

Термодинамічний аналіз дозволяє:

- оцінювати ефективність режимів роботи при часткових навантаженнях;
- аналізувати вплив температури зворотної води на корисне використання теплоти;
- порівнювати різні типи теплогенераторів за рівнем енергетичної досконалості.

2. Аналіз теплообмінників.

Методи аналізу теплообмінників ґрунтуються на співставленні теплових потоків між гарячим і холодним теплоносіями. Основна увага приділяється температурним рівням, витратам та теплопередавальній здатності апарата.

У межах термодинамічного аналізу:

- визначають ефективність передачі теплоти;
- оцінюють вплив температурного напору на втрати потенціалу тепла;
- аналізують причини зниження ефективності внаслідок забруднення або неправильного режиму експлуатації.

Такі методи дозволяють оптимізувати роботу теплообмінних апаратів без зміни їх конструкції.

3. Аналіз теплових пунктів.

Теплові пункти є вузлами узгодження режимів джерела тепла та споживачів. Термодинамічний аналіз теплових пунктів спрямований на оцінку ефективності розподілу теплової енергії між контурами та стабільності температурних режимів.

Методи аналізу включають:

- порівняння теплових потоків на вході та виході теплового пункту;
- оцінку втрат при регулюванні та дроселюванні;
- аналіз відповідності фактичних параметрів розрахунковим.

Це дозволяє підвищити якість теплозабезпечення та зменшити непродуктивні втрати.

4. Аналіз теплових мереж.

Для теплових мереж термодинамічний аналіз зосереджується на зміні параметрів теплоносія вздовж траси транспортування. Основними завданнями є оцінка втрат теплоти та зниження температурного потенціалу.

Методи аналізу передбачають:

- визначення втрат теплової енергії через ізоляцію;
- оцінку впливу протяжності мережі та режимів циркуляції;
- аналіз температурних графіків подачі та повернення.

Результати такого аналізу використовуються для обґрунтування модернізації мереж і переходу до низькотемпературних систем.

Методи термодинамічного аналізу елементів систем тепlopостачання дозволяють деталізувати енергетичні процеси в кожному вузлі та визначити критичні ділянки з найбільшими втратами. Їх застосування є необхідною умовою підвищення ефективності, надійності та адаптивності сучасних систем тепlopостачання.

2.3 Ексергетичний аналіз та оцінювання втрат ексергії

Ексергетичний аналіз є поглибленим методом оцінювання ефективності теплотехнічних систем, що враховує не лише кількість енергії, а й її здатність виконувати корисну роботу. У системах теплопостачання цей підхід дозволяє виявити внутрішні причини неефективності та визначити напрями раціонального використання теплових ресурсів.

Ексергія – це частина енергії, яка може бути повністю або частково перетворена в корисну роботу за умови приведення системи в рівновагу з навколишнім середовищем. Величина ексергії залежить не тільки від кількості енергії, а й від температури, тиску та параметрів довкілля.

Для теплових процесів:

- високотемпературна теплота має вищу ексергетичну цінність;
- теплота низького потенціалу характеризується значно меншою ексергією;
- при однаковій кількості енергії різні теплові потоки можуть мати суттєво різну корисність.

Це робить ексергію зручним показником для порівняння різних джерел і режимів теплопостачання.

Ексергетичний баланс відображає розподіл ексергії між корисно використаною частиною, втратами та знищенням ексергії внаслідок необоротних процесів. На відміну від енергетичного балансу, ексергетичний дозволяє кількісно оцінити втрати якості енергії.

У практичному аналізі:

- ексергетичні баланси складають для окремих елементів та для системи в цілому;
- визначають ексергетичний ККД як показник термодинамічної досконалості;
- порівнюють альтернативні технічні рішення за рівнем знищення ексергії.

Такий підхід є особливо ефективним при аналізі складних багатоланкових систем.

Однією з ключових переваг ексергетичного аналізу є можливість локалізації втрат у конкретних вузлах системи теплопостачання. Це дозволяє визначити, де саме відбувається найбільше знищення корисного потенціалу енергії.

Типові зони підвищених втрат:

- процеси з великими температурними перепадами;
- дроселювання та нерегульовані гідравлічні опори;

- змішування потоків із різними параметрами;
- теплопередача без використання потенціалу теплоти.

Локалізація втрат створює основу для цілеспрямованої модернізації системи.

Необоротності в системах теплопостачання виникають унаслідок реальних фізичних процесів, які супроводжуються зростанням ентропії. Основними причинами є:

- теплопередача при кінцевій різниці температур;
- тертя теплоносія в трубопроводах;
- неповне або нерівноважне перетворення енергії;
- втрати тиску та неконтрольовані регульовальні процеси.

Розуміння механізмів необоротностей дозволяє не лише зменшувати втрати ексергії, а й підвищувати загальну ефективність системи.

Застосування ексергетичного аналізу в теплопостачанні дає змогу:

- раціонально поєднувати джерела тепла різного температурного рівня;
- обґрунтовувати перехід до низькотемпературних систем;
- оцінювати ефективність інноваційних технологій;
- ухвалювати обґрунтовані рішення з модернізації теплових систем.

Ексергетичний аналіз є потужним інструментом виявлення прихованих втрат і термодинамічних обмежень систем теплопостачання. Оцінювання ексергії, складання ексергетичних балансів та аналіз необоротностей дозволяють глибше зрозуміти причини неефективності та сформулювати науково обґрунтовані напрями підвищення енергоефективності.

2.4 Порівняльна оцінка ефективності систем за енергетичними та ексергетичними показниками

Порівняльна оцінка ефективності систем теплопостачання є важливим етапом вибору технічних рішень та напрямів модернізації. Застосування одночасно енергетичних і ексергетичних показників дозволяє отримати комплексне уявлення про якість використання теплових ресурсів та виявити приховані резерви підвищення ефективності.

Енергетичні показники характеризують кількісну сторону теплових процесів та відображають співвідношення між підведеною і корисно використаною енергією. Вони є зручними для загальної оцінки рівня енергоспоживання та визначення втрат у системі.

При порівнянні різних систем теплопостачання енергетична оцінка:

- дозволяє зіставляти питомі витрати енергії;
- відображає ефективність перетворення енергоресурсів;

- є основою для нормативних та звітних розрахунків.

Разом з тим, енергетичні показники не завжди дозволяють коректно оцінити доцільність використання тепла різного температурного рівня.

Ексергетичні показники доповнюють енергетичну оцінку, оскільки враховують потенціал енергії щодо виконання корисної роботи. Вони дозволяють оцінити термодинамічну досконалість системи та ступінь використання її можливостей.

При порівняльному аналізі ексергетичні показники:

- виявляють невинуватені втрати корисного потенціалу;
- дозволяють коректно зіставляти системи з різними температурними режимами;
- забезпечують глибше розуміння причин неефективності.

Таким чином, ексергетична оцінка часто демонструє відмінності між системами, які виглядають однаково ефективними за енергетичними критеріями.

Сумісне використання енергетичних і ексергетичних показників дозволяє отримати багатовимірну оцінку ефективності систем теплопостачання. У практиці можливі ситуації, коли система з високим енергетичним ККД має низьку ексергетичну ефективність через нераціональне використання високотемпературного тепла.

Порівняльний аналіз дає змогу:

- виявляти елементи з найбільшими втратами якості енергії;
- оцінювати доцільність застосування різних технологічних схем;
- визначати пріоритетні напрями вдосконалення системи.

Результати порівняльної оцінки слугують основою для прийняття інженерних рішень щодо підвищення ефективності теплопостачання. На їх основі можна:

- оптимізувати температурні графіки;
- узгоджувати рівні потенціалу джерел і споживачів;
- зменшувати необґрунтовані ексергетичні втрати;
- підвищувати гнучкість і адаптивність системи.

Такий підхід дозволяє спрямувати заходи з модернізації на ті елементи, де ефект від втручання буде максимальним.

Порівняльна оцінка за енергетичними та ексергетичними показниками є особливо актуальною для сучасних систем теплопостачання, орієнтованих на низькотемпературні режими, використання відновлюваних джерел енергії та інтеграцію з інтелектуальними системами керування. Поєднання енергетичної та ексергетичної оцінки забезпечує об'єктивний аналіз ефективності систем

теплопостачання. Використання результатів такого аналізу дозволяє приймати науково обґрунтовані рішення щодо оптимізації, підвищення ефективності та сталого розвитку теплових систем.

Питання для самоконтролю

1. У чому полягає відмінність між енергетичним і ексергетичним підходами до аналізу систем теплопостачання?
2. Як застосовуються перший і другий закони термодинаміки при аналізі елементів систем теплопостачання?
3. Які основні складові термодинамічного балансу котла або іншого теплогенератора?
4. Що таке ексергія теплової енергії та від яких факторів вона залежить?
5. Які причини виникнення ексергетичних втрат (необоротностей) у системах теплопостачання?
6. Як результати ексергетичного аналізу можуть бути використані для підвищення ефективності систем теплопостачання?
7. У яких випадках ексергетичний аналіз є більш інформативним, ніж традиційний термодинамічний аналіз?

3 ГІДРАВЛІЧНИЙ І ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ

3.1 Основи гідравлічного аналізу теплових мереж

Гідравлічний аналіз теплових мереж є необхідною складовою проєктування та експлуатації систем теплопостачання. Його метою є забезпечення заданих витрат теплоносія, стабільності режимів циркуляції та надійної роботи обладнання за мінімальних енергетичних витрат на перекачування.

Теплоносій у теплових мережах переміщується під дією різниці тиску, створеної насосним обладнанням. Характер руху визначається фізичними властивостями рідини, геометрією трубопроводів та режимами експлуатації.

При гідравлічному аналізі враховують:

- безперервність потоку;
- залежність швидкості руху від витрати та діаметра труб;
- вплив температури на в'язкість і густину теплоносія.

Ці чинники безпосередньо впливають на енергетичні витрати та стабільність теплопостачання.

Режим течії визначає характер руху теплоносія в трубопроводі та істотно впливає на гідравлічні втрати. У теплових мережах можливі різні режими, вибір яких залежить від швидкості потоку та фізичних властивостей рідини.

Основні режими:

- упорядкований рух з мінімальним перемішуванням;
- перехідний стан;
- інтенсивне перемішування з підвищеними втратами енергії.

Правильне визначення режиму течії є важливим для точного розрахунку опорів і вибору насосного обладнання.

Втрати тиску в теплових мережах виникають унаслідок тертя теплоносія об внутрішні стінки труб. Величина цих втрат залежить від довжини трубопроводу, шорсткості поверхні, швидкості потоку та режиму течії.

Гідравлічний аналіз дозволяє:

- визначати питомі та сумарні втрати тиску;
- оцінювати вплив матеріалу та діаметра труб;
- оптимізувати конфігурацію мережі з метою зниження енерговитрат на перекачування.

Окрім втрат на тертя, у теплових мережах значну роль відіграють місцеві опори, пов'язані зі зміною напрямку, швидкості або форми потоку. До них належать арматура, фасонні частини, розгалуження та з'єднання труб.

При аналізі місцевих опорів:

- враховують їх вплив на загальний гідравлічний опір мережі;
- оцінюють втрати тиску на окремих вузлах;
- визначають необхідність гідравлічного балансування.

Місцеві втрати можуть суттєво впливати на розподіл витрат між гілками мережі.

Гідравлічний аналіз теплових мереж дозволяє:

- забезпечити рівномірний розподіл теплоносія між споживачами;
- уникнути перевантаження насосів;
- зменшити експлуатаційні витрати;
- підвищити надійність і керованість системи.

Основи гідравлічного аналізу теплових мереж базуються на вивченні руху теплоносія, визначенні режимів течії та оцінюванні втрат тиску в трубопроводах і місцевих опорах. Комплексний підхід до гідравлічного аналізу є запорукою ефективного та стабільного функціонування систем тепlopостачання.

3.2 Методи розрахунку гідравлічних режимів теплових мереж

Розрахунок гідравлічних режимів теплових мереж спрямований на визначення фактичного стану циркуляції теплоносія в складній розгалуженій системі. Він дозволяє оцінити відповідність реальних параметрів проєктним, забезпечити надійність тепlopостачання та створити умови для ефективного регулювання.

У розгалужених теплових мережах витрати теплоносія розподіляються між окремими гілками відповідно до їх гідравлічного опору. Основною задачею розрахунку є знаходження такого розподілу витрат, за якого виконуються умови збереження маси у вузлах мережі та сумісність перепадів тиску в замкнених контурах.

Для цього застосовують:

1. *Методи поетапного наближення* базуються на послідовному уточненні параметрів гідравлічного режиму шляхом переходу від спрощеної моделі до реалістичнішої. На початковому етапі задається припущений розподіл витрат або тисків, який поступово коригується з урахуванням гідравлічних опорів елементів мережі.

Алгоритм застосування включає такі кроки:

- прийняття початкового наближення витрат у гілках (часто рівномірного або пропорційного тепловому навантаженню);
- розрахунок втрат тиску на ділянках мережі;

- виявлення невідповідностей між розрахунковими та допустимими перепадами тиску;
- коригування витрат з урахуванням отриманих відхилень;
- повторення розрахунку до досягнення прийнятної точності.

Методи поетапного наближення відзначаються наочністю та простотою реалізації, що робить їх придатними для попередніх інженерних розрахунків і навчальних задач. Водночас швидкість збіжності значною мірою залежить від якості початкового припущення.

2. *Ітераційні схеми уточнення витрат* є більш формалізованим розвитком методів поетапного наближення. Вони передбачають багаторазове повторення розрахункових циклів із систематичним коригуванням витрат до виконання умов гідравлічної рівноваги.

Ключова особливість таких схем полягає у використанні критеріїв збіжності, наприклад:

- різниця витрат між послідовними ітераціями;
- нев'язка рівнянь балансу тисків;
- відхилення тисків у контрольних вузлах.

Типова ітераційна схема включає:

- формування системи рівнянь для заданого розподілу витрат;
- обчислення гідравлічних витрат;
- оцінювання нев'язок;
- корекцію витрат за певним правилом (лінійним або нелінійним);
- перевірку умов зупинки ітерацій.

Ітераційні методи забезпечують вищу точність порівняно з поетапними підходами, але потребують більшої обчислювальної дисципліни та чітких правил коригування.

3. *Чисельні алгоритми для розв'язання систем нелінійних рівнянь.* Гідравлічний розрахунок теплових мереж у загальному вигляді зводиться до розв'язання системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, у яких витрати та втрати тиску пов'язані нелінійними залежностями. Для цього застосовують спеціалізовані чисельні алгоритми.

Найпоширеніші підходи:

- алгоритми з лінеаризацією рівнянь;
- методи послідовного уточнення змінних;
- матричні методи для великих розгалужених систем.

Загальна структура чисельного алгоритму передбачає:

- запис системи рівнянь у компактній формі;
- вибір початкового вектора змінних;

- обчислення поправок до змінних на кожному кроці;
- оновлення розв'язку до досягнення збіжності.

Такі алгоритми широко застосовуються в програмних комплексах гідравлічного моделювання, оскільки дозволяють обробляти мережі з великою кількістю вузлів і контурів.

Ці підходи дозволяють визначати витрати в кожній ділянці мережі при заданих граничних умовах.

Після встановлення витрат здійснюється розрахунок тисків у характерних точках теплової мережі. Це необхідно для перевірки працездатності обладнання, запобігання кавітації та забезпечення допустимих умов експлуатації.

Розрахунок тисків дозволяє:

- визначити мінімальні та максимальні значення;
- оцінити вплив насосів і регуляторів;
- перевірити відповідність гідравлічного режиму вимогам безпеки.

Балансування є процесом приведення фактичного гідравлічного режиму у відповідність до розрахункового. Воно здійснюється шляхом керування гідравлічними опорами окремих гілок мережі.

Основні підходи до балансування:

- налаштування балансувальної арматури;
- використання автоматичних регуляторів перепаду тиску;
- оптимізація характеристик насосного обладнання.

Балансування забезпечує рівномірний розподіл теплоносія та стабільну роботу всієї системи.

Усталений режим характеризується незмінністю витрат і тисків у часі. Його аналіз є базовим етапом розрахунку теплових мереж і використовується при проектуванні та нормальній експлуатації систем.

Розрахунок усталених режимів дозволяє:

- визначати номінальні параметри;
- оцінювати ефективність конфігурації мережі;
- перевіряти відповідність обладнання заданим умовам роботи.

Перехідні режими виникають при зміні навантаження, пуску або зупинці насосів, перемиканні арматури. Вони супроводжуються нестационарними процесами, які можуть призводити до небажаних явищ.

Аналіз перехідних режимів дозволяє:

- оцінювати динаміку зміни тисків і витрат;
- виявляти ризик гідравлічних ударів;
- розробляти заходи щодо захисту мережі.

Для цього використовують часові розрахункові моделі та спеціалізовані програмні засоби.

Застосування сучасних методів розрахунку гідравлічних режимів забезпечує:

- точне визначення параметрів роботи мережі;
- підвищення енергоефективності системи;
- надійність і довговічність теплових мереж;
- можливість впровадження автоматизованого керування.

Методи розрахунку гідравлічних режимів теплових мереж охоплюють визначення розподілу витрат і тисків, балансування системи, а також аналіз усталених і перехідних режимів. Їх застосування є ключовим інструментом для забезпечення ефективної та безпечної роботи систем теплопостачання.

3.3 Теплогідравлічний аналіз теплових мереж

Теплогідравлічний аналіз теплових мереж є комплексним підходом, що поєднує розгляд теплових і гідравлічних процесів як взаємопов'язаних складових єдиної системи. На відміну від окремих теплових або гідравлічних розрахунків, цей аналіз дозволяє оцінити реальну поведінку мережі за змінних температурних та експлуатаційних умов.

У теплових мережах параметри руху теплоносія та його тепловий стан тісно пов'язані між собою. Зміна температури теплоносія впливає на його фізичні властивості, а це, у свою чергу, змінює гідравлічні характеристики потоку.

Теплогідравлічний аналіз враховує:

- зміну температури теплоносія вздовж траси мережі;
- теплові втрати через ізоляцію трубопроводів;
- залежність гідравлічного опору від температури та режиму течії;
- взаємний вплив теплового навантаження і витрати теплоносія.

Таким чином, теплові та гідравлічні розрахунки виконуються не ізольовано, а в єдиному розрахунковому контурі.

Температурний режим теплової мережі безпосередньо впливає на величину гідравлічних втрат. Зі зміною температури змінюються в'язкість і густина теплоносія, що позначається на характері течії та величині опорів.

Основні прояви цього впливу:

- зниження в'язкості при підвищенні температури призводить до зменшення втрат тиску;
- зміна густини впливає на інерційні властивості потоку;

- температурні градієнти можуть спричиняти нерівномірний розподіл витрат у гілках мережі.

Теплогідравлічний аналіз дозволяє кількісно оцінити ці ефекти та врахувати їх при проєктуванні й експлуатації.

Зміна теплового навантаження споживачів призводить до зміни необхідної витрати теплоносія, що автоматично впливає на гідравлічний режим мережі. При цьому можливі нелінійні ефекти, які не виявляються при окремому аналізі.

Комплексний підхід дозволяє:

- визначати оптимальні витрати для різних температурних графіків;
- оцінювати стійкість режимів при змінному навантаженні;
- прогнозувати перевантаження окремих ділянок мережі.

Теплогідравлічний аналіз є особливо важливим у випадках:

- реконструкції або розширення теплових мереж;
- переходу на інші температурні графіки;
- впровадження погодозалежного регулювання;
- інтеграції низькотемпературних джерел тепла.

Він дозволяє зменшити ризик помилкових інженерних рішень, які можуть виникнути при ізольованому розгляді окремих процесів.

Результати теплогідравлічного аналізу використовуються для:

- коригування діаметрів трубопроводів;
- вибору режимів роботи насосів;
- зниження втрат енергії на транспортування;
- підвищення надійності та керованості системи.

Комплексне врахування теплових і гідравлічних факторів дозволяє підвищити загальну ефективність теплопостачання.

Таким чином теплогідравлічний аналіз теплових мереж забезпечує глибоке розуміння взаємодії теплових і гідравлічних процесів та впливу температурних режимів на гідравлічні характеристики. Його застосування є необхідною умовою для проєктування, оптимізації та стійкої експлуатації сучасних систем теплопостачання.

3.4 Застосування гідравлічного та теплогідравлічного аналізу для оптимізації роботи мереж

Гідравлічний та теплогідравлічний аналіз є важливими інструментами для оптимізації роботи теплових мереж. Вони дозволяють знижувати втрати енергії, підвищувати ефективність системи та забезпечувати її надійність за умов змінних навантажень та температурних режимів.

Одним із головних завдань оптимізації теплових мереж є зниження втрат енергії, що виникають через тертя теплоносія, теплові втрати в ізоляції та неповне використання теплового потенціалу.

Застосування гідравлічного аналізу дозволяє:

- визначити оптимальні діаметри трубопроводів для мінімізації гідравлічних втрат і забезпечення рівномірного розподілу теплоносія;
- оцінити вплив витрат на енергію для різних типів труб і матеріалів, обираючи найбільш ефективні;
- розрахувати гідравлічний опір системи для визначення необхідної потужності насосів і зменшення їх енергоспоживання.

Теплогідравлічний аналіз дозволяє:

- мінімізувати теплові втрати шляхом точного розрахунку температурних градієнтів та оптимізації температурних графіків;
- використовувати принципи погодозалежного регулювання для зменшення потреби в додатковій енергії, що дозволяє уникати надмірного нагріву в теплових мережах.

Загалом, правильний вибір параметрів системи за допомогою цих аналізів дозволяє значно знизити енергетичні втрати, що прямо впливає на загальну ефективність і економічність роботи мережі.

Підвищення надійності теплових мереж є критичним завданням для забезпечення безперебійного постачання тепла споживачам. За допомогою гідравлічного та теплогідравлічного аналізу можна забезпечити стабільну роботу мережі навіть за різких змін температур або навантажень.

До основних аспектів підвищення надійності відносяться:

- аналіз резервних потужностей. Завдяки правильному розрахунку гідравлічного опору можна забезпечити стабільність роботи мережі навіть за умов високих навантажень;
- регулювання режимів насосів. Використання теплогідравлічного аналізу для визначення оптимальних температурних графіків дозволяє підвищити ефективність роботи насосів та знизити ризик їх перевантаження;
- автоматизація та моніторинг. Використання інтегрованих систем керування та моніторингу дозволяє автоматично реагувати на зміни в параметрах мережі, швидко коригуючи витрати теплоносія та підтримуючи стабільні умови роботи.

Завдяки таким підходам підвищується надійність мережі, що дозволяє уникати аварійних ситуацій та збоїв у подачі тепла.

Для підвищення ефективності теплових мереж застосовуються як гідравлічні, так і теплогідравлічні аналізи, що дають змогу:

- оптимізувати параметри трубопроводів для зменшення втрат тепла та енергії. Це включає вибір відповідних діаметрів труб, матеріалів із низькими тепловими втратами та використання інноваційних ізоляційних матеріалів;
- моделювати роботу мережі за різних умов. Врахування змінних навантажень та температури дозволяє знайти найбільш ефективні режими роботи системи;
- враховувати термодинамічні та ексергетичні фактори. Це дозволяє підвищити ефективність використання теплоносія, не тільки на рівні температур, а й з точки зору можливості виконання корисної роботи.

Крім того, теплогідравлічний аналіз дає змогу прогнозувати майбутні зміни в системі, що дозволяє проводити планову модернізацію та ефективне обслуговування.

Застосування гідравлічного та теплогідравлічного аналізу дозволяє значно знижувати втрати енергії, підвищувати надійність та ефективність теплових мереж. Вони є основними інструментами для створення оптимальних умов роботи систем, що включають регулювання витрат, підвищення енергоефективності, зниження експлуатаційних витрат та забезпечення стабільної роботи мережі в довгостроковій перспективі.

Питання для самоконтролю

1. Які основні задачі гідравлічного аналізу теплових мереж та які параметри при цьому визначаються?
2. Від яких факторів залежать втрати тиску теплоносія в трубопроводах теплових мереж?
3. У чому полягає відмінність між гідравлічним і теплогідравлічним аналізом теплових мереж?
4. Як температурний режим теплоносія впливає на гідравлічні характеристики теплової мережі?
5. Які методи застосовуються для балансування теплових мереж і з якою метою воно проводиться?
6. Які особливості аналізу усталених та перехідних режимів роботи теплових мереж?
7. Як результати гідравлічного та теплогідравлічного аналізу використовуються для оптимізації та підвищення надійності теплових мереж?

4 МЕТОДИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

4.1 Математичні моделі систем теплопостачання

Математичні моделі систем теплопостачання є інструментом формалізованого опису фізичних процесів, що відбуваються під час генерації, транспортування та споживання теплової енергії. Вони дозволяють прогнозувати поведінку системи, оцінювати ефективність різних технічних рішень і приймати обґрунтовані інженерні рішення без проведення дорогих натурних експериментів.

Аналітичні моделі базуються на використанні замкнених математичних залежностей, отриманих із фундаментальних фізичних законів. Такі моделі дозволяють отримати явні вирази для основних параметрів системи та швидко оцінити вплив окремих факторів. Вони зазвичай застосовуються для спрощених схем або для аналізу окремих елементів системи.

Чисельні моделі передбачають дискретизацію простору та часу і розв'язання систем рівнянь за допомогою обчислювальних методів. Вони використовуються для аналізу складних, розгалужених систем, у яких неможливо отримати аналітичний розв'язок. Чисельні моделі дозволяють враховувати нелінійність процесів і взаємозв'язки між великою кількістю параметрів.

Імітаційні моделі відтворюють функціонування системи у вигляді послідовності подій або сценаріїв роботи. Вони орієнтовані на аналіз поведінки системи в часі, включаючи змінні режими експлуатації, вплив зовнішніх факторів і роботу систем керування. Такі моделі часто застосовуються для оцінювання експлуатаційних стратегій і довгострокового прогнозування.

Рівень деталізації математичної моделі визначає ступінь опису реальних процесів і складність розрахунків. Моделі можуть бути:

- агрегованими, коли система розглядається як сукупність укрупнених елементів;
- структурованими, з поділом на окремі підсистеми та вузли;
- високодеталізованими, у яких моделюються локальні процеси в окремих компонентах.

Вибір рівня деталізації залежить від поставленої задачі, доступності вихідних даних та обчислювальних ресурсів.

Для спрощення математичного опису під час моделювання систем теплопостачання вводяться певні припущення. Вони можуть стосуватися:

- сталості або квазісталості режимів;

- усереднення параметрів у часі або просторі;
- лінійності окремих залежностей;
- ідеалізації умов теплообміну та руху теплоносія.

Такі припущення дозволяють зменшити складність моделі, але потребують перевірки на відповідність реальним умовам.

Будь-яка математична модель має обмеження, пов'язані з точністю вихідних даних, коректністю припущень та обраним рівнем деталізації. Основні обмеження включають:

- неможливість повного врахування всіх фізичних і експлуатаційних факторів;
- зростання похибок при екстраполяції результатів;
- обмежену придатність моделей для нестандартних або аварійних режимів.

Тому результати моделювання потребують інженерної інтерпретації та, за можливості, підтвердження експериментальними даними.

Математичні моделі широко застосовуються для:

- аналізу та оптимізації режимів роботи;
- оцінювання наслідків реконструкції та модернізації;
- підтримки рішень у системах автоматизованого керування;
- прогнозування розвитку теплових мереж.

Математичні моделі систем теплопостачання є потужним інструментом аналізу та оптимізації, який охоплює аналітичні, чисельні й імітаційні підходи з різними рівнями деталізації. Усвідомлення припущень та обмежень моделей є необхідною умовою їх коректного використання у практиці проектування та експлуатації теплових систем.

4.2 Ідентифікація параметрів і верифікація моделей

Ідентифікація параметрів і верифікація моделей систем теплопостачання є ключовими етапами забезпечення адекватності математичного моделювання та достовірності результатів розрахунків.

Ідентифікація полягає у визначенні числових значень параметрів моделі, які не можуть бути безпосередньо виміряні або мають значну невизначеність (коефіцієнти тепловіддачі, гідравлічного опору, теплових втрат, інерційні параметри тощо).

Основою ідентифікації є зіставлення результатів моделювання з експериментальними або експлуатаційними даними та мінімізація відхилень між ними. Для цього застосовують методи найменших квадратів, оптимізаційні та статистичні методи.

Експериментальні та експлуатаційні дані перед використанням у моделюванні проходять попередню обробку: фільтрацію шумів, усереднення, перевірку на викиди та узгодження за часом. Важливим етапом є оцінювання точності вимірювань і визначення довірчих інтервалів, що дозволяє врахувати похибки під час ідентифікації параметрів.

Калібрування моделі полягає у коригуванні її параметрів з метою досягнення найкращої відповідності між розрахунковими та реальними даними роботи системи теплопостачання. Відкалібрована модель здатна коректно відтворювати поведінку системи в заданому діапазоні режимів і може бути використана для прогнозування, оптимізації та аналізу різних сценаріїв роботи.

Верифікація спрямована на перевірку правильності реалізації математичної моделі та її відповідності фізичним законам. Вона передбачає порівняння результатів моделювання з незалежними експериментальними даними або аналітичними рішеннями, а також перевірку коректності чисельних алгоритмів.

Аналіз чутливості дозволяє визначити, як зміна окремих параметрів впливає на результуючі показники системи (теплову потужність, втрати енергії, температурні режими). Це дає змогу виявити найбільш значущі параметри, зосередити увагу на їх точному визначенні та підвищити надійність і прогностичні можливості моделі.

У комплексі ідентифікація, калібрування, верифікація та аналіз чутливості забезпечують наукову обґрунтованість математичних моделей систем теплопостачання та їх ефективне застосування у дослідженнях і практиці.

4.3 Методи оптимізації систем теплопостачання

Методи оптимізації систем теплопостачання спрямовані на вибір найкращих технічних рішень і режимів роботи за заданих обмежень ресурсів, надійності та нормативних вимог.

В однокритеріальній оптимізації зазвичай мінімізують або максимізують один показник, наприклад витрати палива, втрати тепла або приведені витрати. Такий підхід є відносно простим, але не завжди відображає реальні умови експлуатації.

Багатокритеріальна оптимізація враховує одночасно кілька цілей (економічних, енергетичних, екологічних), між якими існують компроміси. Результатом є множина Парето-оптимальних рішень, з якої обирається найбільш прийнятне залежно від пріоритетів.

Лінійні методи застосовуються тоді, коли цільова функція та обмеження можуть бути подані у лінійній формі. Вони ефективні для задач розподілу теплових навантажень, оптимізації режимів роботи джерел тепла та теплових мереж за спрощених моделей і дозволяють отримувати рішення з мінімальними обчислювальними витратами.

Нелінійна оптимізація використовується для більш реалістичних моделей, у яких залежності між параметрами є нелінійними (теплові втрати, гідравлічні опори, ККД обладнання). Такі методи забезпечують вищу точність результатів, але потребують більших обчислювальних ресурсів і ретельного вибору алгоритмів.

Евристичні методи (генетичні алгоритми, рій частинок, імітація відпалу) застосовуються для складних, багатовимірних задач з великою кількістю змінних та обмежень. Вони не гарантують знаходження глобального оптимуму, проте дозволяють отримати практично ефективні рішення в умовах, коли класичні методи є непридатними.

Застосування різних методів оптимізації дає змогу підвищити ефективність, гнучкість та сталий розвиток систем теплопостачання з урахуванням реальних технічних і економічних умов.

4.4 Застосування математичного моделювання та оптимізації в наукових дослідженнях

Застосування математичного моделювання та оптимізації в наукових дослідженнях систем теплопостачання полягає у використанні моделей як універсального інструменту аналізу, прогнозування та обґрунтування технічних рішень на різних етапах життєвого циклу системи. Математичні моделі дають змогу досліджувати структуру систем теплопостачання без втручання в реальні об'єкти, оцінювати доцільність різних схем побудови джерел тепла, конфігурацій теплових мереж і способів підключення споживачів, що особливо важливо на етапах проєктування та реконструкції.

Оптимізація режимів роботи систем використовується для визначення раціональних параметрів експлуатації за умов змінних теплових навантажень, погодних факторів і технічних обмежень обладнання. Моделі дозволяють аналізувати різні сценарії керування, оцінювати наслідки аварійних режимів та впровадження нових технологій, а також виконувати сценарне моделювання довгострокового розвитку систем теплопостачання з урахуванням змін паливної бази, тарифної політики та кліматичних умов.

У наукових дослідженнях математичне моделювання слугує засобом перевірки гіпотез, виявлення закономірностей та оцінювання впливу окремих

параметрів на ефективність, надійність і стійкість систем. Воно широко застосовується для аналізу ризиків, обґрунтування резервування потужностей і підвищення надійності теплопостачання. Поєднання моделей з сучасними інформаційними технологіями, такими як цифрові двійники та системи збору експлуатаційних даних, забезпечує адаптивне керування та оперативну підтримку прийняття інженерних рішень. У підсумку моделювання та оптимізація підвищують наукову обґрунтованість і практичну цінність досліджень у галузі теплопостачання.

Додатково математичне моделювання та оптимізація відіграють ключову роль у вирішенні сучасних завдань енергетики:

- екологічна ефективність та декарбонізація: моделі дозволяють оцінювати вплив різних технологічних рішень на рівень викидів парникових газів, визначати оптимальні стратегії переходу до відновлюваних джерел енергії та інтеграції теплових насосів, сонячних колекторів чи біомаси, що сприяє реалізації цілей Європейського зеленого курсу;
- економічна оптимізація та тарифоутворення: моделювання дає змогу прогнозувати витрати на паливо, експлуатацію та ремонт, а також формувати економічно обґрунтовані тарифи для споживачів, знаходячи баланс між інвестиційними витратами та довгостроковою економією;
- інтеграція з системами енергоменеджменту: моделі застосовуються для розробки стратегій енергозбереження, визначення показників енергоефективності та створення систем моніторингу відповідно до міжнародних стандартів ISO 50001;
- мультикритеріальна оптимізація: у дослідженнях враховуються одночасно кілька критеріїв — мінімізація витрат, підвищення надійності, зменшення екологічного навантаження, забезпечення гнучкості системи, що дозволяє знаходити компромісні рішення для різних зацікавлених сторін;
- використання штучного інтелекту та машинного навчання: поєднання математичного моделювання з алгоритмами прогнозування на основі великих даних забезпечує точніший аналіз споживання тепла, виявлення прихованих закономірностей та розробку адаптивних стратегій керування;
- міждисциплінарний підхід: моделювання систем теплопостачання інтегрується з дослідженнями у сфері будівельної фізики, гідравліки, економіки та екології, що дозволяє створювати комплексні рішення для сталого розвитку міст і регіонів.

Таким чином, математичне моделювання та оптимізація не лише забезпечують технічну й економічну ефективність систем теплопостачання, але й стають ключовим інструментом у досягненні стратегічних цілей енергетичної

безпеки, екологічної стійкості та інтеграції України до європейського енергетичного простору.

Питання для самоконтролю

1. Які типи математичних моделей застосовуються для аналізу систем теплопостачання та в яких випадках доцільно використовувати аналітичні, чисельні й імітаційні моделі?
2. Як рівень деталізації математичної моделі впливає на точність результатів і обчислювальну складність досліджень систем теплопостачання?
3. Які основні припущення та обмеження враховуються при побудові математичних моделей систем теплопостачання і як вони впливають на інтерпретацію результатів?
4. У чому полягає процес ідентифікації параметрів моделей систем теплопостачання та які методи використовуються для їх калібрування на основі експериментальних даних?
5. Яке призначення верифікації та аналізу чутливості математичних моделей і як їх результати використовуються для підвищення надійності моделювання?
6. У чому полягають відмінності між однокритеріальною та багатокритеріальною оптимізацією систем теплопостачання і які методи оптимізації доцільно застосовувати для складних нелінійних задач?
7. Як результати математичного моделювання та оптимізації використовуються в наукових дослідженнях для оптимізації структури й режимів роботи систем теплопостачання та підтримки прийняття інженерних рішень?

5 СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ЧЕТВЕРТОГО ТА П'ЯТОГО ПОКОЛІНЬ (4GDH, 5GDH)

5.1 Еволюція та концепції систем теплопостачання 4GDH і 5GDH

Системи теплопостачання є ключовим елементом енергетичної інфраструктури міст і будівель. Їх розвиток тісно пов'язаний зі змінами в енергетичній політиці, технологіях виробництва тепла, вимогах до енергоефективності та зменшення впливу на довкілля. Сучасні тенденції зумовили перехід від традиційних централізованих систем до інтелектуальних, низькотемпературних і децентралізованих рішень, відомих як системи теплопостачання четвертого (4GDH) та п'ятого покоління (5GDH).

Перше покоління (1GDH).

Перші системи централізованого теплопостачання використовували пару як теплоносії. Вони характеризувалися дуже високими температурами і тисками, значними тепловими втратами та низькою безпекою експлуатації. Основним джерелом енергії було спалювання вугілля.

Друге покоління (2GDH).

Другий етап розвитку пов'язаний з переходом на гарячу воду як теплоносії. Температури залишалися високими (понад 100 °C), але системи стали безпечнішими та надійнішими. Основою залишалося централізоване виробництво тепла з використанням невідновлюваних джерел (газ, вугілля).

Третє покоління (3GDH).

Третє покоління систем теплопостачання отримало широке поширення наприкінці XX та з початку XXI століть. Характерними рисами були попередньо ізольовані трубопроводи, зниження температур теплоносія до 90–125 °C та активне впровадження когенераційних установок (ТЕЦ). Саме 3GDH стали базою для сучасних систем централізованого теплопостачання в багатьох країнах.

Четверте покоління (4GDH).

Четверте покоління систем теплопостачання (4th Generation District Heating, 4GDH) орієнтоване на інтеграцію відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності та зменшення температурних рівнів. Такі системи є ключовим елементом переходу до сталої енергетики.

Основні принципи 4GDH:

- низькотемпературний режим роботи (типово 50–70 °C у подаючому трубопроводі);
- використання відновлюваних і вторинних джерел тепла (біомаса, сонячна теплова енергія, промислові скидні теплові потоки);

- інтеграція з електроенергетичною системою та тепловими акумуляторами;
- орієнтація на енергоефективні будівлі з низькими тепловими втратами.

У системах 4GDH широко застосовуються когенераційні установки з високим ККД, великі теплові насоси, сезонні та добові теплові акумулятори, а також інтелектуальні системи керування. Важливу роль відіграє цифровізація та прогнозне управління тепловими навантаженнями.

Перевагами є зниження втрат у мережах, скорочення викидів CO₂, можливість інтеграції ВДЕ. Основні обмеження пов'язані з необхідністю модернізації будівель і теплових мереж, а також значними початковими інвестиціями.

П'яте покоління (3GDH).

П'яте покоління систем теплопостачання (5th Generation District Heating and Cooling, 5GDHC) є подальшим етапом еволюції, що передбачає ультранизькі температури теплоносія та поєднання функцій опалення й охолодження.

Основні принципи 5GDH:

- дуже низькі температури мережі (приблизно 10–30 °C);
- децентралізоване виробництво тепла та холоду за допомогою теплових насосів у будівлях або кластерах;
- активний теплообмін між споживачами (будівлями-донорами та будівлями-реципієнтами тепла);
- використання ґрунту, ґрунтових вод і підземних акумуляторів як джерел та накопичувачів енергії.

Ключовими елементами є двонапрямні теплові мережі, теплові насоси, системи низькопотенційного теплопостачання, геотермальні зонди та інтелектуальні системи керування енергопотоками.

Серед основних переваг – мінімальні теплові втрати, висока гнучкість, можливість повної декарбонізації та поєднання опалення й охолодження. До недоліків належать складність проєктування, висока вимога до автоматизації та необхідність значних інвестицій у теплові насоси.

Порівняння систем 4GDH і 5GDH: 4GDH базуються на централізованому виробництві тепла з низькими температурами та інтеграцією ВДЕ, тоді як 5GDH є децентралізованими системами з ультранизькими температурами та активним теплообміном між споживачами. 5GDH вважаються перспективною концепцією для майбутніх «розумних» міст.

Подальший розвиток систем теплопостачання пов'язаний із декарбонізацією, цифровізацією, інтеграцією з енергетичними мережами та концепцією smart city. 4GDH розглядаються як перехідний етап, тоді як 5GDH – як довгострокова стратегія сталого розвитку теплової енергетики.

Еволюція систем теплопостачання від високотемпературних мереж до низько- та ультранизкотемпературних концепцій відображає загальні тенденції розвитку енергетики. Системи 4GDH і 5GDH є ключовими інструментами підвищення енергоефективності, зниження викидів та забезпечення сталого розвитку сучасних міст.

5.2 Принципи функціонування та технологічні рішення

Сучасні системи теплопостачання функціонують як складні енергетичні платформи, у яких тепла енергія розглядається не як побічний продукт генерації, а як керований ресурс. Основними принципами є максимальне використання низькопотенційних джерел, мінімізація ексергійних втрат, гнучкість режимів роботи та тісна інтеграція з іншими енергетичними секторами. Такі системи працюють у динамічному режимі, адаптуючись до змін попиту, кліматичних умов і стану енергоринку.

Низькотемпературні теплові мережі.

Низькотемпературні теплові мережі базуються на принципі зменшення температури теплоносія до рівня, достатнього для покриття реального теплового навантаження будівель. Це дозволяє суттєво знизити теплові втрати в трубопроводах, підвищити ефективність теплогенеруючого обладнання та розширити спектр доступних джерел тепла.

Ключовою особливістю є орієнтація на споживача: система проєктується виходячи з фактичних потреб будівель, а не з універсального температурного графіка. Для компенсації нижчого температурного рівня активно застосовуються збільшені площі теплообміну (теплі підлоги, фанкойли, низькотемпературні радіатори).

Двонапрямні теплові мережі.

Двонапрямні (bidirectional) теплові мережі дозволяють теплоносію змінювати напрямок руху залежно від локального балансу тепла. Будівлі або технологічні об'єкти можуть не лише споживати, а й віддавати тепло в мережу. Таким чином формується активна тепла мережа з множинними точками генерації та відбору енергії.

Функціонування таких мереж базується на постійному гідравлічному та тепловому балансуванні, що реалізується за допомогою автоматизованих

насосних станцій, регулювальної арматури та систем диспетчерського управління.

Джерела тепла: відновлювані та вторинні ресурси.

1. Відновлювані джерела енергії.

У сучасних теплових системах активно використовуються сонячні теплові колектори, геотермальна енергія, теплота навколишнього повітря та біомаса. Їх спільною рисою є низький або середній температурний потенціал, що робить їх особливо придатними для інтеграції в низькотемпературні мережі.

2. Надлишкове промислове тепло.

Промислові процеси (металургія, харчова промисловість, хімічні виробництва) генерують значні обсяги надлишкового тепла, яке традиційно розсіюється в навколишнє середовище. Сучасні системи теплопостачання дозволяють відбирати це тепло через теплообмінники та інтегрувати його в теплові мережі, підвищуючи загальну енергоефективність регіону.

3. Дата-центри.

Дата-центри є стабільним і прогнозованим джерелом низькопотенційного тепла. Відведене тепло серверного обладнання може використовуватися для опалення житлових і громадських будівель після підвищення температурного рівня за допомогою теплових насосів.

4. Стічні води.

Стічні води мають відносно стабільну температуру протягом року, що робить їх привабливим джерелом тепла. Тепло відбирається через спеціальні теплообмінні системи на каналізаційних колекторах або очисних спорудах.

Теплові насоси виконують функцію підвищення температурного потенціалу тепла з низькопотенційних джерел до рівня, придатного для опалення або гарячого водопостачання. Вони є центральною ланкою між тепловими мережами та джерелами тепла.

Ефективність теплових насосів значною мірою залежить від температурного режиму мережі: чим менша різниця температур між джерелом і споживачем, тим вищий коефіцієнт перетворення. Це робить низькотемпературні мережі технологічно та економічно доцільними.

Акумулювання тепла забезпечує баланс між виробництвом і споживанням енергії в часі. Застосовуються як короткострокові (баки-акумулятори, буферні ємності), так і довгострокові рішення (сезонні теплові акумулятори, підземні резервуари, ґрунтові та водоносні горизонти).

Акумулятори дозволяють ефективно інтегрувати ВДЕ, згладжувати пікові навантаження та оптимізувати роботу теплових насосів і електроенергетичної системи.

Цифрове управління є основою функціонування складних теплових систем. Воно включає системи моніторингу, прогнозування навантажень, оптимізації режимів роботи та автоматичного балансування мережі.

Використання цифрових двійників, алгоритмів оптимізації та елементів штучного інтелекту дозволяє підвищити надійність, зменшити експлуатаційні витрати та забезпечити адаптивну роботу системи в реальному часі.

Сучасні теплові мережі дедалі частіше поєднують функції опалення та охолодження. Тепло, відведене під час процесу охолодження будівель або технологічних об'єктів, не втрачається, а використовується повторно для покриття теплових потреб інших споживачів.

Такий підхід формує замкнені енергетичні цикли та суттєво підвищує загальний коефіцієнт використання енергії.

Sector coupling передбачає інтеграцію теплового, електричного, газового та транспортного секторів у єдину енергетичну систему. У цьому контексті теплопостачання відіграє роль гнучкого споживача та накопичувача енергії.

Теплові насоси, електричні котли та теплові акумулятори дозволяють перетворювати надлишкову електроенергію з відновлюваних джерел у тепло, забезпечуючи стабільність енергосистеми та підвищуючи частку ВДЕ.

Принципи функціонування та технологічні рішення сучасних систем теплопостачання базуються на гнучкості, інтеграції та ефективному використанні ресурсів. Низькотемпературні та двонапрямні мережі, теплові насоси, акумуляування та цифрове управління формують основу нових енергетичних систем, орієнтованих на сталий розвиток і декарбонізацію.

5.3 Переваги та виклики впровадження 4GDH і 5GDH

Перехід до систем теплопостачання четвертого та п'ятого поколінь є не лише технологічною модернізацією, а комплексною трансформацією енергетичної, економічної та соціальної сфер. Оцінка переваг і викликів впровадження 4GDH і 5GDH вимагає системного підходу, що враховує вплив на довкілля, економіку, міську інфраструктуру та поведінку кінцевих споживачів.

1. Екологічні та енергетичні переваги:

– зниження викидів парникових газів. Основною екологічною перевагою 4GDH і 5GDH є суттєве скорочення викидів CO₂ шляхом відмови від викопного палива або зменшення його частки. Інтеграція відновлюваних джерел енергії, вторинного тепла та електрифікація теплопостачання дозволяють декарбонізувати сектор, який традиційно є одним із найбільших джерел викидів;

- зменшення теплових втрат. Зниження температурних рівнів у теплових мережах безпосередньо впливає на скорочення теплових втрат під час транспортування. Це особливо актуально для міських мереж із великою протяжністю та складною конфігурацією. Ультранизькі температури в 5GDH практично усувають проблему втрат як критичного фактору ефективності;

- підвищення енергетичної гнучкості. Системи 4GDH і 5GDH здатні працювати в умовах змінного енергопостачання, що є характерним для відновлюваних джерел. Гнучкість досягається завдяки акумулюванню тепла, можливості змінювати джерела енергії та взаємодії з електроенергетичною системою. Теплопостачання перестає бути пасивним споживачем і стає активним елементом енергосистеми.

2. Економічні ефекти:

- зниження довгострокових експлуатаційних витрат. Хоча початкові інвестиції є значними, у довгостроковій перспективі 4GDH і 5GDH забезпечують зниження витрат на паливо та обслуговування. Використання локальних джерел енергії зменшує залежність від імпорتنих енергоносіїв і цінових коливань на світових ринках;

- оптимізація міської інфраструктури. Сучасні теплові мережі можуть інтегруватися з іншими міськими системами, зокрема з водопостачанням, каналізацією та електромережами. Це відкриває можливості для комплексного планування інфраструктури та зниження сумарних капітальних витрат на розвиток міст;

- створення нових ринків і робочих місць. Впровадження 4GDH і 5GDH стимулює розвиток нових секторів економіки: виробництво теплових насосів, систем автоматизації, цифрових платформ управління, сервісних та інжинірингових компаній. Це сприяє створенню висококваліфікованих робочих місць і розвитку локальної економіки.

3. Соціальні ефекти:

- підвищення енергетичної безпеки. Децентралізація теплопостачання та використання місцевих ресурсів підвищують стійкість системи до криз, аварій та геополітичних ризиків. Це особливо важливо для густонаселених міських районів;

- поліпшення якості життя. Скорочення викидів забруднювальних речовин, зниження шуму та підвищення надійності теплопостачання позитивно впливають на здоров'я населення та комфорт проживання;

- зміна ролі споживача. У системах нового покоління споживач стає активним учасником енергетичного процесу. Будівлі можуть не лише споживати, а й виробляти або передавати тепло, що формує нову культуру енергоспоживання та підвищує обізнаність населення.

4. Технічні можливості:

- сумісність із наявними будівлями. Більшість існуючого житлового фонду проєктувалася для високотемпературних систем. Перехід на низькотемпературні режими потребує модернізації внутрішніх систем опалення, покращення теплоізоляції та впровадження сучасних систем регулювання;
- складність управління. Багатоджерельні, двонапрямні та динамічні системи потребують складних алгоритмів управління та високого рівня автоматизації. Недостатній рівень цифровізації може знизити ефективність або надійність системи.

5. Інвестиційні бар'єри та інституційні виклики.

Високі початкові капітальні витрати є одним із головних стримуючих факторів. Вони пов'язані з реконструкцією мереж, встановленням теплових насосів, акумуляторів та цифрових систем. Для подолання цього бар'єру необхідні довгострокові фінансові інструменти, державна підтримка та залучення приватного капіталу.

Нормативно-правова база багатьох країн орієнтована на традиційні системи тепlopостачання. Відсутність гнучких тарифних моделей, стандартів для двонапрямних мереж і механізмів стимулювання використання вторинного тепла ускладнює впровадження 4GDH і 5GDH.

6. Готовність інфраструктури та споживачів:

- фізичний знос трубопроводів, насосного обладнання та теплових пунктів обмежує можливості модернізації. У багатьох випадках впровадження 4GDH і 5GDH можливе лише в межах комплексної реконструкції мереж;
- недостатня узгодженість між операторами теплових, електричних і водних мереж ускладнює реалізацію міжсекторних рішень. Необхідне комплексне планування на рівні міста або регіону;
- впровадження нових систем потребує довіри до операторів, розуміння принципів роботи та прийняття змін у моделях споживання. Інформаційні кампанії та економічні стимули є ключовими інструментами підвищення готовності населення.

Переваги впровадження 4GDH і 5GDH є значними з екологічної, економічної та соціальної точок зору. Водночас успішна реалізація цих концепцій потребує подолання технічних, інвестиційних і регуляторних бар'єрів, а також забезпечення готовності інфраструктури та споживачів. Саме комплексний підхід визначає успіх переходу до систем тепlopостачання нового покоління.

5.4 Європейський і світовий досвід та перспективи розвитку

Міжнародний досвід упровадження систем 4GDH і 5GDH демонструє значення державної політики та інновацій у їх розвитку. Перспективи масштабування 5GDH та специфічні умови застосування в Україні розглядаються крізь призму реальних проєктів і практичних висновків для планування та реалізації.

1. Провідні країни та реалізовані проєкти:

- Нідерланди (Heerlen — Mijntwater): приклад 5GDH на базі підземних вод з відпрацьованих шахт; мережа одночасно постачає тепло та холод, виконує функцію сезонного підземного акумулятора [5];
- Данія: довгостроковий лідер у впровадженні централізованих мереж та низькотемпературних рішень; державна політика сприяє інтеграції надлишкового тепла та ВДЕ, з амбіційними цілями декарбонізації сектора [6];
- Швеція і Фінляндія: активні проєкти з відбору надлишкового тепла від дата-центрів та промислових підприємств; досвід інтеграції теплових насосів у мережі [7–11];
- Великобританія: нішеві 5GDH-проєкти (наприклад, експерименти з використанням притоків шахтних вод); спрямованість на інтеграцію міських відновлюваних джерел тепла [12–16];
- європейські пілотні проєкти (D2GRIDS та ін.): кілька партнерських проєктів у Ноттінгемі та інших містах, що демонструють застосування 5GDH у різних соціотехнічних контекстах [17].

2. Роль державної політики та інновацій:

- регуляторні стимули: ревізія Директиви про енергетичну ефективність будівель та національні стратегії (цільові показники по реноваціях, стимулювання теплових насосів) створюють ринкові умови для розвитку 4GDH/5GDH [18–22];
- фінансові механізми: пільгове кредитування, гарантії та гранти з боку ЄС та міжнародних банків сприяють реалізації дорогих капітальних проєктів (розвиток Mijntwater за підтримки європейських інструментів) [23–27];
- інноваційні елементи: впровадження цифрових платформ, відкритих стандартів обміну даними, інтеграція локальних енергетичних ринків та експериментальні технологічні рішення (гібридні джерела, геотермальні системи, інтелектуальні теплові пункти) [28–32].

3. Перспективи масштабування 5GDH:

- техніко-економічні фактори: 5GDH добре підходять для нових забудов або районів з високим ступенем реконструкції, де можна відразу реалізувати низькотемпературні кінцеві системи. Масштабування в старій

забудові вимагає значних інвестицій у внутрішні системи опалення та ізоляцію будівель;

- ключові драйвери: наявність стабільних низькопотенційних джерел (шахтні води, дата-центри, промислові скидні тепла), доступність фінансування для реконструкції, а також стандартизація обладнання та підходів;

- обмеження: потреба в уніфікації технічних стандартів, побудові ринків для надлишкового тепла та розвиненій системі тарифікації послуг.

4. Потенціал та умови впровадження в Україні [33]:

- потенціал: велика система централізованого теплопостачання у містах, значна частка промислових підприємств, можливості біомаси та сонячної теплової енергії, а також наявність регіонів з підземними водними ресурсами дають основу для впровадження як 4GDH, так і окремих 5GDH-рішень;

- необхідні умови: оновлення фізично зношеної інфраструктури, програми масової реновації будівель, створення фінансових інструментів та державних стимулів, розробка регуляторних механізмів для оплати надлишкового тепла й адаптації тарифних схем;

- стратегічні кроки: розгорнути пілотні проєкти в регіонах із високим потенціалом (термічні скидні підприємств, міста з інфраструктурою шахт), інтегрувати відбудову інфраструктури з енергетичною модернізацією та використовувати міжнародні фонди відновлення.

Питання для самоконтролю

1. Що таке 4GDH та 5GDH і чим вони відрізняються від попередніх поколінь теплопостачання?

2. Які джерела тепла та охолодження використовуються в 4GDH та 5GDH?

3. Як низькотемпературні та двонапрямні мережі підвищують ефективність і гнучкість теплопостачання?

4. Які технологічні рішення та інновації використовуються в 4GDH і 5GDH для управління та оптимізації мереж?

5. Які економічні, соціальні та екологічні переваги від впровадження 4GDH і 5GDH?

6. Які технічні, інвестиційні та регуляторні бар'єри стримують розвиток 4GDH і 5GDH?

7. Який європейський та український досвід впровадження 4GDH/5GDH і які перспективи їх масштабування в Україні?

6 ІНТЕГРАЦІЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

6.1 Технологічні рішення інтеграції ВДЕ в централізовані та децентралізовані системи теплопостачання

Сучасні тенденції енергетики спрямовані на зменшення використання викопного палива та підвищення частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у теплопостачанні. Інтеграція ВДЕ у системи централізованого та децентралізованого теплопостачання дозволяє підвищити енергоефективність, зменшити викиди CO₂ і забезпечити більш стійке енергопостачання. Вибір технології інтеграції залежить від масштабу системи, кліматичних умов, доступності ресурсів та вимог до надійності.

6.1.1 Сонячні теплові колектори

Сонячні колектори перетворюють сонячну енергію на теплову, яка може використовуватись для опалення та гарячого водопостачання.

Технологічні рішення інтеграції:

1. Централізовані системи:

- сонячні поля підключаються до центральних теплових пунктів (ТТП) через теплоносієві магістралі;
- використовуються акумулюючі ємності для накопичення надлишкової теплової енергії протягом сонячного дня;
- інтеграція з котельнями забезпечує покриття пікових потреб у холодні періоди.

2. Децентралізовані системи:

- колектори встановлюються безпосередньо на дахах будівель або біля них;
- використовуються невеликі буферні баки для зберігання тепла на кілька годин;
- можливе комбінування з тепловими насосами для підвищення температури теплоносія.

Переваги:

- зниження витрат на традиційне паливо;
- високий потенціал у сонячних регіонах.

Обмеження:

- сезонна та добова залежність від інсоляції;
- потреба у системах акумулювання тепла та резервному опаленні.

6.1.2 Теплові насоси

Теплові насоси переносять тепло від низькотемпературного джерела (повітря, ґрунт, вода) до системи опалення чи гарячого водопостачання.

Технологічні рішення інтеграції:

1. Централізовані системи:

- використання великомасштабних водяних або ґрунтових теплових насосів у теплових пунктах;
- підвищення температури теплоносія до потрібного рівня для мереж централізованого опалення (до 70–80 °С) через низькотемпературні контури + буферні ємності;
- комбінування з когенераційними установками для покриття пікових навантажень.

2. Децентралізовані системи:

- можливість автономного опалення невеликих будинків або кварталів;
- повітряні теплові насоси простіші у встановленні, але мають знижену ефективність при низьких температурах;
- геотермальні теплові насоси забезпечують стабільну ефективність протягом року.

Переваги:

- висока енергоефективність (коефіцієнт COP від 3 до 5);
- можливість комбінованого використання з іншими ВДЕ.

Обмеження:

- потреба у високоякісних теплообмінниках і контролі температури;
- значні інвестиції при великій потужності.

6.1.3 Біоенергетичні установки

Використання біомаси (пелети, деревні відходи, солома) для виробництва тепла через спалювання або газифікацію.

Технологічні рішення інтеграції:

1. Централізовані системи:

- біомасові котельні забезпечують теплом великі райони міста;
- використання акумулюючих ємностей для стабілізації температури і покриття пікових навантажень;
- можливе комбінування з газовими котлами для забезпечення безперебійної роботи.

2. Децентралізовані системи:

- малопотужні котли на пелетах або дровах для окремих будинків чи котеджів;

– використання автоматизованих систем подачі палива та контролю температури для оптимальної роботи.

Переваги:

- використання локальної біомаси з низьким вуглецевим слідом;
- стабільне теплопостачання незалежно від погодних умов.

Обмеження:

- необхідність зберігання біомаси;
- викиди пилу і продуктів горіння потребують відповідного очищення.

6.1.4 Геотермальні джерела

Використання тепла земної кори для опалення та охолодження будівель.

Технологічні рішення інтеграції:

1. Централізовані системи:

- встановлення великих вертикальних або горизонтальних геотермальних полів для теплових пунктів;
- підключення до низькотемпературної мережі 4GDH (Fourth Generation District Heating);
- інтеграція з акумулюючими ємностями для вирівнювання навантажень.

2. Децентралізовані системи:

- вертикальні або горизонтальні геотермальні свердловини під будинками;
- підключення до місцевих теплових насосів для підвищення температури.

Переваги:

- стабільне джерело тепла протягом року;
- висока енергоефективність і низькі експлуатаційні витрати.

Обмеження:

- високі капітальні витрати на буріння свердловин;
- обмеженість у місцях з низьким геотермальним потенціалом.

6.1.5 Основні підходи до інтеграції ВДЕ

1. Комбіновані системи:

- використання кількох ВДЕ одночасно для підвищення надійності та зменшення сезонної залежності;
- наприклад, СТК + тепловий насос + біокотельня.

2. Акумуляція тепла:

- необхідна для вирівнювання добових та сезонних коливань виробництва та споживання тепла;

- використовуються буферні ємності, підземні акумулятори або водні резервуари.

3. Модернізація мереж:

- перехід на низькотемпературні системи 4GDH/5GDH для підвищення ефективності ВДЕ;
- використання автоматизованих систем управління для оптимізації роботи.

Отже, інтеграція ВДЕ у централізовані та децентралізовані системи теплопостачання є ключовим фактором декарбонізації та підвищення енергоефективності. Технологічні рішення мають враховувати локальні умови, тип джерела та потреби споживачів. Оптимальна інтеграція досягається через комбіновані системи, акумуляцію тепла та сучасні системи управління.

6.2 Моделювання, оптимізація та управління системами теплопостачання з високою часткою ВДЕ

Зростаюча інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у теплопостачання ставить нові виклики щодо прогнозування, управління та оптимізації систем. ВДЕ відзначаються високою варіабельністю виробництва (сонячна і вітрова енергія), що потребує застосування сучасних методів моделювання, цифрового управління та використання гібридних рішень для забезпечення надійності та ефективності.

1. Моделювання систем теплопостачання.

1.1 Мета моделювання:

- аналіз енергетичних потоків, визначення ефективності систем;
- оцінка впливу інтеграції ВДЕ на роботу мереж;
- підтримка ухвалення рішень щодо оптимальної конфігурації та управління.

1.2 Основні підходи:

- аналітичні моделі – дозволяють швидко оцінити енергетичний баланс і втрати тепла в мережі, підходять для попереднього проєктування;
- чисельні моделі – використовують розв'язання диференціальних рівнянь теплового потоку для детального прогнозування динаміки системи;
- імітаційні моделі – моделювання поведінки системи за різних сценаріїв попиту і виробництва, включно з випадковими коливаннями ВДЕ.

1.3 Енергетичний баланс:

- включає облік виробництва тепла з різних джерел (котельні, теплові насоси, СТК, біокотельні);
- оцінює втрати у теплових мережах і буферних ємностях;

– слугує основою для оптимізації роботи системи та планування резервного опалення.

2. Гібридні системи теплопостачання.

Гібридні системи поєднують кілька джерел тепла – ВДЕ та традиційні котельні – для забезпечення стабільного та ефективного теплопостачання.

Приклади конфігурацій:

- сонячні колектори + котли на біомасі;
- теплові насоси + газові котли для пікових навантажень;
- геотермальні джерела + акумуляція тепла.

Особливості управління:

- оптимізація роботи джерел у реальному часі;
- врахування прогнозованого попиту та наявної кількості відновлюваної енергії;
- зменшення використання викопного палива та підвищення загальної ефективності системи.

3. Цифрові платформи управління.

Роль цифрових платформ:

- моніторинг роботи системи в режимі реального часу;
- управління роботою джерел тепла та акумулюючих ємностей;
- підтримка інтеграції ВДЕ з мінімізацією ризику нестачі тепла.

Функції сучасних платформ:

- прогнозування попиту: використання погодних даних, історичних профілів споживання та алгоритмів машинного навчання;
- оптимізація режимів роботи: алгоритми розподілу тепла між джерелами для мінімізації витрат палива та максимізації використання ВДЕ;
- виявлення несправностей і аналітика: раннє виявлення аномалій в мережі, що зменшує ризик аварійних ситуацій.

Технології: SCADA, IoT-сенсори, платформи на базі цифрових двійників (Digital Twin), штучний інтелект для оптимізації.

4. Прогнозування попиту та управління ВДЕ.

Прогнозування попиту:

- використовується для планування роботи теплових пунктів і гібридних систем;
- методи: статистичні моделі, алгоритми машинного навчання, нейронні мережі;
- прогнози враховують погодні умови, сезонні коливання, добовий графік споживання.

Управління з високою часткою ВДЕ:

- реалізація стратегії «перш за все ВДЕ», коли максимізується використання сонячного та геотермального тепла;
- використання буферних ємностей та систем акумуляції для вирівнювання дисбалансів;
- динамічне перемикавання на резервні джерела при зменшенні виробництва від ВДЕ.

Переваги інтегрованого управління:

- підвищення частки ВДЕ в загальному енергобалансі;
- зниження викидів CO₂;
- економія витрат на паливо та енергію.

5 Підсумки та рекомендації.

- моделювання систем теплопостачання з високою часткою ВДЕ дозволяє прогнозувати і планувати роботу мережі ефективно;
- гібридні конфігурації забезпечують надійність при мінливому виробництві від ВДЕ;
- цифрові платформи і алгоритми прогнозування є ключем до оптимального управління і інтеграції ВДЕ;
- використання енергетичних балансів та систем акумуляції тепла дозволяє зменшити залежність від традиційних джерел і підвищити стійкість системи.

6.3 Акумулювання теплової енергії

Відновлювані джерела енергії (сонячна теплова енергія, геотермія, низькопотенційне тепло для теплових насосів, біоенергетика) характеризуються невідповідністю між моментом генерації та моментом споживання тепла. Саме тому акумулювання теплової енергії (Thermal Energy Storage, TES) є критично важливим елементом сучасних і перспективних систем теплопостачання, особливо систем 4-го та 5-го поколінь з високою часткою ВДЕ.

Акумулювання дозволяє:

- підвищити коефіцієнт використання ВДЕ;
- зменшити пікові навантаження на джерела тепла;
- стабілізувати роботу теплових мереж;
- інтегрувати сезонні та стохастичні джерела енергії.

1. Класифікація систем акумулювання теплової енергії.

За тривалістю зберігання теплові акумулятори поділяються на:

- короткострокові (хвилини – години);
- середньострокові (доба – кілька діб);

- довгострокові та сезонні (тижні – місяці).

За фізичним принципом:

- акумулювання чутливої теплоти;
- акумулювання прихованої теплоти (фазовий перехід);
- термохімічне акумулювання (перспективний напрям).

2. *Короткострокові теплові акумулятори.*

Призначені для згладжування добових коливань теплового навантаження та стабілізація роботи джерел тепла.

Основні типи:

- водяні буферні ємності;
- теплоакумуляційні баки у теплових пунктах;
- внутрішні акумулятори в теплових насосах.

Технологічні особливості:

- базуються на акумулюванні чутливої теплоти води;
- працюють у температурному діапазоні 30–95 °С;
- характеризуються високою надійністю та простотою експлуатації.

Роль у системах з ВДЕ:

- накопичення надлишкового сонячного тепла;
- оптимізація циклів роботи теплових насосів;
- зменшення кількості пусків резервних котлів.

3. *Довгострокові та сезонні системи акумулювання.*

Призначені для перенесення теплової енергії з періоду надлишкового виробництва (літо) у період пікового споживання (зима).

Основні типи сезонних акумуляторів:

3.1 Великі водяні резервуари (PTES)

- наземні або підземні резервуари об'ємом десятки – сотні тисяч м³;
- застосовуються у централізованих системах теплопостачання;
- ефективні для інтеграції великих сонячних теплових полів.

3.2 Ґрунтові акумулятори (BTES):

- система свердловин з циркуляцією теплоносія;
- використовується масив ґрунту як теплоакумулююче середовище;
- висока тепла інерція та довгий час зберігання.

3.3 Акумулятори у водоносних горизонтах (ATES)

- використання природних підземних вод;
- висока густина акумульованої енергії;
- вимагають детального гідрогеологічного аналізу.

Переваги сезонного зберігання:

- різке зростання частки ВДЕ в річному балансі;

- зменшення встановленої потужності пікових джерел;
- підвищення енергетичної незалежності систем.

4 Матеріали з фазовим переходом (PCM).

Акумулювання тепла відбувається завдяки прихованій теплоті плавлення або кристалізації матеріалу при практично постійній температурі.

Типи PCM:

- органічні (парафіни, жирні кислоти);
- неорганічні (соляні гідрати);
- евтектичні суміші.

Переваги PCM:

- висока густина акумульованої енергії;
- стабільна температура тепловіддачі;
- компактність порівняно з водяними акумуляторами.

Обмеження:

- відносно висока вартість;
- деградація властивостей при багаторазових циклах;
- складність теплообміну.

Застосування:

- локальні системи опалення та ГВП;
- будівельні конструкції з підвищеною теплоінерційністю;
- перспективні рішення для низькотемпературних мереж 5GDH.

5. Роль акумулювання у системах теплопостачання з високою часткою ВДЕ.

Акумулятори тепла виконують системоутворювальну функцію, забезпечуючи:

- баланс між генерацією та споживанням;
- підвищення гнучкості гібридних систем;
- можливість впровадження прогнозного та оптимізаційного управління;
- інтеграцію теплопостачання з електроенергетикою (Power-to-Heat).

Особливо важливою є роль акумулювання у:

- сонячних теплових системах;
- теплових насосах з електричним живленням;
- низькотемпературних теплових мережах нового покоління.

Висновки:

- акумулювання теплової енергії є ключовим чинником декарбонізації теплопостачання;
- короткострокові акумулятори забезпечують стабільність роботи системи, сезонні – стратегічну ефективність;

- матеріали з фазовим переходом є перспективним напрямом для компактних і низькотемпературних рішень;
- поєднання акумулювання, цифрового управління та ВДЕ формує основу теплопостачання майбутнього.

6.4 Економічна, екологічна та нормативна оцінка впровадження ВДЕ в системи теплопостачання

Перехід систем теплопостачання до високої частки відновлюваних джерел енергії є не лише технічним, а передусім економіко-регуляторним викликом. Навіть технологічно досконалі рішення не можуть бути реалізовані без обґрунтованої економіки, підтвердженого екологічного ефекту та відповідності нормативній базі. Для наукових досліджень і прикладних проєктів ключовим є інтегральний підхід до оцінки доцільності впровадження ВДЕ.

1. Економічна оцінка: концепція LCOH.

1.1. Рівнева вартість тепла (LCOH).

Levelized Cost of Heat (LCOH) – це інтегральний показник, який відображає середню приведену вартість виробництва одиниці теплової енергії протягом життєвого циклу установки.

LCOH враховує:

- капітальні витрати (CAPEX);
- експлуатаційні витрати (OPEX);
- витрати на паливо або електроенергію;
- строк служби обладнання;
- ставку дисконту.

На відміну від тарифного аналізу, LCOH дозволяє:

- коректно порівнювати різні технології;
- оцінювати довгострокову ефективність ВДЕ;
- обґрунтовувати інвестиційні рішення без прив'язки до короткострокових цін.

1.2. Особливості LCOH для ВДЕ.

Для систем з ВДЕ характерні:

- високі початкові інвестиції;
- низькі або нульові паливні витрати;
- зниження фінансових ризиків у довгостроковій перспективі.

Це означає, що:

- економічна конкурентоспроможність ВДЕ зростає зі збільшенням строку аналізу;

- ключовим фактором є доступ до дешевого фінансування;
- політика держави істотно впливає на результат через ставки кредитування та гарантії.

2. Екологічна оцінка та скорочення викидів CO₂.

2.1. Вуглецевий слід теплопостачання.

Оцінка екологічної ефективності ВДЕ базується на:

- прямих викидах (відсутні або мінімальні);
- непрямих викидах (виробництво електроенергії, обладнання);
- повному життєвому циклі (LCA).

Для аспірантських досліджень важливо:

- розрізняти локальні та системні ефекти;
- враховувати зміну структури енергобалансу;
- уникати спрощених «нульових» оцінок.

2.2. Ефект декарбонізації.

Впровадження ВДЕ у теплопостачанні:

- безпосередньо знижує викиди CO₂ у секторі будівель;
- опосередковано зменшує навантаження на електроенергетику;
- сприяє виконанню кліматичних зобов'язань держав.

З наукової точки зору важливим є:

- порівняння базового сценарію (fossil-based);
- маржинальний аналіз з урахуванням заміщення джерел;
- оцінка ефекту на рівні міста або регіону.

3. Політика та регулювання: ЄС і Україна.

3.1. Європейський контекст.

Політика ЄС у сфері теплопостачання базується на:

- кліматичній нейтральності до 2050 року;
- пріоритеті енергоефективності;
- стимулюванні ВДЕ в системах централізованого теплопостачання.

Ключові регуляторні принципи:

- внутрішня ціна на вуглець;
- інтеграція теплового сектора в енергетичне планування;
- підтримка низькотемпературних мереж.

3.2. Український контекст.

Для України характерні:

- висока залежність теплопостачання від природного газу;
- значний потенціал ВДЕ;
- поступова гармонізація з європейським законодавством.

Нормативні виклики:

- тарифна інерція;
- обмежена інвестиційна привабливість;
- недостатня інтеграція теплопостачання в кліматичну політику.

Водночас ВДЕ у теплопостачанні:

- підвищують енергетичну безпеку;
- знижують імпортозалежність;
- мають стратегічне значення у відбудові інфраструктури.

4. Бар'єри впровадження ВДЕ.

4.1. Економічні бар'єри.

- висока капіталомісткість проєктів;
- обмежений доступ до фінансування;
- короткий горизонт тарифного регулювання.

4.2. Інституційні бар'єри.

- фрагментованість відповідальності;
- недостатня спроможність муніципалітетів;
- відсутність довгострокового планування теплопостачання.

4.3. Регуляторні бар'єри.

- негнучкі тарифні моделі;
- недостатнє врахування екологічних вигод;
- складні дозвільні процедури.

5. Стимули та механізми розвитку.

5.1. Економічні стимули.

- пільгове кредитування;
- грантові програми;
- гарантії походження тепла з ВДЕ.

5.2. Регуляторні стимули.

- довгострокові тарифи;
- включення CO₂-фактора в економічні розрахунки;
- обов'язкове планування теплопостачання на місцевому рівні.

5.3. Системні стимули.

- інтеграція теплового сектора в кліматичну політику;
- поєднання теплопостачання з програмами енергоефективності

будівель;

- розвиток ринку теплових послуг.

Отже:

— впровадження ВДЕ у теплопостачанні має бути обґрунтоване не лише технічно, а й економічно та нормативно;

- LCON є базовим інструментом порівняльної оцінки технологій;
- екологічний ефект повинен оцінюватися на основі життєвого циклу;
- регуляторна стабільність і довгострокові стимули є вирішальними для масштабування ВДЕ;
- для України ВДЕ у теплопостачанні є елементом не лише кліматичної, а й безпекової політики.

Питання для самоконтролю

1. Які технічні обмеження та переваги інтеграції різних видів ВДЕ (сонячна теплова енергія, біомаса, геотермія, теплові насоси) у централізовані системи теплопостачання?
2. Як частка відновлюваних джерел енергії впливає на надійність, гнучкість та ефективність систем теплопостачання?
3. Яку роль відіграють системи акумулювання теплової енергії у забезпеченні балансу між генерацією тепла з ВДЕ та тепловим навантаженням?
4. Які методи математичного моделювання та оптимізації доцільно застосовувати для проєктування гібридних систем теплопостачання з ВДЕ?
5. Як інтеграція ВДЕ змінює економічні показники систем теплопостачання (LCON, CAPEX, OPEX) порівняно з традиційними джерелами тепла?
6. Які екологічні ефекти (зменшення викидів CO₂, локальних забруднювачів) досягаються при впровадженні ВДЕ у теплопостачанні, та як їх коректно оцінювати?
7. Які нормативно-правові, інституційні та інфраструктурні бар'єри стримують широке впровадження ВДЕ в системах теплопостачання в Україні та ЄС?

7 ТЕПЛОВІ НАСОСИ ТА ГІБРИДНІ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

7.1 Класифікація теплових насосів та джерела низькопотенційної теплоти

Фундаментальною особливістю теплових насосів є використання низькопотенційної теплоти, яка в традиційних енергетичних системах розглядається як втрачена або непридатна для корисного використання. Саме характер джерела теплоти визначає конструкцію теплового насоса, його експлуатаційні режими, просторові обмеження та інтеграційний потенціал у системи теплопостачання різного масштабу.

Для аспірантських досліджень важливо розглядати теплові насоси не як окремі агрегати, а як інструмент утилізації розсіяної теплоти навколишнього середовища та техногенних процесів.

1. Принцип класифікації за джерелом низькопотенційної теплоти.

Класифікація теплових насосів ґрунтується на фізичній природі джерела теплоти, з якого відбирається енергія:

- атмосферне повітря;
- ґрунт та геологічне середовище;
- природні та техногенні водні середовища;
- вторинні та скидні теплові потоки.

Кожне з цих джерел має специфічні:

- температурні рівні;
- просторову локалізацію;
- сезонну стабільність;
- екологічні та інженерні обмеження.

2. Повітряні теплові насоси як джерело атмосферної теплоти.

2.1. Характеристика джерела.

Атмосферне повітря є:

- повсюдно доступним;
- невичерпним ресурсом;
- джерелом з високою температурною мінливістю.

Температурний потенціал повітря істотно залежить від:

- кліматичних умов;
- добових та сезонних коливань;
- локальних метеорологічних факторів.

2.2. Інженерні особливості.

- відбір теплоти здійснюється через повітряні теплообмінники;
- ускладнені режими обмерзання при низьких температурах;
- необхідність регулювання повітряного потоку та розморожування.

2.3. Системне значення.

Повітряні теплові насоси доцільно розглядати як:

- гнучке джерело для децентралізованих систем;
- елемент перехідних рішень;
- доповнення до інших, стабільніших джерел теплоти.

3. *Ґрунтові теплові насоси та тепло геологічного середовища.*

Фізична природа джерела.

Ґрунт характеризується:

- значною теплоємністю;
- температурною стабільністю;
- інерційністю теплових процесів.

На глибинах нижче зони сезонних коливань температура ґрунту є майже сталою, що створює надійне низькопотенційне джерело теплоти.

Типи ґрунтових теплообмінників.

- горизонтальні ґрунтові контури;
- вертикальні свердловини;
- енергетичні палі та фундаментні елементи.

Наукові аспекти.

Для аспірантів ключовими є:

- термодинаміка теплового відбору з масиву ґрунту;
- довгострокова тепла взаємодія ґрунт-система;
- питання теплового виснаження та регенерації ґрунту.

4. *Водяні теплові насоси та тепло водних середовищ.*

4.1. Природні водні джерела.

До них належать:

- річки та озера;
- підземні водоносні горизонти;
- морські та прибережні води.

Вода має:

- вищу теплопровідність порівняно з повітрям;
- менші температурні коливання;
- високий потенціал теплообміну.

4.2. Техногенні водні джерела.

- системи охолодження промислових об'єктів;
- зворотні мережні води;
- теплі стоки.

4.3. Обмеження.

- екологічні нормативи;

- сезонні гідрологічні зміни;
- вимоги до водопідготовки та фільтрації.

5. Використання вторинного та скидного тепла.

5.1. Вторинна теплота – це енергія, що:

- утворюється як побічний продукт технологічних процесів;
- не використовується у первинному циклі;
- зазвичай розсіюється в навколишнє середовище.

Джерела вторинного тепла:

- промислові процеси;
- системи вентиляції;
- дата-центри;
- транспортна інфраструктура.

5.2. Скидне тепло характеризується:

- локальною концентрацією;
- відносно стабільним графіком;
- високим потенціалом для централізованих систем.

Особливо перспективним є:

- тепло стічних вод;
- тепло повітря, що видаляється з будівель;
- тепло технологічного охолодження.

6. Системна роль теплових насосів.

Теплові насоси дозволяють:

- підвищити температурний рівень скидного тепла;
- інтегрувати його в системи опалення та ГВП;
- перетворити втрати енергії на корисний ресурс.

З наукової точки зору це:

- змінює уявлення про енергетичні баланси міст;
- розширює межі ВДЕ шляхом утилізації техногенного тепла;
- створює основу для циркулярної енергетики.

7. Порівняльний потенціал джерел низькопотенційної теплоти.

Для наукового аналізу важливо оцінювати джерела за такими критеріями:

- температурний рівень;
- стабільність у часі;
- густина енергетичного потоку;
- просторову доступність;
- екологічні обмеження.

Вторинне тепло часто має вищу системну цінність, ніж природні джерела, оскільки:

- вже зосереджене в міському середовищі;
- не потребує великих земельних ресурсів;
- зменшує теплове навантаження на довкілля.

8. Висновки.

- джерело низькопотенційної теплоти є визначальним фактором для вибору типу теплового насоса;
- повітря, ґрунт і вода мають різну фізичну та експлуатаційну природу;
- вторинне та скидне тепло є стратегічним ресурсом для декарбонізації теплопостачання;
- теплові насоси виступають ключовим інструментом трансформації енергетичних витрат у корисну енергію;
- для аспірантських досліджень особливо перспективним є аналіз техногенних джерел теплоти в урбанізованих системах.

7.2 Показники енергетичної та сезонної ефективності теплових насосів

Ефективність теплового насоса не може бути охарактеризована одним універсальним числом. На практиці вона є змінною у часі, залежною від режимів роботи та характеристик системи теплопостачання. Тому для наукового аналізу та коректного порівняння різних рішень застосовується система показників, серед яких ключовими є COP, SCOP та SPF. Їх правильна інтерпретація є критично важливою для оцінки реальної енергетичної результативності теплових насосів.

1. COP як миттєвий показник ефективності.

1.1. Фізичний зміст COP.

Coefficient of Performance (COP) визначається як відношення корисної теплової потужності, переданої споживачу, до електричної потужності, спожитої тепловим насосом у конкретний момент часу.

COP є:

- точковою характеристикою;
- функцією температур джерела і споживача;
- параметром, придатним для аналізу робочих режимів, але не для річної оцінки.

1.2. Обмеження використання COP.

Для аспірантських досліджень принципово важливо усвідомлювати, що:

- паспортні значення COP отримуються за стандартних умов;
- реальні експлуатаційні умови суттєво відрізняються;

- COP не враховує часткові навантаження та циклічність роботи.

Таким чином, COP не може бути використаний як єдиний критерій ефективності системи тепlopостачання.

2. SCOP як сезонний показник.

2.1. Сутність SCOP.

Seasonal Coefficient of Performance (SCOP) є усередненим показником ефективності за опалювальний сезон і враховує:

- зміну зовнішніх температур;
- варіацію теплового навантаження;
- роботу системи у часткових режимах.

SCOP дозволяє:

- оцінити реальну енергетичну доцільність теплового насоса;
- порівнювати різні технології в однакових кліматичних умовах;
- обґрунтовувати вибір температурних режимів системи.

2.2. Методичні аспекти розрахунку SCOP

Розрахунок SCOP базується на:

- бін-методі температур зовнішнього повітря;
- зважуванні ефективності за часом роботи;
- урахуванні допоміжних енергоспоживачів.

Для наукових робіт важливо:

- чітко вказувати кліматичну зону;
- визначати температурні графіки системи;
- уникати перенесення стандартних значень без адаптації.

3. SPF як системний показник ефективності.

3.1. Поняття SPF.

Seasonal Performance Factor (SPF) відображає відношення сумарної теплової енергії, відпущеної системою тепlopостачання, до загального електроспоживання всієї системи за сезон або рік.

SPF враховує:

- тепловий насос;
- циркуляційні насоси;
- допоміжні електричні нагрівачі;
- автоматику та допоміжне обладнання.

3.2. Переваги SPF для наукового аналізу.

SPF:

- відображає реальну ефективність системи в цілому;
- є найбільш коректним показником для порівняння різних конфігурацій;
- дозволяє оцінити вплив системних втрат і неідеальностей.

Для дисертаційних досліджень SPF є ключовим інтегральним критерієм.

4. Вплив температурних режимів на ефективність.

4.1. Температура джерела теплоти.

Підвищення температури низькопотенційного джерела:

- зменшує компресорну роботу;
- підвищує COP і SCOP;
- стабілізує робочі режими.

Нестабільні джерела спричиняють:

- коливання ефективності;
- зростання зносу обладнання;
- зниження SPF.

4.2. Температура системи теплопостачання.

Ефективність теплового насоса різко знижується зі зростанням температури подачі теплоносія.

Зниження температурного рівня системи:

- підвищує сезонну ефективність;
- дозволяє працювати ближче до оптимальних режимів;
- зменшує втрати у допоміжних компонентах.

5. Вплив характеристик системи теплопостачання.

5.1. Тип системи опалення.

Різні системи мають різні вимоги до температури:

- низькотемпературні системи забезпечують вищий SPF;
- високотемпературні системи потребують компромісних рішень.

5.2. Гідравлічні та регульовальні аспекти.

- неправильне балансування знижує ефективність;
- надмірні витрати електроенергії насосами зменшують SPF;
- некоректні алгоритми керування призводять до циклічності роботи.

6. Інтерпретація показників у наукових дослідженнях.

Для коректного використання COP, SCOP і SPF у дисертаційних роботах необхідно:

- чітко визначати межі системи;
- вказувати умови вимірювання або моделювання;
- аналізувати чутливість показників до температурних режимів;
- уникати прямого порівняння показників, отриманих за різними методиками.

Висновки:

- COP є корисним для аналізу миттєвих режимів, але недостатнім для оцінки системи;

- SCOP дозволяє оцінити сезонну ефективність з урахуванням клімату;
- SPF є найбільш репрезентативним показником реальної ефективності;
- температурні режими та характеристики системи теплопостачання мають вирішальний вплив на всі показники ефективності;
- коректна інтерпретація показників є необхідною умовою наукової обґрунтованості результатів.

7.3 Принципи побудови гібридних систем теплопостачання на основі теплових насосів

Гібридні системи теплопостачання з тепловими насосами є відповіддю на обмеження монотехнологічних рішень. Тепловий насос забезпечує високу енергоефективність, але має обмеження за потужністю, температурним рівнем та надійністю в екстремальних умовах. Тому у практичних системах він функціонує у структурно організованій комбінації з іншими джерелами теплової енергії, де вирішальним є не вибір обладнання, а логіка його взаємодії.

1. Концепція базового та пікового навантаження.

1.1. Розподіл теплового навантаження.

Сукупне теплове навантаження системи має змінний характер і складається з:

- базової складової, присутньої протягом більшої частини опалювального періоду;
- пікової складової, що виникає за екстремальних умов.

У гібридних системах:

- тепловий насос орієнтується на базове навантаження;
- пікове навантаження покривається допоміжними джерелами.

1.2. Критерії вибору базового джерела.

Тепловий насос як базове джерело обирається через:

- стабільну високу сезонну ефективність;
- мінімальні змінні витрати;
- можливість тривалої роботи без частих пусків.

Оптимальна встановлена потужність теплового насоса зазвичай становить:

- менше максимального теплового навантаження;
- достатню для покриття основної частини річного теплового балансу.

2. Покриття пікових навантажень.

2.1. Джерела пікового тепла.

Для пікових режимів використовуються:

- традиційні котли;

- електричні догрівачі;
- інші високопотужні, але менш ефективні джерела.

Їхня роль:

- короткочасна робота;
- забезпечення необхідного температурного рівня;
- гарантування безперервності теплопостачання.

2.2. Стратегії залучення пікового джерела.

Пікове джерело активується:

- при зниженні температури зовнішнього середовища;
- при перевищенні теплового навантаження над можливостями ТН;
- у разі обмеження електричної потужності.

Для аспірантських досліджень важливо:

- аналізувати тривалість пікових режимів;
- мінімізувати їх частку в річному балансі;
- оцінювати вплив пікових джерел на загальну ефективність.

3. Резервування та надійність системи.

3.1. Типи резервування.

Гібридні системи забезпечують надійність завдяки:

- технологічному резервуванню (різні типи джерел);
- потужному резервуванню (надлишок встановленої потужності);
- функціональному резервуванню (різні режими роботи).

3.2. Роль теплового насоса в резервних режимах.

Тепловий насос може:

- працювати у зниженому режимі при аваріях;
- відновлювати роботу після збоїв без повного зупинення системи;
- забезпечувати мінімально необхідне теплопостачання.

4. Архітектура гібридної системи.

4.1. Паралельна та послідовна інтеграція:

- паралельна схема дозволяє незалежну роботу джерел;
- послідовна схема забезпечує поетапне підвищення температури.

Вибір архітектури визначається:

- температурним графіком;
- вимогами до гнучкості;
- характером теплових навантажень.

4.2. Гідравлічна розв'язка.

Гібридні системи потребують:

- гідравлічного розділення контурів;
- стабілізації витрат;

- уникнення взаємного впливу джерел.

Для аспірантів важливо розуміти, що гідравліка є таким самим критичним елементом, як і алгоритм керування.

5. Алгоритми керування гібридними системами.

5.1. Ієрархічне керування.

Керування гібридною системою здійснюється на кількох рівнях:

- локальне керування агрегатами;
- координація джерел тепла;
- системна оптимізація.

5.2. Логіка пріоритетів.

Типові принципи:

- пріоритет теплового насоса у базових режимах;
- обмеження кількості пусків допоміжних джерел;
- мінімізація переходів між режимами.

5.3. Перехідні та аварійні режими.

Алгоритми повинні:

- коректно обробляти швидкі зміни навантаження;
- забезпечувати плавний перехід між джерелами;
- уникати коливальних режимів.

6. Методологічні аспекти для наукових досліджень:

- розглядати гібридну систему як єдину динамічну структуру;
- аналізувати вплив керування на ефективність і надійність;
- оцінювати чутливість системи до параметрів керування.

Саме алгоритми взаємодії, а не окремі технології, визначають успішність гібридних рішень.

Висновки:

- гібридні системи дозволяють поєднати ефективність теплових насосів із надійністю традиційних джерел;
- чіткий поділ базового та пікового навантаження є основою проектування;
- резервування повинно бути закладене на архітектурному рівні;
- алгоритми керування відіграють ключову роль у стабільності та ефективності системи;
- для наукових досліджень особливо цінним є аналіз керування та перехідних режимів.

7.4 Інтеграція теплових насосів з традиційними та відновлюваними джерелами тепла

Інтеграція теплових насосів у багатоджерельні системи теплопостачання розглядається не як просте додавання нового обладнання, а як формування енергоінтегрованої системи, у якій тепла та електрична підсистеми взаємодіють у часі та просторі. Ефективність такої системи визначається не окремими ККД компонентів, а узгодженістю температурних рівнів, часових профілів генерації та можливостей акумулювання.

1. Інтеграція теплових насосів з котельними установками.

1.1. Температурна комплементарність.

Традиційні котельні установки працюють ефективно в зоні високих температур теплоносія, тоді як теплові насоси демонструють найкращі показники при низькотемпературних режимах. Інтеграція базується на:

- розділенні температурних рівнів у системі;
- живленні різних контурів (радіаторного, підігріву ГВП, вентиляції)

різними джерелами;

- використанні котлів як догрівачів у високотемпературних точках.

1.2. Режими взаємодії.

Можливі режими:

- каскадний нагрів теплоносія;
- підживлення зворотного трубопроводу;
- локальне догрівання споживачів з підвищеними температурними

вимогами.

Для аспірантів важливо розуміти, що інтеграція відбувається на рівні теплових потоків, а не лише обладнання.

2. Поєднання теплових насосів із сонячними тепловими колекторами.

2.1. Теплова синергія.

Сонячні колектори забезпечують теплоту з низькою собівартістю, але мають змінний характер генерації. Тепловий насос у такій системі виконує функцію:

- стабілізатора теплового балансу;
- підвищувача температурного рівня;
- резервного джерела при нестачі сонячної енергії.

2.2. Спільне використання джерела теплоти.

Сонячні колектори можуть:

- підігрівати джерело низькопотенційної теплоти ТН;
- зменшувати температурний напір у компресорі;
- підвищувати сезонну ефективність системи.

Така інтеграція дозволяє розглядати сонячну енергію не лише як джерело теплоти для споживача, а як енергетичний підсилювач роботи теплового насоса.

3. Інтеграція з фотоелектричними системами.

3.1. Взаємозв'язок електричної та теплової підсистем.

Фотоелектричні системи генерують електроенергію у години максимального сонячного випромінювання, що часто не співпадає з піками теплового навантаження. Тепловий насос у цьому контексті:

- виступає керованим електричним споживачем;
- дозволяє трансформувати електроенергію в теплову форму;
- сприяє локальному використанню генерації.

3.2. Гнучкість навантаження.

Інтеграція ТН з ФЕ системами формує:

- можливість навмисного зміщення роботи у часі;
- зниження навантаження на зовнішні мережі;
- підвищення енергетичної автономності об'єкта.

Цей підхід є основою концепцій power-to-heat у тепlopостачанні.

4. Роль акумулювання теплової енергії в інтегрованих системах.

4.1. Акумулятор як інтеграційна ланка.

Тепловий акумулятор виконує функцію:

- роз'єднання у часі генерації та споживання;
- згладжування змінної роботи ВДЕ;
- забезпечення стабільної роботи теплового насоса.

4.2. Вплив акумулювання на інтеграцію джерел.

Наявність акумулятора дозволяє:

- максимально використовувати сонячну генерацію;
- збільшити тривалість роботи ТН у сприятливих режимах;
- мінімізувати частоту включення котлів.

Таким чином, акумулювання стає не допоміжним, а системоутворювальним елементом.

5. Системний підхід до інтеграції джерел тепла.

5.1. Енергетичні потоки замість окремих агрегатів.

У сучасному підході об'єктом аналізу є:

- енергетичні потоки;
- часові профілі;
- температурні рівні.

Тепловий насос виступає вузлом перетворення, що пов'язує різні джерела та споживачів.

5.2. Наукові завдання інтеграції.

Для аспірантських досліджень актуальними є:

- оптимізація взаємодії джерел з урахуванням акумулювання;
- оцінка системної ефективності інтегрованих схем;
- аналіз впливу інтеграції на стійкість теплопостачання.

Висновки:

- інтеграція теплових насосів із котельними, сонячними колекторами та ФЕ системами формує багаторівневі енергетичні зв'язки;
- ключову роль відіграє узгодження температурних і часових режимів;
- теплові акумулятори є центральним елементом ефективної інтеграції;
- системний підхід дозволяє розглядати тепловий насос як інтеграційний елемент між тепловою та електричною інфраструктурою;
- подальші наукові дослідження повинні зосереджуватись на взаємодії компонентів, а не на ізольованій оцінці обладнання.

Питання для самоконтролю

1. Які критерії визначають вибір типу теплового насоса (повітряний, ґрунтовий, водяний) для конкретної системи теплопостачання?
2. Як температурні рівні джерела та споживача тепла впливають на COP, SCOP і реальну сезонну ефективність теплових насосів?
3. У чому полягають принципові відмінності між моносистемами з тепловими насосами та гібридними системами теплопостачання?
4. Які схеми поєднання теплових насосів з традиційними котельними установками є найбільш ефективними для покриття пікових теплових навантажень?
5. Як інтеграція теплових насосів з відновлюваними джерелами електроенергії впливає на енергетичну та економічну ефективність системи теплопостачання?
6. Яка роль теплового акумулювання у підвищенні гнучкості та надійності гібридних систем з тепловими насосами?
7. Які наукові та інженерні виклики обмежують широке впровадження теплових насосів у високотемпературних системах централізованого теплопостачання?

8 СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

8.1 Короткотривале та довготривале теплове акумулювання

Теплове акумулювання – це процес накопичення теплової енергії з метою її подальшого використання у часі для узгодження між виробництвом, передачею та споживанням тепла. У сучасних системах теплопостачання акумулювання є ключовим інструментом підвищення енергоефективності, гнучкості та інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Залежно від тривалості зберігання теплоти розрізняють короткотривале та довготривале теплове акумулювання, що принципово відрізняються як за конструктивними рішеннями, так і за термодинамічними показниками.

1. Класифікація систем теплового акумулювання за тривалістю зберігання.

1.1 Короткотривале теплове акумулювання (Short-Term Thermal Energy Storage, STTES).

Тривалість зберігання: від кількох хвилин до 1–3 діб.

Основне призначення:

- згладжування пікових навантажень;
- компенсація добових коливань теплового споживання;
- оптимізація режимів роботи джерел тепла.

Типові об'єкти:

- акумуляційні баки в системах опалення;
- буферні ємності теплових насосів;
- бойлери непрямого нагріву для ГВП.

Характерні риси:

- відносно прості конструкції;
- високий ККД акумулювання;
- незначні теплові втрати при короткому періоді зберігання.

1.2 Довготривале теплове акумулювання (Long-Term / Seasonal TES, LTTES або STES).

Тривалість зберігання: від тижнів до кількох місяців (сезонне акумулювання).

Основне призначення:

- збереження надлишкового тепла (наприклад, влітку) для використання в опалювальний період;
- підвищення частки ВДЕ в тепловому балансі;
- зменшення потреби у пікових і резервних джерелах тепла.

Типові системи:

- ґрунтові акумулятори (BTES – Borehole TES);
- водяні резервуари великого об'єму (PTES – Pit TES);
- геотермальні акумуляційні системи.

Характерні риси:

- значні об'єми акумулюючого середовища;
- нижча середня температура зберігання;
- підвищені теплові втрати у часі;
- складніша інтеграція в енергосистему.

2. Чутливе теплове акумулювання.

2.1 Принцип дії.

Чутливе теплове акумулювання базується на зміні температури матеріалу без фазового переходу. Кількість накопиченої теплоти визначається залежністю:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T, \quad (8.1)$$

де m – маса матеріалу;

c – питома теплоємність;

ΔT – робочий температурний інтервал.

2.2 Основні акумулювальні матеріали:

А. Вода:

- висока питома теплоємність ($\sim 4,18$ кДж/(кг · К));
- простота використання та низька вартість;
- обмеження за робочою температурою і тиском.

Застосування: баки-акумулятори, ГВП, теплові насоси, когенерація.

Б. Бетон:

- висока густина та теплоакумулююча здатність;
- повільні теплові процеси (інерційність);
- можливість інтеграції в будівельні конструкції.

Застосування: термоактивні будівельні елементи (TABS), фундаментні плити.

В. Камінь / ґрунт:

- значні масиви акумулювання;
- низька вартість та доступність;
- доцільні для довготривалого зберігання.

Застосування: ґрунтові та геотермальні акумулятори тепла.

3. Енергетичні та ексергетичні показники теплового акумулювання.

3.1 Енергетична ефективність.

Оцінюється через:

- коефіцієнт корисного використання накопиченої теплоти;
- питомі теплові втрати за час зберігання;
- ефективність циклу «заряд–розряд».

Для короткотривалих систем ККД може перевищувати 90–95 %, тоді як для довготривалих – зменшується до 50–70 % залежно від ізоляції та тривалості.

3.2 Ексергетичний аналіз.

З ексергетичної точки зору теплота низького температурного рівня має обмежену здатність виконувати корисну роботу. Основні втрати ексергії пов'язані з:

- зниженням температури зберігання;
- теплопередачею з великим температурним напором;
- тривалим зберіганням без споживання.

Висновок: теплові акумулятори ефективні енергетично, але ексергетично доцільні лише у поєднанні з низькотемпературними споживачами (теплі підлоги, 4GDH, теплові насоси).

4. *Сфери застосування теплового акумулювання.*

4.1. Системи опалення:

- буферизація роботи котлів і теплових насосів;
- зменшення циклічності та зносу обладнання;
- інтеграція низькотемпературних систем.

4.2. Гаряче водопостачання (ГВП):

- акумулювання тепла в періоди низького тарифу;
- забезпечення пікових витрат води;
- підвищення надійності систем.

4.3. Когенераційні установки:

- розділення режимів виробництва тепла й електроенергії;
- робота ДВЗ або ТЕЦ у номінальному режимі;
- підвищення загального ККД системи.

4.4. Відновлювані джерела енергії:

- акумулювання сонячної теплової енергії;
- сезонне зберігання надлишків;
- стабілізація теплового балансу систем з ВДЕ.

Короткотривале та довготривале теплове акумулювання є невід'ємними елементами сучасних та перспективних систем теплопостачання. Чутливе акумулювання на основі води, бетону та ґрунту залишається найбільш поширеним завдяки простоті та економічній доцільності. Водночас, для

аспірантських досліджень особливо актуальним є поєднання енергетичного та ексергетичного аналізу при обґрунтуванні вибору типу та параметрів теплових акумуляторів у контексті переходу до 4–5 покоління систем теплопостачання та декарбонізації енергетики.

8.2 Фазозмінні матеріали (PCM) у системах акумулювання тепла

Фазозмінні матеріали (PCM) – це речовини, здатні акумулювати та віддавати значні обсяги теплової енергії завдяки прихованій теплоті фазового переходу, зазвичай у вузькому температурному діапазоні. На відміну від традиційних акумуляторів теплоти, PCM дозволяють досягти високої щільності акумулювання при майже сталій температурі, що є критично важливим для систем з жорсткими температурними вимогами.

Застосування PCM розглядається як ключовий інструмент підвищення компактності теплових акумуляторів і стабілізації температурних режимів у будівлях та енергетичних установках.

1. Принцип дії та термодинамічні основи фазового переходу.

1.1 Фізична суть процесу.

Фазовий перехід першого роду (твердий ↔ рідкий) супроводжується поглинанням або виділенням прихованої теплоти без істотної зміни температури матеріалу. При нагріванні PCM:

- теплота витрачається на руйнування кристалічної ґратки;
- температура залишається близькою до температури плавлення.

При охолодженні відбувається зворотний процес кристалізації з виділенням теплоти.

1.2 Термодинамічний опис.

Енергетичний баланс PCM у зоні фазового переходу визначається:

$$Q = m \cdot L, \quad (8.2)$$

де m – маса PCM;

L – питома прихована теплота фазового переходу.

Важливою особливістю є неідеальна ізотермічність процесу, обумовлена:

- гістерезисом плавлення-кристалізації;
- переохолодженням (supercooling);
- неоднорідністю фазового фронту.

Ці ефекти суттєво впливають на реальну ефективність циклів «заряд-розряд».

2. Класифікація фазозмінних матеріалів.

2.1 Органічні PCM.

Представники: парафіни, жирні кислоти, поліетиленгліколі.

Характерні властивості:

- стабільна температура плавлення;
- відсутність фазової сегрегації;
- хімічна інертність і нетоксичність.

Обмеження:

- низька теплопровідність;
- відносно висока вартість;
- пожежна небезпека (для деяких парафінів).

2.2 Неорганічні РСМ.

Представники: гідрати солей, нітрати, хлориди, сульфати.

Переваги:

- висока прихована теплота фазового переходу;
- краща теплопровідність порівняно з органічними РСМ;
- відносно низька вартість.

Недоліки:

- фазова сегрегація;
- корозійна активність;
- схильність до переохолодження.

2.3 Евтектичні суміші.

Суміші двох або більше компонентів з чітко визначеною температурою плавлення.

Переваги:

- можливість точного налаштування температури фазового переходу;
- стабільні термічні характеристики;
- ширший діапазон робочих температур.

Складність: підбір оптимального складу та контроль довготривалої стабільності.

3. Теплофізичні властивості РСМ.

Ключові параметри, що визначають придатність РСМ для інженерного застосування:

- температура фазового переходу (узгодження з робочим режимом системи);
- питома прихована теплота;
- теплопровідність у твердій та рідкій фазах;
- циклічна стабільність (число фазових циклів без деградації);
- об'ємні зміни при плавленні;
- сумісність з оболонками та конструкційними матеріалами.

Для будівельних застосувань оптимальними вважаються РСМ з температурою фазового переходу 18–26 °С, тоді як для теплотехнічних систем – 30–90 °С.

4. Методи інкапсуляції фазозмінних матеріалів.

4.1 Мікроінкапсуляція.

РСМ укладені в оболонки діаметром від кількох мікрметрів до сотень мікрметрів.

Переваги:

- велика поверхня теплообміну;
- запобігання витіканню;
- можливість введення в будівельні матеріали.

Недоліки: висока вартість, складність технології.

4.2 Макроінкапсуляція.

РСМ розміщуються в трубках, капсулах, панелях або контейнерах.

Переваги:

- простота виготовлення;
- легка заміна матеріалу;
- застосування у теплотехнічних системах.

Недоліки: обмежена швидкість теплопередачі.

4.3 Форма-стабілізовані РСМ.

РСМ абсорбуються пористими матеріалами (графіт, силікагель, полімерні матриці).

Переваги:

- відсутність рідкої фази;
- підвищена теплопровідність;
- структурна стабільність.

5. Інтеграція РСМ у будівельні конструкції.

5.1. Огороджувальні конструкції:

- стінові та покрівельні панелі з РСМ;
- сухі будівельні суміші з мікроінкапсульованими РСМ;
- підвищення теплової інерційності будівель.

Ефект: зменшення амплітуди добових температурних коливань і пікових теплових навантажень.

5.2 Підлогові та стельові системи:

- інтеграція РСМ у підлоги з підігрівом;
- стабілізація температури внутрішнього середовища;
- зниження пікової потужності систем опалення та охолодження.

6. Застосування РСМ в інженерних системах:

- акумулятори теплоти компактного типу;
- системи з тепловими насосами;
- сонячні теплові установки;
- системи вентиляції з рекуперацією теплоти;
- охолодження електротехнічного та електронного обладнання.

РСМ дозволяють зменшити об'єм акумуляторів, підвищити точність температурного контролю та розширити можливості використання низькопотенційного тепла.

7. Наукові та інженерні виклики:

- інтенсифікація теплопередачі всередині РСМ;
- підвищення довготривалої циклічної стабільності;
- зниження вартості інкапсуляції;
- адаптація до вимог 4–5 покоління систем теплопостачання.

Порівняльні дані «Фазозмінні матеріали (PCM) та чутливе теплове акумулювання (Sensible Heat Storage)» наведені у таблиці 8.1, з акцентом на фізику процесів, інженерні наслідки та сфери застосування.

Таблиця 8.1 – Порівняльна характеристика систем теплового акумулювання

Критерій	PCM	Чутливе акумулювання
1	2	3
Фізичний принцип	Акумулювання завдяки прихованій теплоті фазового переходу	Акумулювання шляхом зміни температури матеріалу
Домінуючий термодинамічний процес	Фазовий перехід першого роду (твердий ↔ рідкий)	Нагрівання / охолодження без зміни агрегатного стану
Температурний режим	Майже сталий у зоні фазового переходу	Температура змінюється пропорційно накопиченій енергії
Питома густина акумулювання енергії	Висока (у 2–5 разів більша за sensible при однаковому ΔT)	Низька – середня, залежить від ΔT і теплоємності
Робочий температурний діапазон	Вузький, визначений температурою плавлення РСМ	Широкий, визначається матеріалом і допустимими температурами
Ексергетична якість теплоти	Вища завдяки стабільному температурному рівню	Знижується зі зменшенням температури під час розряду
Габарити акумулятора	Компактні	Значні, особливо для довготривалого зберігання
Швидкість теплопередачі	Обмежена низькою теплопровідністю РСМ	Вища, особливо у водяних системах

Продовження таблиці 8.1

1	2	3
Теплові втрати	Низькі при стабільній температурі	Зростають зі збільшенням температурного напору
Циклічна стабільність	Обмежена (деградація, переохолодження, сегрегація)	Висока, тисячі – десятки тисяч циклів
Конструктивна складність	Висока (інкапсуляція, сумісність матеріалів)	Низька, технологічно відпрацьовані рішення
Вартість системи	Висока	Низька
Масштабованість	Обмежена (економічні та технологічні чинники)	Висока, легко масштабуються до великих об'ємів
Типові матеріали	Парафіни, гідрати солей, евтектичні суміші	Вода, бетон, ґрунт, камінь
Інтеграція в будівлі	Панелі, штукатурки, підлогові та стельові системи	Масивні конструкції, баки-акумулятори
Оптимальні сфери застосування	Стабілізація температури, компактні акумулятори, HVAC, будівельні конструкції	Буферизація, сезонне зберігання, теплові мережі
Придатність до 4–5GDH	Висока (узгодження температурних рівнів)	Висока, але з більшими об'ємами
Ключові наукові виклики	Інтенсифікація теплообміну, довготривала стабільність	Зменшення втрат, оптимізація об'ємів

Фазозмінні матеріали є якісно новим рівнем теплового акумулювання, що базується на використанні прихованої теплоти фазового переходу. Їх інтеграція у будівельні конструкції та інженерні системи відкриває можливості створення компактних, енергоефективних і адаптивних теплових систем. Для аспірантських досліджень особливий інтерес становить поєднання РСМ із низькотемпературними тепловими мережами, тепловими насосами та системами ВДЕ, де стабільність температурного рівня має вирішальне значення.

8.3 Підземні та сезонні акумулятори теплової енергії

1. Концепція сезонного теплового акумулювання (*Seasonal Thermal Energy Storage, STES*).

Сезонне теплове акумулювання (STES) – це зберігання теплової енергії у природному або штучному підземному середовищі протягом тривалого періоду (місяці) з метою перенесення надлишкового тепла між сезонами (переважно з літа в зиму). Ключовою відмінністю STES є масштаб і часовий горизонт, що

дозволяє істотно підвищити частку ВДЕ у тепловому балансі територій і зменшити потребу в пікових джерелах.

Типові джерела заряджання: сонячні теплові поля, надлишкове тепло ТЕЦ/когенерації, промислове відпрацьоване тепло, теплові насоси (з електричним живленням від ВДЕ).

Типові споживачі: системи централізованого та децентралізованого опалення, мережі низькотемпературного теплопостачання, теплові насоси у режимі підвищення температури.

2. Типи підземних сезонних акумуляторів тепла.

2.1 BTES – Borehole Thermal Energy Storage (свердловинні акумулятори).

Принцип: тепло акумулюється у масиві ґрунту або скельних порід через поле вертикальних або похилих свердловин з теплообмінниками (U-трубами).

Конструктивні особливості:

- глибина свердловин: зазвичай десятки – сотні метрів;
- конфігурація поля (квадратна, гексагональна) для керування тепловими потоками;
- відсутність рухомої води в середовищі зберігання.

Переваги: геологічна універсальність, висока довговічність, низькі експлуатаційні витрати.

Обмеження: повільна динаміка заряд-розряд, складність прогнозування теплового поля.

2.2 ATES – Aquifer Thermal Energy Storage (аквіферні акумулятори).

Принцип: використання природних водоносних горизонтів з активною фільтрацією води між «теплыми» і «холодними» свердловинами.

Ключові умови реалізації:

- наявність відповідного аквіфера (пористість, проникність);
- стабільний гідрогеологічний режим;
- можливість розділення теплих і холодних зон.

Переваги: висока теплова потужність, швидкі процеси заряд-розряд, високий сезонний коефіцієнт використання.

Недоліки: суворі геологічні обмеження, екологічні та регуляторні вимоги.

2.3 PTES – Pit Thermal Energy Storage (котлованні акумулятори).

Принцип: зберігання тепла у великооб'ємних підземних або напівпідземних резервуарах (часто з водою) з теплоізоляцією та гідроізоляцією.

Конструкція:

- земляні котловани з багатошаровою ізоляцією;
- робоче середовище — вода або водяні розчини;
- інтеграція з сонячними тепловими полями.

Переваги: висока прогнозованість процесів, велика ємність, відносно низька вартість на одиницю об'єму.

Недоліки: потреба у значних земельних ресурсах, вимоги до герметичності.

3. Геотехнічні аспекти проектування STES.

3.1 Геологічні та ґрунтові умови:

- теплопровідність і теплоємність ґрунтів;
- стратифікація порід та наявність тріщин;
- механічна стабільність масиву при термічних навантаженнях.

3.2 Гідрогеологія:

- напрямки та швидкість підземних потоків;
- ризик теплового «виносу» зони акумулювання;
- взаємодія з природним температурним фоном.

3.3 Довготривала стабільність:

- циклічні термічні напруження;
- можливі зміни пористості та проникності;
- хімічна взаємодія теплоносіїв з породами.

4. Теплогідрравлічні аспекти та моделювання.

4.1 Теплоперенесення:

- домінування теплопровідності (BTES, PTES);
- конвективно-фільтраційні процеси (ATES);
- формування та еволюція теплових фронтів.

4.2 Гідравліка систем:

- гідравлічний опір свердловин і колекторів;
- баланс витрат при заряджанні та розряджанні;
- оптимізація режимів для мінімізації втрат.

4.3 Чисельне моделювання.

Для проектування застосовують складні нестационарні 3D-моделі, що поєднують:

- рівняння теплопереносу;
- фільтраційні рівняння;
- граничні умови сезонного навантаження.

5. Приклади реалізованих систем та перспективи розвитку.

5.1 Сонячні райони з PTES.

У низці європейських країн реалізовані сонячні теплові мікрорайони, де літні надлишки сонячної енергії акумулюються в PTES та покривають значну частку зимового теплового навантаження.

5.2 Міські системи з АТЕS.

АТЕS широко застосовуються для балансування тепла та холоду в адміністративних і комерційних будівлях, де сезонне перетікання енергії зменшує потребу в традиційних джерелах.

5.3 Кампусні та житлові комплекси з ВТЕS.

ВТЕS ефективні для університетських кампусів і житлових кварталів, де потрібна висока надійність і мінімальне втручання в довкілля.

5.4 Перспективи розвитку та наукові виклики:

- інтеграція STES з тепловими насосами та низькотемпературними мережами;
- підвищення щільності сезонного акумулювання;
- удосконалення геотермальних та гібридних систем;
- стандартизація методів проєктування та оцінки ефективності;
- адаптація до умов щільної міської забудови.

Підземні та сезонні акумулятори теплової енергії є стратегічним елементом декарбонізованих систем теплопостачання. ВТЕS, АТЕS і РТЕS охоплюють широкий спектр геологічних та містобудівних умов і дозволяють ефективно узгоджувати сезонні дисбаланси між виробництвом і споживанням тепла. Для аспірантських досліджень особливу цінність мають мультидисциплінарні підходи, що поєднують теплотехніку, геомеханіку, гідрогеологію та системний аналіз енергетичних мереж.

Питання для самоконтролю

1. У чому полягають принципові відмінності між короткотривалим і довготривалим тепловим акумулюванням та як вони впливають на вибір системи?
2. Які теплофізичні характеристики матеріалів є визначальними для ефективного акумулювання чутливої теплоти?
3. Які переваги та обмеження застосування фазозмінних матеріалів (PCM) у порівнянні з традиційними теплоакумуляторами?
4. Як температура фазового переходу PCM впливає на ефективність систем опалення та охолодження будівель?
5. Які основні типи підземних сезонних акумуляторів тепла (ВТЕS, АТЕS, РТЕS) та в яких умовах кожен з них є доцільним?
6. Які геологічні, гідрогеологічні та екологічні чинники обмежують впровадження підземних теплових акумуляторів?
7. Які перспективи інтеграції сезонних теплових акумуляторів з відновлюваними джерелами енергії в умовах декарбонізації енергетики?

9 ЦИФРОВІЗАЦІЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯМ

9.1 Smart Heat Grids як кіберфізичні системи теплопостачання

Smart Heat Grids (SHG) розглядаються як підклас кіберфізичних енергетичних систем, у яких фізичні процеси передачі та перетворення теплової енергії тісно інтегровані з цифровими компонентами керування, аналізу та ухвалення рішень у режимі реального часу.

Ключова відмінність SHG від традиційних систем теплопостачання полягає у:

- наявності замкнених контурів керування, що поєднують фізичну інфраструктуру з цифровими моделями;
- використанні даних високої часової та просторової роздільності;
- здатності до самоадаптації, прогнозування та оптимізації режимів роботи.

SHG формують основу переходу до 4GDH та 5GDH, де тепла мережа виступає не лише транспортним середовищем, а активним учасником енергосистеми.

1. Архітектура Smart Heat Grids: багаторівнева кіберфізична модель.

Фізичний рівень включає:

- трубопровідні мережі з активним гідравлічним балансуванням;
- джерела тепла (ТЕЦ, котельні, теплові насоси);
- теплові накопичувачі (буферні баки, STES);
- кінцевих споживачів з індивідуальними тепловими пунктами (ІТП).

На цьому рівні відбуваються неперервні теплогідравлічні процеси, які описуються системами диференціальних рівнянь переносу маси, імпульсу та енергії.

Рівень сенсорики та виконавчих механізмів забезпечує зв'язок між фізичними процесами та цифровим керуванням:

- температурні, тискові та витратомірні датчики;
- датчики якості теплоносія;
- керовані насоси з частотним регулюванням;
- електроприводні регулюючі та балансувальні клапани.

Сучасні SHG переходять від дискретного вимірювання до потоків даних (data streams) у режимі near-real-time.

Edge-рівень є критично важливим для SHG з огляду на часові затримки та надійність:

- локальні контролери (PLC, RTU);

- edge-аналітика (фільтрація, агрегація, anomaly detection);
- локальні цифрові двійники окремих підсистем (насосні станції, ІТП).

Edge-рівень дозволяє реалізувати децентралізоване керування та зменшити залежність від центральних обчислювальних ресурсів.

SCADA-рівень в SHG виконує функції:

- оперативного диспетчерського керування;
- візуалізації стану мережі;
- керування аварійними режимами;
- збирання історичних даних.

На відміну від класичних SCADA, у SHG вони інтегруються з аналітичними та прогнозними модулями, а не обмежуються лише телеметрією.

Cloud-рівень забезпечує:

- довгострокове зберігання даних (Big Data);
- машинне навчання та оптимізаційні алгоритми;
- координацію між тепловими, електричними та газовими системами.

Саме на цьому рівні реалізуються цифрові двійники всієї теплової мережі, сценарний аналіз та стратегічне планування.

2. Інтеграція джерел тепла в Smart Heat Grids.

2.1 ТЕЦ та когенераційні установки.

У SHG ТЕЦ розглядаються як:

- гнучкі джерела тепла та електроенергії;
- елементи балансування електромережі;
- джерела утилізаційного тепла.

Цифрове керування дозволяє змінювати тепло-електричне співвідношення відповідно до ринкових та погодних сигналів.

2.2 Відновлювані джерела енергії.

SHG забезпечують інтеграцію:

- сонячних теплових колекторів;
- геотермальних систем;
- утилізації промислового низькопотенційного тепла.

Нестабільність ВДЕ компенсується завдяки:

- тепловим накопичувачам;
- прогнозного керування навантаженням;
- взаємодії з електричною мережею.

2.3 Теплові насоси та Power-to-Heat.

Теплові насоси в SHG виступають як:

- гнучкі споживачі електроенергії;
- засоби декарбонізації теплопостачання;

- елементи інтеграції секторів (sector coupling).

Керування тепловими насосами здійснюється з урахуванням:

- цін на електроенергію;
- вуглецевого сліду;
- стану теплових накопичувачів.

3. Цифрові протоколи та кібербезпека.

У SHG використовуються:

- BACnet, Modbus, KNX – для рівня будівель та ІТП;
- IEC 60870-5-104, DNP3 – для диспетчерського керування;
- MQTT, OPC UA – для IoT та cloud-інтеграції.

Тенденція – перехід до семантично орієнтованих протоколів, що полегшують інтероперабельність.

SHG є критичною інфраструктурою, тому основні загрози включають:

- несанкціонований доступ до SCADA;
- підміна даних датчиків;
- атаки типу denial-of-service.

Кіберзахист реалізується на принципах:

- defense-in-depth;
- сегментації мереж;
- zero-trust архітектури;
- постійного моніторингу аномалій.

Цифровізація в SHG забезпечує:

- зниження теплових втрат завдяки адаптивному температурному графіку;
- прогнозування попиту з урахуванням погоди та поведінки споживачів;
- раннє виявлення аварій та деградації обладнання;
- оптимізацію роботи джерел та накопичувачів у часовому масштабі від хвилин до сезонів.

У підсумку Smart Heat Grids формують інтелектуальну теплову інфраструктуру, здатну підтримувати декарбонізацію, інтеграцію ВДЕ та підвищення стійкості енергосистеми в умовах невизначеності.

9.2 Автоматизовані та інтелектуальні системи керування тепlopостачанням

Теплові мережі належать до класу розподілених, інерційних, слабо спостережуваних систем з такими ускладнювальними факторами:

- великі транспортні запізнення (інерційність);
- змінна структура навантаження;

- нелінійність теплофізичних процесів;
- обмеження на керуючі впливи (температура, витрата, тиск);
- невизначеність попиту та зовнішніх збурень.

Ці особливості зумовлюють обмежену ефективність класичних регуляторів та стимулюють перехід до модельно-орієнтованих, адаптивних і стохастичних методів керування.

1. Класичні автоматизовані системи керування (АСК) у теплових мережах.

1.1. PID-регулювання: межі застосування.

PID-регулятори традиційно використовуються для:

- стабілізації температури подавального теплоносія;
- підтримання тиску у магістралях;
- локального керування ІТП.

Однак для теплових мереж характерні фундаментальні обмеження PID:

- низька ефективність при великих запізненнях;
- складність налаштування в умовах змінної гідравліки;
- відсутність урахування майбутніх збурень.

PID у сучасних системах зберігається лише як нижній рівень керування, підпорядкований вищим оптимізаційним контурам.

1.2. Model Predictive Control (MPC).

MPC є ключовим інструментом автоматизації теплопостачання нового покоління. Його переваги:

- явне урахування динамічної моделі мережі;
- робота з обмеженнями;
- оптимізація на скінченному горизонті часу.

Типова постановка MPC для тепломереж:

- цільова функція: мінімізація втрат, палива або вартості енергії;
- обмеження: температурні режими, гідравлічні ліміти;
- горизонти: від кількох годин до доби.

Науковою проблемою залишається редукація моделей, оскільки повнорозмірні теплогідравлічні моделі є надто обчислювально складними для онлайн-оптимізації.

2. Адаптивне та предиктивне керування з урахуванням попиту і погоди.

2.1. Погодні та навантажувальні збурення.

Теплове навантаження є функцією:

- зовнішньої температури;
- сонячної радіації;
- теплової інерції будівель;

- поведінки споживачів.

Класичні температурні графіки є статичними, тоді як сучасні системи переходять до динамічних предиктивних стратегій.

2.2. Адаптивні алгоритми.

Адаптивне керування передбачає:

- онлайн-ідентифікацію параметрів об'єкта;
- корекцію моделей у режимі реального часу;
- адаптацію регуляторів до деградації обладнання.

Застосовуються:

- рекурсивні методи найменших квадратів;
- gain scheduling;
- адаптивні MPC.

Ключовий науковий виклик – забезпечення стійкості при одночасній ідентифікації та керуванні.

2.3. Предиктивне керування з урахуванням прогнозів.

Предиктивні системи використовують:

- метеорологічні прогнози;
- короткострокові прогнози теплового попиту;
- інформацію про тарифи та доступність джерел.

Це дозволяє:

- зменшити пікові навантаження;
- знизити температуру в мережі без втрати комфорту;
- ефективніше використовувати акумулювання тепла.

3. Децентралізоване та багаторівневе керування в Smart Heat Grids.

3.1. Мотивація децентралізації.

Централізоване керування стикається з:

- масштабованістю – складність ефективного управління великою кількістю вузлів чи процесів у межах єдиного центру;
- вразливістю до відмов – збій на джерелі теплопостачання призводить до зупинки всієї системи;
- високими обчислювальними витратами – концентрація обробки даних у центрі потребує значних ресурсів;
- воєнними діями – у випадку військових конфліктів централізовані системи стають особливо вразливими.

Тому SHG використовують ієрархічні та децентралізовані структури керування.

3.2. Багаторівнева структура керування.

Типова структура:

- нижній рівень – локальні регулятори (насоси, клапани);
- середній рівень – оптимізація підсистем (райони, кластери);
- верхній рівень – стратегічна оптимізація всієї мережі.

Використовуються методи:

- distributed MPC;
- координація через ціни або сигнали;
- багатоагентні системи.

4. Інтеграція машинного навчання в контури керування.

4.1. Ролі ML у системах керування.

Машинне навчання не замінює класичне керування, а доповнює його:

- побудова surrogate-моделей;
- прогнозування попиту;
- виявлення аномалій;
- оптимізація параметрів регуляторів.

4.2. Reinforcement Learning (RL).

RL використовується для:

- керування в умовах невизначеності;
- навчання оптимальних стратегій без явної моделі;
- адаптації до нових режимів.

Проблеми RL у тепlopостачанні:

- безпека навчання;
- повільна збіжність;
- складність перенесення політик між системами.

4.3 Hybrid control: MPC + ML.

Найперспективніший напрям:

- ML → прогноз і модель;
- MPC → гарантії стійкості та обмежень.

Такі гібридні підходи поєднують інтерпретованість та формальні гарантії з гнучкістю data-driven методів.

5. Оптимізація, стійкість, невизначеність.

5.1. Оптимізація.

Актуальні задачі:

- багатокритеріальна оптимізація (енергія – економіка – екологія);
- оптимізація на різних часових масштабах;
- інтеграція теплових і електричних процесів.

5.2 Стійкість та надійність.

Керування повинно забезпечувати:

- асимптотичну стійкість;
- робастність до збурень;
- працездатність при часткових відмовах.

5.3 Керування в умовах невизначеності.

Сучасні підходи включають:

- робастне MPC;
- стохастичне керування;
- chance-constrained оптимізацію.

Це формує активне наукове поле для дисертаційних досліджень у сфері інтелектуального теплопостачання.

Автоматизовані та інтелектуальні системи керування теплопостачанням еволюціонують від простих регуляторів до складних, ієрархічних, оптимізаційних та data-driven систем, де ключовими стають питання моделювання, стійкості та невизначеності, а не лише реалізація алгоритмів.

9.3 Цифрові двійники та штучний інтелект у теплопостачанні

1. Концепція цифрового двійника теплової мережі.

Цифровий двійник теплової мережі – це динамічна, оновлювана в часі цифрова репрезентація фізичної системи, яка відтворює:

- топологію мережі;
- фізичні процеси теплогідравліки;
- технічний стан обладнання;
- поведінку споживачів.

На відміну від статичних розрахункових моделей, DT:

- синхронізується з реальними даними;
- еволюціонує разом з фізичним об'єктом;
- використовується не лише для аналізу, а й для ухвалення рішень.

У теплопостачанні цифрові двійники охоплюють мережу, джерела тепла, накопичувачі та кінцеві теплові пункти як єдину систему.

2. Цифрові двійники джерел тепла.

Для джерел тепла (котельні, ТЕЦ, теплові насоси) DT включає:

- термодинамічні цикли;
- карти ефективності обладнання;
- моделі запуску, зупинки та часткового навантаження;
- деградацію ККД у часі.

Особливе значення мають ДТ гнучких джерел, де важливо прогнозувати реакцію на зміну навантаження, цін енергоносіїв та температурних режимів мережі.

3. Фізично обґрунтовані моделі в цифрових двійниках.

3.1. Гідравлічні моделі.

Гідравлічна частина ДТ базується на:

- рівняннях балансу маси у вузлах;
- характеристиках насосів та арматури;
- змінному гідравлічному опорі трубопроводів.

Науковою проблемою є ідентифікація параметрів (шорсткість, місцеві опори), які змінюються в процесі експлуатації.

3.2. Моделі теплообміну.

Моделювання теплопередачі охоплює:

- втрати тепла через ізоляцію;
- теплову інерцію труб та ґрунту;
- теплообмін у теплообмінниках та ІТП.

Ці моделі мають розподілений характер і часто потребують спрощень для роботи в режимі online.

3.3 Моделі деградації обладнання.

Цифровий двійник враховує:

- старіння насосів;
- зниження теплообмінної здатності;
- корозійні та накипоутворювальні процеси;
- зростання гідравлічних втрат.

Такі моделі є ключовими для переходу від планового до прогнозного технічного обслуговування.

4. Застосування штучного інтелекту в тепlopостачанні.

4.1. Прогнозування теплового навантаження.

ШІ використовується для:

- коротко- та середньострокових прогнозів попиту;
- урахування нелінійної поведінки споживачів;
- аналізу сезонних і добових патернів.

Застосовуються:

- нейронні мережі;
- градієнтні ансамблі;
- гібридні часові моделі.

Прогноз попиту є вхідною інформацією для цифрового двійника та оптимізаційних алгоритмів.

4.2. Виявлення втрат і аварій.

Методи ІІІ дозволяють:

- ідентифікувати приховані витрати;
- виявляти аномальні температурні профілі;
- прогнозувати ймовірність відмов.

Застосовуються:

- методи виявлення аномалій;
- кластеризація режимів роботи;
- байєсівські підходи до діагностики.

Перевага ІІІ полягає у здатності працювати з неповними та зашумленими даними.

4.3. Оптимізація режимів роботи та техобслуговування.

ІІІ використовується для:

- пошуку енергоефективних режимів;
- зменшення пікових навантажень;
- оптимізації графіків обслуговування.

Особливо перспективним є поєднання цифрового двійника та алгоритмів навчання, де DT слугує середовищем для безпечного навчання.

5. Зв'язок цифрового двійника з реальним об'єктом.

5.1. Online та real-time синхронізація.

Рівні зв'язку DT з фізичною системою:

- offline DT – аналіз та планування;
- online DT – регулярне оновлення станів;
- real-time DT – інтеграція в контури керування.

Ключовим викликом є затримки, неповнота та асинхронність даних.

5.2. Калібрування та валідація.

Цифровий двійник потребує:

- постійної параметричної ідентифікації;
- порівняння прогнозів з фактичними даними;
- адаптації моделей у часі.

Без цього DT деградує до статичної моделі і втрачає цінність.

6. *Data-driven та physics-based моделі.*

6.1. Physics-based підходи.

Переваги:

- інтерпретованість;
- узагальнюваність;
- відповідність фізичним законам.

Недоліки:

- висока складність;
- потреба в параметрах, які важко ідентифікувати.

6.2. Data-driven моделі.

Переваги:

- висока точність у відомих режимах;
- адаптивність;
- швидкість обчислень.

Недоліки:

- відсутність фізичних гарантій;
- погана екстраполяція.

6.3. Гібридні підходи.

Найперспективніший напрям:

- фізичні рівняння як структура;
- ШІ для корекції параметрів і залишків;
- спільне навчання на даних та фізиці.

Гібридні цифрові двійники дозволяють поєднати надійність фізичних моделей з гнучкістю штучного інтелекту.

Цифрові двійники у поєднанні зі штучним інтелектом формують нову парадигму управління теплопостачанням, де аналіз, прогнозування та оптимізація відбуваються на основі безперервного діалогу між моделлю та реальністю. Саме тут концентруються ключові наукові задачі сучасних досліджень у сфері інтелектуальних теплових систем.

Питання для самоконтролю

1. У чому полягають принципові відмінності Smart Heat Grids від традиційних систем централізованого теплопостачання з точки зору керування та цифрової інфраструктури?

2. Які архітектурні рівні та цифрові компоненти є критичними для побудови інтелектуальної системи управління теплопостачанням (IoT, SCADA, edge/cloud, цифрові платформи)?

3. Які переваги та обмеження мають класичні методи керування (PID, MPC) порівняно з алгоритмами машинного навчання в задачах керування тепловими мережами?

4. Як цифровий двійник теплової мережі може бути використаний для оптимізації режимів роботи, прогнозування аварій та зниження теплових втрат?

5. Які типи даних (операційні, метеорологічні, споживчі, технічні) є необхідними для навчання моделей штучного інтелекту в системах теплопостачання, і як забезпечити їхню якість?

6. Які основні виклики впровадження ІІ та цифрових двійників у теплопостачанні (невизначеність, масштабованість, кібербезпека, інтерпретованість моделей)?

10 ІНТЕГРАЦІЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В МУЛЬТИЕНЕРГЕТИЧНІ ТА СЕКТОРНО-ЗВ'ЯЗАНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ

10.1 Концептуальні підходи та архітектура секторно-зв'язаних енергетичних систем

Sector coupling (секторна інтеграція) – це концепція системної взаємодії різних енергетичних секторів (електроенергетики, теплопостачання, газопостачання, транспорту та промисловості) з метою підвищення загальної енергоефективності та зниження викидів парникових газів. Ключовою ідеєю є перетворення, передача та зберігання енергії між секторами з використанням найбільш ефективних та низьковуглецевих технологій.

У контексті декарбонізації теплопостачання sector coupling дозволяє:

- інтегрувати відновлювану електроенергію (вітрову, сонячну) через технології Power-to-Heat;
- зменшити використання викопного палива шляхом електрифікації теплових процесів;
- використовувати теплові мережі як великомасштабний акумулятор енергії, що підвищує гнучкість енергосистеми;
- забезпечити системний підхід до досягнення кліматичної нейтральності, задекларованої в стратегіях ЄС та багатьох країн світу.

Таким чином, sector coupling є інтеграційною основою енергетичного переходу, що поєднує технологічні, економічні та екологічні аспекти.

Взаємодія систем теплопостачання з електроенергетичним, газовим та промисловим секторами.

1. Електроенергетичний сектор.

Системи теплопостачання взаємодіють з електромережею через:

- великі теплові насоси та електрокотли, які перетворюють електроенергію ВДЕ в теплову;
- участь у балансуванні електроенергосистеми шляхом керованого споживання електроенергії;
- використання динамічних тарифів та ринків допоміжних послуг.

2. Газовий сектор.

Інтеграція здійснюється через:

- поступове заміщення природного газу біометаном, синтетичним метаном та воднем;
- гібридні системи (газові котли + теплові насоси);

- використання газових мереж як інструменту довготривалого зберігання енергії (Power-to-Gas).

3. Промисловий сектор.

Взаємодія полягає у:

- залученні відхідного та низькопотенційного тепла промислових процесів і дата-центрів;
- інтеграції когенераційних та тригенераційних установок;
- формуванні локальних енергетичних кластерів та індустріальних симбіозів.

Централізовані й децентралізовані мультиенергетичні конфігурації.

Централізовані конфігурації

Характеризуються наявністю потужних джерел тепла (ТЕЦ, великі теплові насоси, сонячні теплові поля) та розвинених теплових мереж.

Переваги: економія масштабу, висока керованість, ефективна інтеграція сезонних акумуляторів.

Недоліки: значні капітальні витрати, залежність від мережевої інфраструктури.

Децентралізовані конфігурації

Ґрунтуються на локальних джерелах тепла (будинкові теплові насоси, мікрокогенерація, локальні ВДЕ).

Переваги: гнучкість, зниження мережевих втрат, підвищення енергетичної автономності.

Недоліки: складність координації, обмежені можливості масштабного акумулювання.

Гібридні мультиенергетичні системи

Поєднують централізовані та децентралізовані елементи й вважаються найбільш перспективною архітектурою для майбутніх низьковуглецевих систем теплопостачання.

10.2 Технології Power-to-Heat та гнучкість систем теплопостачання

Power-to-Heat (P2H) – це сукупність технологій перетворення електричної енергії, насамперед з відновлюваних джерел, у теплову з подальшою подачею в системи теплопостачання. Ключовими елементами P2H є:

1. Великомасштабні теплові насоси (ВТН).

Застосовуються в централізованих системах теплопостачання з використанням низькопотенційних джерел (поверхневі води, ґрунтові води, стічні води, відхідне тепло).

Основні переваги: високі коефіцієнти перетворення (COP 3–5 і вище), значне скорочення викидів CO₂, можливість регулювання навантаження.

Обмеження: залежність від температурних режимів мережі та доступності джерел тепла.

2. Електрокотли.

Характеризуються високою надійністю, швидким запуском та широким діапазоном регулювання потужності.

Вони є ефективним інструментом короткострокового балансування електромережі, однак мають нижчу енергетичну ефективність порівняно з тепловими насосами.

3. Комбіновані (гібридні) рішення.

Поєднання теплових насосів, електрокотлів і традиційних котлів (газових, біомасових) дозволяє оптимізувати роботу системи залежно від ціни електроенергії, температурних умов та потреб споживачів. Такі конфігурації забезпечують максимальну експлуатаційну гнучкість і економічну доцільність.

Системи централізованого теплопостачання мають унікальну властивість – високу теплоємність, що дозволяє використовувати їх як елемент зберігання енергії:

- акумулювання тепла в мережах і баках-акумуляторах у періоди надлишкової генерації ВДЕ;
- зменшення пікових навантажень електромережі шляхом перенесення теплового виробництва у часі;
- інтеграція з сезонними акумуляторами для вирівнювання добових та сезонних коливань виробництва електроенергії.

Таким чином, теплові мережі виконують функцію системного буфера, що підвищує стабільність електроенергетичних систем із високою часткою сонячної та вітрової енергії.

Впровадження динамічних тарифів та ринкових механізмів є критично важливим чинником реалізації потенціалу P2H:

- динамічне ціноутворення стимулює використання електроенергії в періоди низьких цін або негативних цін на ринку;
- системи теплопостачання можуть брати участь у ринках допоміжних послуг, надаючи послуги регулювання частоти та потужності;
- використання прогнозів генерації ВДЕ та попиту дозволяє оптимізувати режими роботи теплових насосів і акумуляторів.

У результаті системи теплопостачання трансформуються з пасивних споживачів у активних учасників енергетичного ринку, що є ключовим елементом сучасних секторно-зв'язаних енергетичних систем.

10.3 Моделювання, оптимізація та оцінка ефективності інтегрованих енергетичних систем

Інтегровані (мультиенергетичні) системи теплопостачання, що функціонують у межах концепції sector coupling, характеризуються високою складністю, багатокomпонентністю та динамічністю. Тому їх проектування й експлуатація неможливі без застосування сучасних методів моделювання, оптимізації та багатокритеріальної оцінки ефективності.

Моделювання інтегрованих енергетичних систем спрямоване на відтворення взаємодії між електричними, тепловими та газовими підсистемами з урахуванням часових, просторових і технологічних зв'язків.

Основні підходи:

- енергетичне балансне моделювання – аналіз потоків енергії між секторами з різною часовою роздільною здатністю (від хвилин до років);
- Оптимізаційні моделі (лінійне, нелінійне, змішано-цілочислове програмування) для мінімізації витрат, викидів або споживання первинної енергії;
- динамічні та стохастичні моделі, що враховують мінливість ВДЕ, попиту та цінових сигналів;
- сценарний аналіз для оцінки впливу різних траєкторій декарбонізації, рівнів електрифікації та розвитку інфраструктури.

Оптимізація охоплює як операційний рівень, так і стратегічне планування розвитку:

1. Операційна оптимізація:

- оптимальний диспетчерський графік роботи теплових насосів, електрокотлів, когенераційних установок та акумуляторів;
- мінімізація експлуатаційних витрат з урахуванням динамічних тарифів;
- управління гнучкістю попиту та акумулюванням тепла.

2. Інвестиційна та структурна оптимізація:

- вибір оптимальної конфігурації технологій і потужностей;
- поетапна модернізація систем теплопостачання;
- оцінка компромісів між централізованими та децентралізованими рішеннями.

Застосування оптимізаційних методів дозволяє обґрунтувати економічно ефективні та кліматично нейтральні траєкторії розвитку.

Комплексна оцінка ефективності інтегрованих систем передбачає використання сукупності показників:

1. Техніко-економічні показники:

- приведені витрати (LCOH, LCOE);
- термін окупності інвестицій;
- витрати на експлуатацію та технічне обслуговування.

2. Енергетичні показники:

- коефіцієнти перетворення енергії;
- показники первинної енергії;
- ексергетична ефективність, особливо важлива для аналізу

низькотемпературних теплових мереж.

3. Екологічні показники:

- викиди CO₂ та інших парникових газів;
- оцінка життєвого циклу (LCA);
- вплив на локальне довкілля.

Питання для самоконтролю

1. У чому полягають особливості моделювання інтегрованих (мультиенергетичних) систем порівняно з окремими енергетичними секторами?

2. Які методи математичної оптимізації найбільш доцільні для аналізу систем теплопостачання в умовах sector coupling і чому?

3. Як у моделях інтегрованих енергетичних систем враховується стохастичність генерації відновлюваних джерел енергії та попиту на тепло?

4. Яка роль теплового акумулювання в оптимізації режимів роботи мультиенергетичних систем?

5. Чим ексергетичний аналіз відрізняється від традиційного енергетичного аналізу та чому він є важливим для низькотемпературних систем теплопостачання?

6. Як оцінка життєвого циклу (LCA) впливає на вибір технологій у процесі декарбонізації систем теплопостачання?

7. Які компроміси виникають між техніко-економічною ефективністю та екологічною стійкістю при оптимізації інтегрованих енергетичних систем?

11 МОДЕРНІЗАЦІЯ ТА РЕКОНСТРУКЦІЯ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

11.1 Технологічні рішення модернізації джерел тепла та теплових мереж

У більшості країн із розвиненою централізованою системою теплопостачання модернізація існуючих джерел і мереж є реалістичнішою та економічно доцільнішою, ніж їх повна заміна. Технологічна модернізація дозволяє:

- суттєво знизити питомі викиди CO₂;
- підвищити паливну та електричну ефективність;
- адаптувати застарілі системи до нових режимів роботи (4GDH / 5GDH).

Для аспірантського аналізу важливо розглядати модернізацію як багаторівневу оптимізаційну задачу, що охоплює теплогенерацію, транспорт і споживання.

1. Реконструкція джерел теплопостачання.

1.1. Підвищення ККД теплогенеруючого обладнання.

Основні технологічні напрямки:

- заміна застарілих водогрійних і парових котлів на високоефективні жаротрубні та водотрубні котли;
- впровадження конденсаційних технологій, що дозволяють використовувати теплоту водяної пари димових газів;
- оптимізація горіння (модулюючі пальники, контроль надлишку повітря).

Ключовий науковий аспект – залежність реального ККД від режимів часткового навантаження, які домінують у сучасних системах.

1.2. Переведення на низьковуглецеві та альтернативні палива.

Технологічні рішення включають:

- біомасові котли (деревна тріска, пелети, агробіомаса);
- сумісне спалювання (co-firing) природного газу з біогазом або воднем;
- використання синтетичних газів як drop-in replacement.

Обмеження:

- нестабільність якості палива;
- потреба в реконструкції пальникових пристроїв;
- зростання складності експлуатації.

Для досліджень актуальним є аналіз життєвого циклу (LCA) таких рішень.

1.3. Впровадження теплових насосів на джерелах тепла.

Теплові насоси на стороні генерації застосовуються для:

- утилізації низькопотенційного тепла (димові гази, зворотна мережна вода);

- покриття базового навантаження;
- зниження питомих витрат палива.

Типові конфігурації:

- газовий котел + тепловий насос (гібридна схема);
- ТЕЦ + тепловий насос (підвищення загального ККД системи).

Наукова задача – оптимальний розподіл навантаження між котлом, ТН і акумулюванням тепла.

1.4. Когенерація та тригенерація.

Когенераційні установки забезпечують:

- одночасне виробництво тепла та електроенергії;
- підвищення паливного використання до 80–90 %;
- гнучку інтеграцію з електроенергетичною системою.

Сучасні напрями:

- газопоршневі когенераційні установки малої та середньої потужності;
- біогазові ТЕЦ;
- тригенерація (тепло – електрика – холод).

Обмеження – залежність від теплового навантаження, що формує жорсткий зв'язок між виробництвом електроенергії та тепла.

2. Модернізація теплових мереж.

2.1. Попередньоізольовані трубопроводи нового покоління.

Сучасні попередньоізольовані труби характеризуються:

- низькими питомими тепловими втратами;
- вбудованими системами контролю зволоження;
- підвищеною довговічністю (30–40 років).

Важливий інженерний аспект – оптимізація діаметрів при зниженні температурного графіка, що зменшує капітальні витрати.

2.2. Перехід до низькотемпературних режимів роботи.

Зниження температури подачі в мережі дозволяє:

- зменшити теплові втрати;
- розширити використання ВДЕ та відхідного тепла;
- підвищити ефективність теплових насосів.

Технічні виклики:

- обмеження існуючих споживчих систем;
- необхідність поетапного переходу;
- ризики недогріву в пікові періоди.

Для досліджень актуальним є моделювання перехідних режимів у період модернізації.

2.3. Автоматизовані індивідуальні теплові пункти (ІТП).

ІТП нового покоління включають:

- електронні регулятори;
- погодозалежні та адаптивні алгоритми;
- дистанційний моніторинг.

Системний ефект від масового впровадження ІТП:

- зниження теплового навантаження;
- стабілізація мережних режимів;
- зменшення пікових витрат теплоносія.

3. Інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

3.1. Сонячна тепла енергетика.

Сонячні колектори інтегруються:

- на рівні котелень;
- у поєднанні з добовим і сезонним акумулюванням;
- як джерело покриття літнього навантаження.

Ключова проблема – невідповідність профілю генерації профілю попиту.

3.2. Геотермальна енергія та ґрунтові джерела.

Геотермальні джерела використовуються:

- безпосередньо (за достатньої температури);
- через теплові насоси.

Перевага – висока стабільність; обмеження – геологічні умови та капітальні витрати.

3.3. Системна інтеграція ВДЕ.

ВДЕ не можуть розглядатися ізольовано. Їх ефективна інтеграція потребує:

- акумулювання тепла;
- гнучких джерел (ТН, когенерація);
- цифрового керування системою.

Модернізація джерел тепла та теплових мереж є ключовим інструментом підвищення енергоефективності й декарбонізації систем теплопостачання без повної заміни існуючої інфраструктури. Найбільший ефект досягається шляхом поєднання підвищення ККД котелень і ТЕЦ, впровадження когенерації та теплових насосів, переходу на низьковуглецеві палива і утилізації низькопотенційного тепла. Модернізація теплових мереж – із застосуванням попередньоізолюваних трубопроводів, зниженням температурних графіків і впровадженням автоматизованих індивідуальних теплових пунктів –

перетворює мережу з пасивного елемента транспортування на активний інструмент системної оптимізації. Інтеграція відновлюваних джерел енергії в існуючу інфраструктуру потребує гнучких режимів роботи, акумулювання тепла та цифрового керування, оскільки ВДЕ ефективні лише в комплексі з іншими технологіями. У підсумку, сталий розвиток теплопостачання можливий лише за умови узгодженої модернізації джерел, мереж і споживчих систем на основі системного аналізу, поетапної реалізації та науково обґрунтованих рішень.

11.2 Стратегії реконструкції, економічна ефективність та управління переходом

Декарбонізація теплопостачання є довгостроковим процесом структурної перебудови, а не сукупністю окремих інженерних заходів. Стратегії реконструкції мають враховувати:

- інерційність існуючої інфраструктури;
- обмеженість фінансових ресурсів;
- необхідність забезпечення надійності та соціальної прийнятності.

Для аспірантських досліджень важливо аналізувати теплопостачання як соціально-технічну систему, де технічні, економічні та інституційні фактори взаємодіють.

1. Поетапна модернізація та сценарії розвитку систем теплопостачання.

1.1. Принципи поетапної реконструкції.

Поетапність дозволяє:

- мінімізувати інвестиційні ризики;
- уникнути різких тарифних змін;
- адаптувати технічні рішення до нових умов.

Типові етапи:

- Оптимізаційний – зниження втрат, автоматизація, балансування.
- Технологічний – модернізація джерел, мереж і споживчих систем.
- Трансформаційний – інтеграція ВДЕ, секторне поєднання,

низькотемпературні режими.

1.2. Сценарне планування розвитку.

Сценарії розвитку формуються з урахуванням:

- темпів декарбонізації;
- доступності інвестицій;
- зміни теплового попиту (термомодернізація будівель).

Типові сценарії:

- інерційний – мінімальні зміни;
- адаптивний – поєднання модернізації та оптимізації;
- трансформаційний – системний перехід до нових моделей

теплопостачання.

Науковий інтерес становить порівняльна оцінка сценаріїв за багатокритеріальними показниками.

2. Техніко-економічна оцінка проєктів реконструкції.

2.1. Критерії економічної ефективності.

Оцінка реконструкції має виходити за межі простих капітальних витрат.

Застосовуються:

- повна вартість життєвого циклу (LCC);
- дисконтовані показники (NPV, IRR);
- питомі витрати теплової енергії (LCOH).

Важливо враховувати:

- зменшення операційних витрат;
- вартість викидів CO₂;
- ефекти масштабування.

2.2. Аналіз ризиків.

Ризики реконструкції поділяються на:

- технічні (несумісність обладнання, деградація);
- економічні (зміна цін на енергоносії, інфляція);
- регуляторні (зміна правил тарифоутворення);
- соціальні (супротив споживачів).

Методи аналізу:

- чутливість показників до ключових параметрів;
- сценарний аналіз;
- ймовірнісне моделювання.

2.3 Джерела фінансування реконструкції.

Типові механізми:

- муніципальні та державні інвестиції;
- міжнародні фінансові організації;
- гранти на декарбонізацію;
- енергосервісні контракти (ESCO);
- державно-приватне партнерство.

Ключова проблема – узгодження довгострокових інвестицій із короткостроковими тарифними обмеженнями.

3. Нормативно-регуляторні аспекти переходу.

3.1 Регуляторна роль держави.

Регулювання визначає:

- допустимі технології;
- принципи тарифоутворення;
- стимули до підвищення ефективності.

Для декарбонізації важливими є:

- визнання інвестицій у модернізацію в тарифах;
- довгострокові сигнали для інвесторів;
- узгодження теплової та кліматичної політики.

3.2. Тарифна та інституційна трансформація.

Перехід до енергоефективних систем потребує:

- переходу від тарифів «за обсяг» до тарифів «за послугу»;
- прозорих механізмів компенсації інвестицій;
- захисту вразливих груп населення.

4. Соціальні виклики та управління змінами.

4.1. Соціальна прийнятність модернізації.

Навіть технічно та економічно обґрунтовані рішення можуть зазнати невдачі без підтримки суспільства. Ключові аспекти:

- довіра до оператора тепломереж;
- прозорість тарифної політики;
- інформування споживачів.

4.2. Управління змінами.

Управління переходом включає:

- залучення стейкхолдерів;
- підготовку кадрів;
- інституційну спроможність операторів.

Для досліджень актуальною є оцінка впливу організаційних рішень на технічну ефективність систем.

Стратегічна реконструкція систем теплопостачання в умовах декарбонізації є комплексним і довготривалим процесом, що поєднує технічні рішення, економічну доцільність та ефективне управління змінами. Поетапна модернізація дозволяє зменшити інвестиційні й соціальні ризики, забезпечити безперервність теплопостачання та адаптувати технологічні рішення до змін теплового попиту і регуляторного середовища. Економічна ефективність проєктів визначається не лише обсягом капітальних вкладень, а насамперед результатами аналізу життєвого циклу, стійкістю до цінових і регуляторних коливань та здатністю залучати різні джерела фінансування. Нормативно-

регуляторна база відіграє вирішальну роль у формуванні інвестиційних стимулів і має забезпечувати баланс між інтересами операторів, інвесторів і споживачів, зокрема через прозоре тарифоутворення та соціальний захист. Водночас успішність переходу значною мірою залежить від соціальної прийнятності рішень, рівня інституційної спроможності та якості управління змінами. У підсумку, сталий розвиток і декарбонізація теплопостачання можливі лише за умови інтегрованого підходу, який синхронізує сценарне планування, техніко-економічне обґрунтування, регуляторні механізми та активну взаємодію з усіма стейкхолдерами.

Питання для самоконтролю

1. Які основні технічні, економічні та інституційні обмеження модернізації існуючих систем теплопостачання в країнах з застарілою інфраструктурою?
2. Як перехід до низькотемпературних теплових мереж впливає на ефективність джерел тепла, втрати в мережах та вимоги до споживачів?
3. Які критерії доцільності вибору між реконструкцією теплових мереж і їх повною заміною під час модернізації систем теплопостачання?
4. Яку роль відіграють теплові насоси, Power-to-Heat технології та акумулювання тепла в процесі поетапної модернізації існуючих систем?
5. Як цифровізація та впровадження інтелектуальних систем управління змінюють підходи до експлуатації та оптимізації теплопостачання?
6. Які методи моделювання та оптимізації застосовуються для обґрунтування рішень з реконструкції систем теплопостачання на різних часових горизонтах?
7. Як інтеграція модернізації систем теплопостачання з заходами з енергоефективності будівель впливає на загальну економічну та екологічну ефективність?

12 ЗНИЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ВТРАТ У СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

12.1 Сучасні теплоізоляційні матеріали та конструктивні рішення теплових мереж

Теплоізоляція є ключовим елементом теплових мереж, що безпосередньо визначає величину питомих теплових втрат, надійність та строк експлуатації трубопроводів. У сучасних умовах теплоізоляційні рішення розглядаються не лише як засіб зменшення теплових втрат, а як фактор системної надійності та економічної ефективності мережі протягом усього життєвого циклу.

Для аспірантського рівня принциповим є розгляд ізоляції з позицій теплопровідності, вологопереносу, старіння матеріалу та взаємодії з конструкцією трубопроводу.

1. Новітні теплоізоляційні матеріали: фізичні властивості та довговічність.

1.1 Пінополіуретан (ППУ) [34].

ППУ є базовим матеріалом сучасних теплових мереж.

Фізичні властивості:

- коефіцієнт теплопровідності: 0,022–0,028 Вт/(м · К);
- закрито-пориста структура;
- низьке водопоглинання.

Довговічність:

- деградація теплопровідності пов'язана з дифузією газів;
- чутливість до підвищеної температури та вологості;
- розрахунковий термін служби: 25–40 років за належного захисту.

Аспект досліджень – моделювання старіння ППУ та прогнозування зростання теплових втрат з часом.

1.2. Аерогелі.

Аерогелі є ультранизькопровідними матеріалами нового покоління.

Фізичні властивості:

- теплопровідність: 0,013–0,018 Вт/(м · К);
- надвисока пористість (>90 %);
- низька густина.

Переваги:

- можливість тонкошарової ізоляції;
- стабільність у широкому діапазоні температур.

Обмеження:

- висока вартість;

- механічна крихкість;
- обмежений досвід довгострокової експлуатації в тепломережах.

Аспірантські дослідження зосереджуються на композитних системах «аерогель + захисна оболонка».

1.3 Вакуумна теплоізоляція.

Вакуумні ізоляційні панелі забезпечують мінімальні теплові втрати.

Фізичні властивості:

- еквівалентна теплопровідність: $<0,005 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;
- різке зниження теплопереносу завдяки вакууму.

Недоліки:

- висока чутливість до пошкоджень;
- складність інтеграції в лінійні трубопроводи;
- деградація при втраті вакууму.

Перспектива – локальне застосування у вузлах із високими втратами, а не суцільна ізоляція мереж.

2. Попередньо ізольовані трубопроводи як конструктивне рішення.

2.1. Конструкція та принцип дії.

Попередньо ізольовані трубопроводи складаються з:

- сталевій або полімерній робочій труби;
- шару теплоізоляції (зазвичай ППУ);
- зовнішньої захисної оболонки (ПЕ, оцинкована сталь).

Таке рішення забезпечує:

- стабільну геометрію ізоляції;
- захист від вологи та механічних впливів;
- можливість вбудованого моніторингу стану.

Конструкція сталевих труб ППУ наведена на рисунку 12.1.

Конструкція системи гнучких труб КАСАФЛЕКС, призначених для підземного безканального прокладання відкритих та закритих високотемпературних систем теплопостачання, з робочою температурою до 160°C наведена на рисунку 12.2.

Труби ІЗОПРОФЛЕКС SDR 11 – призначені для мереж гарячого водопостачання та теплопостачання з максимальним робочим тиском $0,6 \text{ МПа}$ та робочою температурою 95°C .

Конструкція труби ІЗОПРОФЛЕКС наведена на рисунку 12.3.

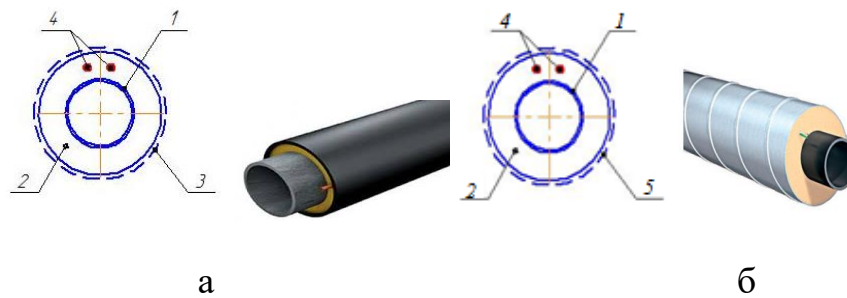


Рисунок 12.1 – Попередньо ізолюваний трубопровід:

а – для підземного прокладання; б – для надземного прокладання «Спіро»
 1 – сталевий трубопровід; 2 – пінополіуретанова ізоляція;
 3 – поліетиленовий захисний шар; 4 – дроти аварійної сигналізації;
 5 – захисний шар металевий з оцинкованого листа або з алюмінієвого листа

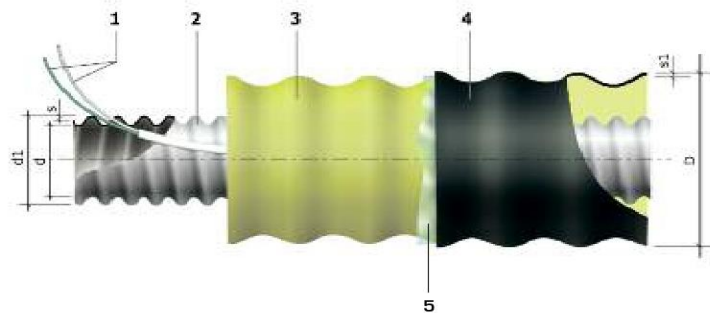


Рисунок 12.2 – Конструкція труб КАСАФЛЕКС:

1 – сигнальний кабель; 2 – напірна гофрована труба з хромо-нікелевої сталі; 3 – теплоізоляція з пінополіізоціанурату; 4 – гофрована захисна оболонка з поліетилену низької щільності; 5 – бар'єрний шар

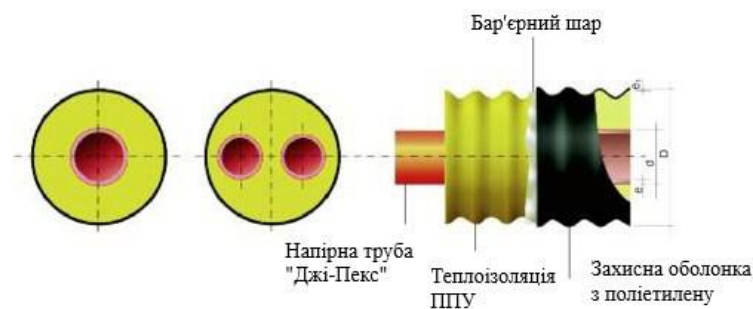


Рисунок 12.3 – Конструкція труби ІЗОПРОФЛЕКС

2.2 Вплив на зниження теплових втрат.

Порівняно з традиційною тепловою ізоляцією – плити мінераловатні (каналне прокладання):

- питомі теплові втрати зменшуються у 2–4 рази;

- втрати теплоносія через корозію знижуються кратно;
- стабільність теплового режиму зростає.

Ключовий науковий аспект – взаємозв’язок між температурним графіком, товщиною ізоляції та оптимальним діаметром трубопроводу.

2.3 Аналіз життєвого циклу.

Сучасні теплоізоляційні системи мають:

- вищі початкові капітальні витрати;
- значно нижчі експлуатаційні втрати;
- менші витрати на ремонт і заміну.

У більшості випадків повна вартість життєвого циклу нижча, ніж у традиційних рішень.

Сучасні теплоізоляційні матеріали та конструктивні рішення є визначальним фактором підвищення енергоефективності й надійності теплових мереж упродовж усього життєвого циклу. Перехід від традиційних ізоляцій до індустріально виготовлених попередньо ізольованих трубопроводів із ППУ дозволяє суттєво знизити теплові втрати, мінімізувати корозійні пошкодження та забезпечити прогнозовані експлуатаційні характеристики. Новітні матеріали, зокрема аерогелі та вакуумна ізоляція, відкривають можливості для радикального зменшення теплопереносу, однак через високу вартість і конструктивні обмеження наразі доцільні переважно для нішевих або локальних застосувань. Порівняльний аналіз із позицій енергоефективності та вартості життєвого циклу показує, що сучасні ізоляційні рішення, попри більші початкові інвестиції, забезпечують нижчі сумарні витрати та кращу довговічність мереж. Отже, обґрунтований вибір теплоізоляції повинен базуватися на комплексній оцінці теплотехнічних, експлуатаційних і економічних показників, а також на відповідності стратегічним цілям модернізації й декарбонізації систем тепlopостачання.

12.2 Безканальні тепломережі та низькотемпературні режими тепlopостачання

1. Безканальні теплові мережі.

Безканальні теплові мережі – це система прокладання трубопроводів без окремих бетонних або цегляних каналів, де захисну й теплоізоляційну функції виконують інтегровані конструктивні елементи трубопроводу. Такий підхід є стандартом для сучасних і реконструйованих мереж у країнах з розвиненим тепlopостачанням.

Ключовою особливістю безканальних мереж є єдність теплотехнічних, гідравлічних і геотехнічних процесів, що вимагає комплексного підходу до проектування.

Конструктивна схема та елементи.

Типова безканальна мережа включає:

- робочу трубу (сталь або полімер);
- шар теплоізоляції (найчастіше ППУ);
- зовнішню герметичну оболонку;
- систему контролю вологості ізоляції;
- ґрунтове оточення як частину теплового опору.

Проектування здійснюється з урахуванням спільної роботи трубопроводу та ґрунту, що принципово відрізняє такі мережі від канальних.

Тепломеханічні та геотехнічні аспекти.

Основні чинники:

- температурні деформації труб;
- опір ґрунту переміщенню;
- вплив сезонних змін температури ґрунту;
- нерівномірність осідань.

Проектні рішення:

- компенсація подовжень завдяки гнучкості трубопроводу;
- мінімізація кількості компенсаторів;
- використання розрахункових моделей «труба – ізоляція – ґрунт».

Надійність та експлуатаційна безпека.

Безканальні мережі потребують:

- високої якості монтажу стиків;
- контролю герметичності оболонки;
- систем раннього виявлення зволоження ізоляції.

Науковий інтерес становить прогнозування відмов і залишкового ресурсу безканальних трубопроводів.

2. Вплив температурного графіка на теплові втрати та перехід до низькотемпературних теплових мереж.

Дослідження теплових втрат у теплових мережах, а також функціонування теплових мереж в умовах «зниженого» температурного графіка розглянуто у працях [35–40].

Теплові втрати як функція температури.

Питомі теплові втрати трубопроводу пропорційні:

- різниці температур між теплоносієм і ґрунтом;
- тепловому опору ізоляції;
- довжині мережі.

Зменшення температури подачі та звороту призводить до лінійного зниження втрат, що має системний характер.

Зміна температурного графіка впливає на:

- теплову інерцію мережі;
- час виходу системи на робочий режим;
- стабільність гідравлічних параметрів.

Для аспірантських досліджень актуальним є аналіз нестационарних теплових процесів у мережах зі змінними графіками.

Концепція низькотемпературного теплопостачання.

Низькотемпературні мережі характеризуються:

- температурою подачі 40–70 °С;
- зменшеною різницею температур подача / зворот;
- тісною інтеграцією з тепловими насосами та ВДЕ.

Такі мережі відповідають концепціям 4-го та 5-го поколінь теплопостачання.

Перехід до низькотемпературних режимів забезпечує:

- зменшення теплових втрат на 20–50 %;
- підвищення ефективності теплових насосів;
- можливість утилізації низькопотенційного тепла;
- зниження викидів CO₂.

Технічні обмеження та поетапність переходу.

Основні обмеження:

- несумісність окремих споживчих систем;
- необхідність термомодернізації будівель;
- потреба в гнучкому управлінні режимами.

Перехід реалізується поетапно:

- оптимізація існуючих графіків;
- модернізація мереж;
- адаптація кінцевих систем.

Безканалні теплові мережі у поєднанні з низькотемпературними режимами теплопостачання формують технологічну основу сучасної та майбутньої трансформації систем централізованого теплопостачання. Інтеграція конструкції трубопроводу з теплоізоляцією та ґрунтовим середовищем забезпечує суттєве зниження теплових і експлуатаційних втрат, підвищує надійність і довговічність мереж за умови високої якості проектування й монтажу. Температурний графік виступає ключовим параметром, що безпосередньо визначає рівень теплових втрат і енергетичну ефективність системи, тому його оптимізація є одним із найрезультативніших

інструментів модернізації. Перехід до низькотемпературних теплових мереж не лише скорочує втрати тепла, а й створює передумови для широкого використання теплових насосів, відновлюваних та низькопотенційних джерел енергії, що є критично важливим для декарбонізації. Водночас успішна реалізація такого переходу потребує поетапного підходу, узгодження розвитку мереж і споживчих систем та застосування системного аналізу, який враховує теплотехнічні, гідравлічні й експлуатаційні аспекти.

12.3 Методи діагностики, моніторингу та інтелектуального управління тепловими втратами

1. Роль діагностики та моніторингу в управлінні тепловими втратами.

У сучасних системах теплопостачання теплові втрати розглядаються не як фіксована величина, а як керований параметр, що залежить від технічного стану мережі, режимів експлуатації та зовнішніх умов. Ефективне управління втратами неможливе без розвинених систем діагностики та моніторингу, які забезпечують:

- раннє виявлення дефектів теплоізоляції;
- локалізацію зон підвищених втрат;
- перехід від реактивного до проактивного обслуговування.

Для аспірантського рівня принциповим є розуміння тепломережі як об'єкта спостереження з неповною та зашумленою інформацією, що вимагає застосування методів аналізу даних і теорії керування.

2. Системи дистанційного контролю стану теплоізоляції.

2.1. Волоконно-оптичні системи моніторингу.

Волоконно-оптичні методи ґрунтуються на використанні оптичного волокна, інтегрованого вздовж трубопроводу.

Принцип дії:

- вимірювання розсіяння світла (Raman, Brillouin);
- визначення розподілу температури та деформацій уздовж траси.

Переваги:

- безперервний просторовий контроль;
- висока чутливість;
- електромагнітна стійкість.

Обмеження:

- висока вартість;
- складність обробки великих масивів даних.

Науковий інтерес становлять задачі фільтрації шумів та інтерпретації температурних аномалій.

2.2. Електричні системи контролю зволоження ізоляції.

Ці системи базуються на зміні електричного опору або ємності при зволоженні теплоізоляції.

Характерні особливості:

- простота реалізації;
- інтеграція в попередньо ізольовані трубопроводи;
- дискретне виявлення аварій.

Обмеження:

- обмежена просторово-часова роздільна здатність;
- відсутність інформації про ступінь деградації.

2.3. Акустичні та вібраційні методи.

Акустичні методи дозволяють виявляти:

- витоки теплоносія;
- кавітаційні процеси;
- структурні дефекти.

Вони ґрунтуються на аналізі спектру шумів та вібрацій, що поширюються трубопроводом і ґрунтом.

Актуальним є поєднання акустичних методів з алгоритмами розпізнавання образів.

3. Тепловізійна діагностика та аналіз експлуатаційних даних.

3.1. Тепловізійне обстеження теплових мереж.

Тепловізія дозволяє:

- візуалізувати теплові втрати;
- локалізувати зони пошкодження ізоляції;
- контролювати якість монтажу.

Метод є особливо ефективним:

- у міжсезоння;
- для наземних ділянок і введів у будівлі;
- у поєднанні з геоприв'язкою.

Обмеження – залежність від погодних умов та теплового навантаження.

3.2 Інтеграція тепловізії з експлуатаційними даними.

Максимальний ефект досягається при поєднанні:

- тепловізійних знімків;
- даних SCADA (температура, витрата, тиск);
- метеорологічної інформації.

Для аспірантських досліджень важливою є задача кореляції поверхневих температур із внутрішніми тепловими втратами.

4. *Цифрові платформи та інтелектуальне управління тепловими втратами.*

4.1 Цифрові платформи управління тепломережами.

Сучасні платформи забезпечують:

- централізований збір даних;
- візуалізацію стану мережі;
- підтримку ухвалення рішень.

Вони є основою для:

- переходу до станоорієнтованого обслуговування;
- оптимізації інвестицій у ремонт.

4.2. Цифрові двійники теплових мереж.

Цифровий двійник — це динамічна модель мережі, що:

- відображає реальний стан у режимі близькому до реального часу;
- адаптується на основі вимірювань;
- дозволяє прогнозувати наслідки рішень.

Застосування:

- оцінка теплових втрат у різних режимах;
- тестування сценаріїв модернізації;
- оптимізація температурних графіків.

4.3. Методи штучного інтелекту та прогнозування втрат.

Методи ШІ використовуються для:

- прогнозування деградації теплоізоляції;
- виявлення аномалій;
- оптимізації режимів експлуатації.

Типові підходи:

- машинне навчання для аналізу часових рядів;
- нейронні мережі для нелінійних залежностей;
- гібридні моделі «фізика + дані».

Узагальнюючи, сучасні підходи до діагностики, моніторингу та інтелектуального управління тепловими втратами формують принципово нову парадигму експлуатації теплових мереж, у межах якої теплові втрати розглядаються як динамічний і керований параметр. Поєднання дистанційних систем контролю стану теплоізоляції, тепловізійної діагностики та аналізу експлуатаційних даних забезпечує своєчасне виявлення деградації елементів мережі та локалізацію джерел підвищених втрат. Інтеграція цих даних у цифрові платформи та цифрові двійники дозволяє перейти від реактивних ремонтів до станоорієнтованого та прогнозного управління, оптимізуючи режими роботи й інвестиційні рішення. Застосування методів штучного

інтелекту істотно підвищує точність прогнозування теплових втрат і підтримку ухвалення рішень, водночас вимагаючи узгодження моделей даних із фізичними законами теплопередачі та гідравліки. У сукупності ці технології є ключовим інструментом підвищення енергоефективності, надійності та декарбонізації сучасних і перспективних систем тепlopостачання.

Питання для самоконтролю

1. Які основні джерела теплових втрат у системах централізованого тепlopостачання та як вони кількісно оцінюються?
2. У чому полягають переваги та обмеження сучасних теплоізоляційних матеріалів (ППУ, вакуумна ізоляція, аерогелі) порівняно зі старими традиційними рішеннями?
3. Як конструктивні особливості безканальних тепломереж впливають на рівень теплових втрат, надійність та термін експлуатації мереж?
4. Які методи діагностики теплових втрат застосовуються в теплових мережах (тепловізійні, гідравлічні, волоконно-оптичні системи) та які їхні переваги й недоліки?
5. Яку роль відіграють системи моніторингу стану теплоізоляції та раннього виявлення пошкоджень у зниженні експлуатаційних втрат?
6. Як зниження температурних графіків теплових мереж (перехід до 4GDH) впливає на величину теплових втрат і загальну енергоефективність системи?
7. Які техніко-економічні та екологічні ефекти досягаються в результаті зменшення теплових втрат і як вони враховуються при обґрунтуванні інвестиційних рішень?

13 ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

13.1 Регулювання теплових навантажень у системах теплопостачання

Регулювання теплових навантажень є ключовим елементом забезпечення енергоефективної, надійної та адаптивної роботи систем теплопостачання в умовах змінного теплового попиту, кліматичних факторів і вимог до декарбонізації. На відміну від модернізації мереж і джерел тепла, регулювання безпосередньо впливає на баланс між виробництвом, транспортуванням і споживанням теплової енергії в режимі реального часу.

Види регулювання наведені у [1].

1. Методи кількісного та якісного регулювання.

Кількісне регулювання ґрунтується на зміні витрати теплоносія за сталої або слабо змінної температури. Воно реалізується шляхом:

- дроселювання або зміни пропускної здатності регулювальної арматури;
- використання насосів з частотним регулюванням;
- автоматичного балансування гідравлічних контурів.

Перевагою кількісного регулювання є відносна простота реалізації та висока точність адаптації до локального теплового навантаження. Водночас надмірне зниження витрати може призводити до порушення гідравлічної стабільності, погіршення тепловіддачі приладів і ризику шумів або завоздушення системи.

Якісне регулювання передбачає зміну температури теплоносія за відносно сталої витрати. Воно базується на:

- погодозалежному керуванні температурним графіком;
- змішувальних вузлах із дво- або триходовими клапанами;
- централізованому регулюванні температури подачі на джерелі тепла.

Цей метод ефективний для систем із розвиненими тепловими мережами та дозволяє знизити теплові втрати під час часткових навантажень, проте потребує точного узгодження з тепловими характеристиками споживачів.

У практиці сучасних систем дедалі ширше застосовується комбіноване кількісно-якісне регулювання, яке поєднує переваги обох підходів і забезпечує гнучкість у широкому діапазоні навантажень.

2. Центральне, групове та індивідуальне регулювання теплових навантажень.

Центральне регулювання здійснюється на джерелі тепла або головних вузлах теплової мережі. Воно включає:

- зміну температури подачі залежно від температури зовнішнього повітря;

- оптимізацію режимів роботи котлів, ТЕЦ або теплових насосів;
- управління насосним обладнанням магістральних мереж.

Центральне регулювання забезпечує загальний баланс системи, однак не враховує індивідуальні особливості будівель і внутрішніх теплових надходжень.

Групове регулювання реалізується на рівні теплових пунктів, кварталів або зон теплопостачання. Воно дозволяє:

- адаптувати теплове навантаження до типу забудови;
- зменшити дисбаланс між різними споживачами;
- підвищити гідравлічну стійкість мережі.

Індивідуальне регулювання відбувається безпосередньо на рівні будівель, приміщень або окремих теплових приладів. Основними інструментами є:

- автоматизовані індивідуальні теплові пункти;
- термостатичні клапани;
- системи внутрішнього диспетчеризаційного керування.

Комбіноване регулювання об'єднує два або більше наведених вище методів регулювання. Наприклад, центральне та індивідуальне. Комбіноване регулювання є найбільше ефективним методом регулювання [41, 42].

Індивідуальне регулювання, порівняно з груповим, забезпечує більш ефективне енергозбереження, оскільки враховує реальні потреби користувачів і внутрішні теплові надходження.

3. Вплив режимів регулювання на енергоефективність та надійність систем.

Раціонально організоване регулювання теплових навантажень безпосередньо знижує виробництво надлишкового тепла, теплові втрати в мережах і споживання палива. Перехід від жорстких температурних графіків до адаптивних режимів дозволяє:

- зменшити середню температуру теплоносія;
- підвищити ефективність конденсаційних котлів і теплових насосів;
- знизити пікові навантаження на джерела тепла.

З погляду надійності, регулювання зменшує термічні напруження в трубопроводах і обладнанні, продовжує їхній ресурс і знижує частоту аварійних ситуацій. Водночас недостатньо узгоджені режими регулювання можуть призводити до гідравлічної нестійкості та зростання експлуатаційних ризиків, що підкреслює необхідність системного підходу та цифрової підтримки управління.

Підсумовуючи, регулювання теплових навантажень є не допоміжним, а базовим інструментом підвищення енергоефективності та адаптивності систем

теплопостачання. Найвищий ефект досягається завдяки багаторівневої системи регулювання, у якій центральні, групові та індивідуальні рішення взаємодіють у єдиній керованій структурі.

13.2 Погодозалежне керування та інтелектуальні алгоритми управління теплопостачанням

Погодозалежне та інтелектуальне керування є логічним етапом еволюції систем теплопостачання від статичних режимів роботи до адаптивних, самоналаштовуваних систем, здатних мінімізувати енергоспоживання за збереження нормативних параметрів мікроклімату. На відміну від класичних схем регулювання, сучасні алгоритми орієнтовані не лише на поточний стан системи, а й на прогноз її поведінки.

1. Принципи погодозалежного регулювання подачі тепла.

Погодозалежне керування базується на функціональній залежності між температурою зовнішнього повітря та необхідними параметрами теплоносія, температурами в подавальному та зворотному трубопроводах. Основою є температурний графік, який відображає теплові втрати будівель і мереж як функцію кліматичних умов.

Ключові принципи погодозалежного регулювання включають:

- безперервний вимір температури зовнішнього повітря;
- коригування температури подачі за заданою або оптимізованою кривою;
- врахування швидкості зміни зовнішніх умов для запобігання запізненим реакціям.

На практиці застосовуються як фіксовані, так і кориговані температурні криві, що адаптуються до фактичної теплоізоляції будівель, режимів експлуатації та внутрішніх теплових надходжень. Важливим аспектом є локальна корекція погодозалежного регулювання на рівні теплових пунктів або будівель.

2. Адаптивні та прогнозні алгоритми керування з урахуванням інерційності систем.

Системи теплопостачання характеризуються значною тепловою та гідравлічною інерційністю, що зумовлює запізнення між керуючим впливом і результатом. Класичні регулятори з фіксованими налаштуваннями часто не забезпечують оптимальної роботи в таких умовах.

Адаптивні алгоритми керування автоматично змінюють параметри регуляторів на основі аналізу відгуку системи, що дозволяє:

- зменшити коливання температури;

- уникнути перерегулювання;
- стабілізувати роботу за змінних навантажень.

Прогнозні алгоритми (зокрема керування з прогножною моделлю) використовують математичні або дані-орієнтовані моделі для оцінки майбутнього стану системи з урахуванням:

- прогнозу погоди;
- очікуваних змін теплового попиту;
- накопиченого тепла в будівлях і мережах.

Завдяки цьому керуючі дії формуються наперед, що особливо важливо для систем із великим об'ємом теплоносія та значною протяжністю мереж.

3. Використання цифрових систем керування, SCADA та елементів штучного інтелекту.

Цифрові системи керування та SCADA-платформи забезпечують інтеграцію вимірювальних, виконавчих і аналітичних функцій у єдиному інформаційному середовищі. Вони дозволяють:

- здійснювати моніторинг параметрів у реальному часі;
- централізовано керувати режимами роботи;
- накопичувати історичні дані для подальшого аналізу.

Елементи штучного інтелекту доповнюють класичні алгоритми керування шляхом:

- виявлення прихованих закономірностей у великих масивах даних;
- прогнозування теплового навантаження;
- підтримки ухвалення рішень для операторів системи.

Поєднання SCADA, цифрових моделей і алгоритмів машинного навчання дозволяє перейти до самонавчальних систем керування, які поступово оптимізують свою роботу в процесі експлуатації.

Погодозалежне керування та інтелектуальні алгоритми управління формують основу для підвищення енергоефективності, стійкості та гнучкості сучасних систем тепlopостачання. Їхнє упровадження є необхідною умовою інтеграції відновлюваних джерел енергії, зниження теплових втрат і забезпечення надійної роботи систем у мінливих кліматичних та експлуатаційних умовах.

13.3 Балансування теплових мереж та оптимізація гідравлічних режимів

Балансування теплових мереж і оптимізація гідравлічних режимів є критично важливими складовими ефективної експлуатації систем тепlopостачання, особливо в умовах поетапної модернізації, впровадження автоматизованого регулювання та переходу до низькотемпературних режимів.

На відміну від теплотехнічних аспектів, гідравліка визначає реальну можливість доставки необхідної кількості тепла до споживачів із мінімальними енергетичними витратами.

1. Гідравлічне балансування розподільчих і магістральних теплових мереж.

Гідравлічне балансування полягає у встановленні такого розподілу витрат теплоносія, за якого всі споживачі отримують проектну або необхідну кількість тепла незалежно від їхнього гідравлічного розташування в мережі. У небалансованих системах характерним є перевитрата теплоносія у ближніх до джерела споживачів та дефіцит у віддалених, що призводить до зниження якості теплопостачання й зростання енергоспоживання.

Для магістральних теплових мереж балансування спрямоване на:

- забезпечення розрахункових витрат у основних гілках;
- обмеження паразитних перетоків між зонами;
- стабілізацію тисків у характерних вузлах системи.

У розподільчих мережах та внутрішньоквартальних контурах основна увага приділяється:

- вирівнюванню гідравлічних опорів гілок;
- запобіганню надмірним швидкостям потоку;
- забезпеченню коректної роботи автоматичних регуляторів і термостатичних клапанів.

Балансування може бути статичним (з використанням дросельних і балансувальних клапанів із фіксованими налаштуваннями) або динамічним, коли застосовуються регулятори перепаду тиску та автоматичні балансувальні пристрої, що адаптуються до змін режимів роботи.

2. Оптимізація тисків, витрат та режимів роботи насосного обладнання.

Насосне обладнання є одним із найбільших споживачів електроенергії в системах теплопостачання, тому оптимізація його роботи має значний енергозберігаючий потенціал. Надлишкові тиски та витрати, характерні для небалансованих мереж, призводять до:

- перевитрат електроенергії;
- зростання зношування трубопроводів і арматури;
- підвищеного ризику гідравлічних ударів.

Оптимізація гідравлічних режимів передбачає:

- зниження необхідного напору насосів до мінімально достатнього рівня;
- перехід від постійної до змінної витрати теплоносія;
- впровадження частотного регулювання насосів;
- зонування мережі за тиском.

У добре збалансованій системі насос працює не «на гірший випадок», а адаптується до поточного теплового навантаження. Це дозволяє значно зменшити споживання електроенергії, оскільки потужність насоса нелінійно залежить від витрати й напору. Водночас оптимальні гідравлічні режими забезпечують стабільну роботу регулювальної арматури та знижують шум і вібрації в системі.

3. Моделювання гідравлічних режимів і вплив оптимізації на зниження втрат енергії.

Сучасне управління тепловими мережами неможливе без математичного та імітаційного моделювання гідравлічних режимів. Моделі дозволяють описати розподіл тисків, витрат і швидкостей у мережі з урахуванням:

- змінних теплових навантажень;
- роботи регулювальних і балансувальних пристроїв;
- режимів роботи насосних станцій.

Гідравлічне моделювання використовується для:

- аналізу існуючих проблем небалансованості;
- вибору оптимальних місць встановлення регуляторів тиску;
- оцінки ефекту від зниження температурних і гідравлічних режимів;
- обґрунтування інвестиційних рішень.

Оптимізація, підтверджена моделями, призводить до зниження гідравлічних втрат (електроспоживання насосів) та опосередковано – до зменшення теплових втрат шляхом стабілізації режимів і зниження середніх температур теплоносія. У перспективі такі моделі стають складовою цифрових двійників теплових мереж і використовуються для прогнозного управління.

Отже, гідравлічне балансування та оптимізація режимів є фундаментом для ефективної роботи автоматизованих, погодозалежних і низькотемпературних систем теплопостачання. Без вирішення гідравлічних проблем потенціал енергозбереження сучасних технологій реалізується лише частково, що робить цю тему ключовою для практики та наукових досліджень у галузі теплопостачання.

Питання для самоконтролю

1. У чому полягає поняття оптимального режиму роботи системи теплопостачання та які критерії оптимальності застосовуються?
2. Як регулювання теплових навантажень впливає на ефективність джерел тепла та теплових мереж у різних режимах споживання?

3. Які принципи та алгоритми лежать в основі погодозалежного керування системами теплопостачання, і які його обмеження в умовах сучасних кліматичних змін?

4. Що таке гідравлічне балансування теплових мереж та які наслідки має його відсутність для енергоефективності і надійності системи?

5. Які методи використовуються для оптимізації гідравлічних режимів у розгалужених теплових мережах?

6. Як цифрові технології та системи диспетчеризації змінюють підходи до операційної оптимізації режимів теплопостачання?

7. Які компроміси виникають між енергозбереженням, комфортом споживачів та довговічністю обладнання при оптимізації режимів роботи систем теплопостачання?

14 ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

14.1 Зменшення шкідливих викидів у системах теплопостачання

Скорочення шкідливих викидів у системах теплопостачання є одним із ключових завдань екологічної модернізації енергетики, оскільки централізовані та децентралізовані джерела тепла формують суттєву частку локального та глобального забруднення атмосферного повітря. На відміну від питань енергоефективності, екологічні показники безпосередньо пов'язані з типом палива, технологією спалювання та режимами експлуатації обладнання.

1. Джерела забруднення атмосферного повітря в системах теплопостачання.

Основними джерелами викидів у системах теплопостачання є котельні установки, ТЕЦ та локальні теплогенератори, в яких відбувається процес спалювання палива. Найбільш значущими забруднювальними речовинами є:

- діоксид вуглецю (CO_2) – основний парниковий газ, обсяги якого прямо пропорційні вуглецевому складу палива та його питомій витраті. CO_2 не є токсичним у локальному сенсі, але визначає кліматичний вплив теплопостачання;
- оксиди азоту (NO_x) – утворюються за високих температур у зоні горіння внаслідок окиснення азоту повітря та палива. Вони негативно впливають на здоров'я людини та сприяють утворенню приземного озону;
- діоксид сірки (SO_2) – характерний для спалювання твердого та рідкого палива з підвищеним вмістом сірки, є причиною кислотних дощів і корозії;
- тверді частинки (пил, зола, сажа) – притаманні котлам на твердому паливі та застарілим установкам, створюють серйозні санітарні ризики, особливо в міських умовах.

Інтенсивність викидів визначається не лише видом палива, а й конструкцією котла, якістю спалювання та стабільністю режимів роботи.

2. Технічні та технологічні методи скорочення викидів.

Скорочення шкідливих викидів може бути досягнуте як завдяки удосконаленню процесу спалювання, так і шляхом очищення продуктів згоряння.

Модернізація котлів і пальникових пристроїв передбачає:

- застосування низькоемісійних пальників;
- оптимізацію подачі повітря;
- покращення змішування палива й окиснювача;
- стабілізацію температурного поля в камері згоряння.

Конденсаційні технології дозволяють не лише підвищити паливну ефективність, а й знизити викиди CO_2 на одиницю виробленого тепла. Завдяки утилізації прихованої теплоти водяної пари зменшується питомий витрат палива та температура димових газів.

Системи очищення димових газів застосовуються насамперед на середніх і великих джерелах тепла та включають:

- циклонні та рукавні фільтри для уловлювання пилу;
- електрофільтри;
- установки десульфуризації для зниження SO_2 ;
- селективні та неселективні системи відновлення NO_x .

Комбінація заходів дозволяє суттєво знизити екологічне навантаження навіть без повної заміни джерела тепла.

3. Вплив режимів роботи та палива на екологічні показники.

Режими експлуатації теплогенеруючого обладнання мають значний вплив на рівень викидів. Робота в часткових навантаженнях, часті пуски та зупинки, нестабільна подача палива призводять до:

- погіршення повноти згоряння;
- зростання викидів CO , NO_x і твердих частинок;
- зниження загальної екологічної ефективності.

Перехід на менш вуглецеві та чисті палива (природний газ, біометан, синтетичні гази, водень у домішках) істотно покращує екологічні показники, зменшуючи як локальні забруднення, так і кліматичний вплив. Водночас використання альтернативних палив вимагає адаптації пальників, систем керування та заходів безпеки.

Оптимальні режими роботи, поєднані з автоматизованим керуванням і стабільним тепловим навантаженням, дозволяють мінімізувати викиди без значних капітальних витрат, що робить експлуатаційні заходи важливим доповненням до технічної модернізації.

Таким чином, зменшення шкідливих викидів у системах теплопостачання досягається шляхом комплексного впливу на джерело утворення забруднень, технологію спалювання та режими експлуатації. Поєднання технічної модернізації, переходу на чистіші палива й оптимізації режимів роботи є необхідною умовою екологічної трансформації теплопостачання та виконання сучасних вимог з охорони довкілля.

14.2 Впровадження чистих та низьковуглецевих технологій теплопостачання

Перехід до чистих і низьковуглецевих технологій теплопостачання є стратегічним напрямом трансформації енергетичних систем, спрямованим на зменшення кліматичного та екологічного впливу за одночасного забезпечення надійності теплопостачання. На відміну від локальних заходів з підвищення ефективності, ці технології змінюють саму логіку виробництва тепла, поєднуючи теплові, електричні та газові сектори в єдину інтегровану систему.

1. Використання відновлюваних джерел енергії та відхідного тепла.

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) у теплопостачанні охоплюють широкий спектр технологій, здатних забезпечувати як базове, так і пікове теплове навантаження. Найбільш поширеними є:

- сонячні теплові колектори;
- геотермальні джерела;
- теплота ґрунту, води та повітря;
- біомаса й біогаз.

Особливе місце займає використання відхідного тепла промислових процесів, електростанцій, систем охолодження та центрів обробки даних. Таке тепло, як правило, має низький або середній температурний потенціал і потребує підвищення рівня температури або інтеграції в низькотемпературні теплові мережі. Його залучення дозволяє суттєво знизити первинне споживання палива та викиди парникових газів без значного додаткового навантаження на довкілля.

Ефективна інтеграція ВДЕ й відхідного тепла вимагає розвитку систем акумулювання теплової енергії та гнучких мереж, здатних працювати в змінних режимах.

2. Теплові насоси, когенераційні та тригенераційні установки.

Теплові насоси є однією з ключових технологій низьковуглецевого теплопостачання, оскільки дозволяють перетворювати електричну енергію на теплову з високим коефіцієнтом корисної дії. За умови декарбонізації електроенергетики вони забезпечують суттєве скорочення викидів CO₂ порівняно з традиційними котлами.

У централізованих системах теплопостачання теплові насоси ефективні для:

- підвищення температури відхідного тепла;
- роботи в низькотемпературних мережах;
- балансування теплових і електричних навантажень.

Когенераційні установки забезпечують одночасне виробництво теплової та електричної енергії з одного виду палива, що значно підвищує загальну паливну ефективність. Використання біогазу, синтетичних газів або сумішей із воднем дозволяє розглядати когенерацію як перехідну або навіть довгострокову низьковуглецеву технологію.

Тригенерація доповнює когенераційні системи можливістю виробництва холоду, що особливо актуально для об'єктів із цілорічним попитом на теплову та холодоагентну енергію. Це підвищує коефіцієнт використання обладнання та зменшує загальне споживання енергії.

3. Роль електрифікації та технологій Power-to-Heat.

Електрифікація теплопостачання є одним із ключових інструментів зниження вуглецевого сліду за умови зростання частки відновлюваної електроенергії. Технології Power-to-Heat передбачають перетворення електричної енергії в теплову з подальшим використанням у системах опалення та гарячого водопостачання.

До основних рішень Power-to-Heat належать:

- електричні котли;
- великі теплові насоси;
- гібридні системи з тепловим акумулюванням.

Ці технології дозволяють:

- інтегрувати надлишкову електроенергію з ВДЕ;
- підвищити гнучкість енергосистеми;
- зменшити потребу у викопному паливі для виробництва тепла.

Водночас ефективність електрифікації залежить від тарифної політики, доступності акумулювання та рівня декарбонізації електроенергетики.

Впровадження чистих і низьковуглецевих технологій теплопостачання базується на комплексному використанні відновлюваних джерел енергії, відхідного тепла, теплових насосів і високоефективних комбінованих установок. Електрифікація та технології Power-to-Heat формують міст між тепловим і електричним секторами, забезпечуючи гнучкість, енергоефективність і суттєве зниження екологічного навантаження систем теплопостачання в довгостроковій перспективі.

14.3 Екологічні критерії та методи оцінювання систем теплопостачання

Оцінка екологічності та енергоефективності систем теплопостачання є ключовим етапом планування, модернізації та впровадження низьковуглецевих технологій. Вона дозволяє не лише порівнювати альтернативні рішення, а й

обґрунтовувати інвестиції та приймати стратегії розвитку системи з урахуванням сталого розвитку та вимог декарбонізації.

1. Показники енергоефективності та екологічної безпеки.

Для комплексної оцінки систем теплопостачання використовують широкий спектр показників, що відображають як споживання енергоресурсів, так і вплив на довкілля:

- вуглецевий слід (Carbon Footprint, CF) – сумарні викиди CO₂ та еквівалентних парникових газів на одиницю виробленої теплової енергії. Дає змогу порівнювати традиційні та низьковуглецеві технології;
- питомі викиди забруднювальних речовин (NO_x, SO₂, пил, CO) на одиницю тепла. Визначають локальний екологічний вплив і регулюються стандартами якості повітря;
- ексергетичні критерії оцінюють якість використання енергії та враховують потенціал корисного використання тепла і електрики. Високий ексергетичний ККД свідчить про ефективне перетворення первинних ресурсів у корисну енергію, знижуючи викиди та енергетичні втрати;
- коефіцієнт використання поновлюваних джерел (RES Share) – частка тепла, отриманого з відновлюваних джерел, у загальному виробництві теплової енергії.

Ці показники застосовуються як для окремих вузлів (котельні, ТЕЦ, теплові насоси), так і для всієї теплової мережі.

2. Оцінка життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) та екологічна сертифікація.

Оцінка життєвого циклу дозволяє враховувати всі етапи існування системи теплопостачання:

2.1 Виробництво обладнання та матеріалів – котли, насоси, трубопроводи, ізоляційні матеріали.

2.2 Будівництво та монтаж – транспортування, зварювальні та монтажні роботи.

2.3 Експлуатація – споживання палива та електроенергії, утримання, технічне обслуговування.

2.4 Утилізація та рекуперація – демонтаж, вторинне використання матеріалів, обробка відходів.

LCA дозволяє визначити повний екологічний вплив системи та порівняти альтернативні технології. Наприклад, тепловий насос із низьковуглецевою електроенергією може мати низькі викиди під час експлуатації, але високу «вбудовану» енергію при виробництві обладнання.

Екологічна сертифікація (ISO 14001, LEED, BREEAM, DGNB) є формалізованим підтвердженням того, що система відповідає міжнародним стандартам сталого розвитку та екологічної безпеки. Вона враховує енергоспоживання, викиди, використання ресурсів та вплив на здоров'я людей.

3. Використання багатокритеріального аналізу для ухвалення рішень.

Модернізація теплових мереж та джерел тепла вимагає зважування численних факторів:

- економічні показники (CAPEX, OPEX, термін окупності);
- енергетична ефективність (ККД, ексергетичні показники);
- екологічні критерії (викиди CO₂, NO_x, SO₂, пил, RES share);
- соціальні та нормативні вимоги.

Багатокритеріальний аналіз (МСА) дозволяє формалізовано оцінити альтернативи та ранжувати рішення за сумарною ефективністю. Методи МСА включають:

- вага-критерійні методи (Weighted Sum Model, Analytic Hierarchy Process) – дозволяють надавати різну вагу економічним, екологічним та технічним критеріям;
- методи оптимізації – пошук компромісних рішень у системах із конфліктуючими цілями, наприклад, максимальна енергоефективність за мінімального вуглецевого сліду;
- сценарне моделювання – оцінка довгострокових наслідків різних стратегій модернізації.

Використання МСА дозволяє обґрунтовано визначити пріоритети в реконструкції мереж, виборі джерел тепла та впровадженні нових технологій, з урахуванням сталого розвитку та екологічної безпеки.

Оцінювання систем теплопостачання за екологічними критеріями є комплексним процесом, що поєднує показники енергоефективності, викидів, ексергетичних характеристик, а також оцінку життєвого циклу. Використання багатокритеріального аналізу та екологічної сертифікації дозволяє приймати науково обґрунтовані рішення щодо модернізації та впровадження низьковуглецевих технологій, забезпечуючи баланс між економічною доцільністю та зменшенням екологічного навантаження.

Питання для самоконтролю

1. Які основні джерела шкідливих викидів у системах теплопостачання та як вони залежать від типу палива і технології генерації тепла?

2. Які технічні та технологічні рішення є найбільш ефективними для зменшення викидів CO₂, NO_x, SO₂ та твердих частинок у системах теплопостачання?

3. У чому полягає роль високоефективних та «чистих» технологій (теплові насоси, когенерація, використання ВДЕ) у підвищенні екологічної безпеки теплопостачання?

4. Як енергоефективність систем теплопостачання впливає на рівень екологічного навантаження та які показники використовуються для її оцінювання?

5. Які екологічні критерії та індикатори застосовуються для комплексної оцінки систем теплопостачання (викиди, первинна енергія, LCA, ексергетичні показники)?

6. Як оцінка життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) змінює підхід до вибору технологій і модернізації систем теплопостачання?

7. Які компроміси виникають між економічною доцільністю, енергоефективністю та екологічною безпекою при прийнятті рішень щодо розвитку систем теплопостачання?

15 АДАПТАЦІЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ДО ЗМІН КЛІМАТУ ТА КОЛИВАНЬ ПОПИТУ

15.1 Адаптація систем теплопостачання до змін клімату та екстремальних умов

Зміна клімату призводить до зростання частоти та інтенсивності екстремальних погодних явищ, що безпосередньо впливає на надійність і ефективність систем теплопостачання. Для сучасних і перспективних теплових мереж адаптація до кліматичних ризиків стає не менш важливою, ніж декарбонізація, оскільки порушення стабільності роботи в екстремальних умовах може нівелювати досягнення в енергоефективності та екологічності.

1. Кліматичні виклики для систем теплопостачання.

Основними проявами кліматичних змін, що впливають на теплопостачання, є:

- зростання кількості аномально холодних і теплих періодів;
- збільшення амплітуди добових і сезонних коливань температури;
- часті відлиги взимку та різкі похолодання;
- екстремальні погодні явища (сильні морози, ожеледь, повені, посухи).

Ці фактори призводять до нестабільності теплового попиту, зростання пікових навантажень або, навпаки, тривалих періодів часткової роботи обладнання, що створює додаткові експлуатаційні ризики для джерел тепла, мереж і споживчих систем.

2. Стратегії підвищення стійкості до аномальних температур і коливань попиту.

Адаптація систем теплопостачання передбачає розробку стратегій, спрямованих на підвищення їхньої гнучкості та резервування. До ключових напрямів належать:

- диверсифікація джерел тепла, зокрема поєднання базових і пікових потужностей різної технологічної природи (котли, теплові насоси, електричні котли, когенерація);
- резервування потужностей і мережевих маршрутів, що дозволяє зберігати теплопостачання навіть за відмов окремих елементів;
- теплове акумулювання (короткострокове та довгострокове), яке згладжує пікові навантаження та компенсує швидкі зміни попиту;
- гнучкі температурні та гідравлічні режими, що дозволяють адаптувати систему до нетипових кліматичних умов без перевантаження обладнання.

Такі заходи сприяють підвищенню надійності системи в умовах невизначеності кліматичних сценаріїв.

3. Використання прогнозних моделей для планування роботи систем.

Прогнозування є основою проактивного управління теплопостачанням в умовах змін клімату. Сучасні прогнозні моделі поєднують:

- кліматичні та метеорологічні прогнози;
- моделі теплового попиту з урахуванням інерційності будівель;
- цифрові моделі мереж і джерел тепла.

Застосування прогнозних моделей дозволяє:

- завчасно підготувати систему до пікових або аномальних навантажень;
- оптимізувати режими роботи джерел тепла та насосного обладнання;
- знизити ризик аварій та перевитрат енергії;
- планувати технічне обслуговування з урахуванням кліматичних умов.

Інтеграція прогнозних інструментів у цифрові платформи управління та SCADA-системи створює основу для сценарного планування та підвищує адаптивність теплопостачання.

4. Інституційні та експлуатаційні аспекти адаптації.

Окрім технічних рішень, адаптація потребує організаційних і управлінських заходів:

- розробки планів реагування на надзвичайні кліматичні ситуації;
- підготовки персоналу до роботи в нестандартних режимах;
- актуалізації нормативних документів з урахуванням кліматичних ризиків;
- взаємодії з міськими службами цивільного захисту та енергосистемами.

Такі заходи підвищують загальну стійкість теплопостачання та зменшують соціальні наслідки кліматичних екстремумів.

15.2 Залучення споживачів та розвиток індивідуального регулювання теплопостачання

Активна участь споживачів у процесі управління тепловою енергією є одним із найефективніших інструментів підвищення енергоефективності систем теплопостачання. На відміну від суто технічних заходів на рівні джерел і мереж, індивідуальне регулювання та прозоре облікування безпосередньо впливають на поведінку користувачів, формуючи економічну й екологічну відповідальність.

1. Індивідуальний облік теплової енергії як основа керованого споживання.

Встановлення індивідуальних теплових лічильників у будівлях і окремих квартирах забезпечує перехід від нормативного до фактичного споживання тепла. Облік у реальному часі дозволяє:

- фіксувати реальну потребу в тепловій енергії;
- виявляти неефективні режими опалення;
- формувати економічно обґрунтовані рахунки.

Індивідуальний облік створює передумови для впровадження гнучких тарифів і стимулює споживачів до оптимізації теплового режиму без погіршення комфорту. Важливим аспектом є сумісність лічильників із системами дистанційного зчитування даних та цифровими платформами управління.

2. Автоматизовані вузли регулювання та «розумне» споживання.

Автоматизовані індивідуальні теплові пункти та квартирні вузли регулювання забезпечують точну адаптацію подачі тепла до фактичних потреб споживача. Основні функції таких систем включають:

- погодозалежне регулювання температури;
- часові графіки опалення;
- обмеження максимального теплового навантаження;
- інтеграцію з внутрішніми системами керування будівлею.

Системи «розумного» споживання тепла поєднують облік, регулювання та аналітику, дозволяючи користувачам:

- отримувати інформацію про споживання в зручному цифровому форматі;
- порівнювати власні показники з еталонними або середніми;
- оперативно реагувати на відхилення в режимах роботи.

Такі рішення перетворюють споживача з пасивного отримувача тепла на активного учасника системи.

3. Прозорість, мотивація та поведінкові аспекти енергоощадності.

Прозорість даних про споживання тепла є ключовою умовою формування мотивації до енергоощадної поведінки. Доступність інформації дозволяє:

- усвідомлювати зв'язок між режимами опалення та витратами;
- оцінювати ефект від енергозберігаючих заходів;
- підвищувати довіру між споживачами та операторами тепломереж.

Мотиваційні механізми можуть включати:

- диференційовані тарифи;
- фінансові стимули за зниження споживання;
- інформаційні та освітні програми.

Поведінкові фактори відіграють важливу роль, оскільки навіть за наявності сучасних технологій відсутність зацікавленості користувачів може суттєво обмежити ефект від модернізації.

4. Вплив індивідуального регулювання на роботу системи тепlopостачання.

Масове впровадження індивідуального регулювання змінює характер роботи всієї системи тепlopостачання. Воно:

- знижує пікові теплові навантаження;
- вирівнює графіки споживання;
- підвищує ефективність джерел тепла;
- зменшує теплові втрати в мережах.

Водночас індивідуальне регулювання потребує узгодження з центральними та груповими системами управління, щоб уникнути гідравлічної нестабільності та дисбалансів.

Залучення споживачів і розвиток індивідуального регулювання є важливим соціально-технічним компонентом сучасних систем тепlopостачання. Поєднання точного обліку, автоматизованих вузлів регулювання та прозорості інформації створює умови для підвищення енергоефективності, зниження витрат і формування культури відповідального та сталого споживання теплової енергії.

15.3 Розвиток децентралізованих та локальних систем тепlopостачання

Децентралізація тепlopостачання розглядається як стратегічний напрям модернізації енергетичної інфраструктури, особливо в умовах зростання вимог до енергоефективності, стійкості та безпеки постачання тепла. На відміну від традиційних централізованих систем з протяжними мережами, локальні джерела тепла орієнтовані на обслуговування обмежених територій або окремих споживачів, що дозволяє мінімізувати втрати та підвищити оперативність управління.

1. Мікро- та квартальні котельні як елемент гнучкої інфраструктури.

Мікро- та квартальні котельні призначені для теплозабезпечення окремих будівельних комплексів, житлових кварталів або громадських об'єктів. Їхні ключові особливості:

- компактність та модульність, що спрощує розміщення і масштабування;
- можливість швидкого введення в експлуатацію;
- адаптація до локального графіка теплових навантажень.

Такі котельні можуть працювати на різних видах палива або в гібридних конфігураціях, що забезпечує високу гнучкість та зменшує залежність від одного енергоносія. Локальне розміщення джерела тепла значно скорочує довжину теплових мереж і, відповідно, теплові та гідравлічні втрати.

2. Когенераційні установки в локальних системах теплопостачання.

Когенераційні установки (одночасне виробництво теплової та електричної енергії) є ефективним рішенням для децентралізованих систем. У локальному масштабі вони забезпечують:

- високий сумарний ККД завдяки утилізації тепла від виробництва електроенергії;
- зниження питомих витрат палива;
- можливість автономної роботи в режимі ізолюваної мережі.

Інтеграція когенерації на рівні мікрорайонів або окремих об'єктів дозволяє формувати енергоцентри, які гнучко реагують на зміну попиту та підтримують стабільність енергопостачання.

3. Локальні джерела тепла та диверсифікація енергоресурсів.

Використання локальних джерел тепла включає котельні, теплові насоси, установки на біомасі, утилізацію відхідного тепла та гібридні системи. Диверсифікація джерел:

- підвищує надійність теплозабезпечення;
- зменшує ризики, пов'язані з перебоями постачання палива;
- дозволяє оптимізувати режими роботи залежно від вартості та доступності енергоресурсів.

Локальні системи легко інтегруються з відновлюваними джерелами енергії та акумулюванням тепла, що додатково підвищує їхню ефективність і екологічну доцільність.

4. Скорочення втрат та підвищення ефективності мереж.

Однією з головних переваг децентралізованих систем є суттєве зменшення втрат у теплових мережах. Скорочення протяжності трубопроводів:

- знижує теплові втрати під час транспортування;
- зменшує витрати на експлуатацію та ремонти;
- підвищує загальну надійність системи.

Крім того, локальні мережі легше піддаються гідравлічному балансуванню та автоматизованому управлінню, що позитивно впливає на стабільність теплопостачання.

5. Системна гнучкість та стійкість до зовнішніх впливів.

Децентралізовані системи теплопостачання мають підвищену стійкість до аварійних ситуацій та екстремальних умов, оскільки відмова одного джерела не

призводить до повної зупинки теплозабезпечення великої території. Можливість резервування та взаємного підстрахування локальних джерел створює більш гнучку та адаптивну енергетичну систему.

Розвиток децентралізованих та локальних систем теплопостачання забезпечує підвищення енергоефективності, надійності та екологічної сталості теплової інфраструктури. Завдяки диверсифікації джерел, скороченню втрат у мережах та впровадженню когенераційних і модульних рішень такі системи стають важливим елементом сучасних і перспективних моделей теплозабезпечення.

Адаптація систем теплопостачання до змін клімату є комплексним завданням, що поєднує технічні, прогнозні та управлінські рішення. Розвиток гнучких, резервованих і цифрово керованих систем дозволяє забезпечити надійне теплопостачання за умов аномальних температур, коливань попиту та зростаючих кліматичних ризиків, доповнюючи процеси декарбонізації та підвищення енергоефективності.

Питання для самоконтролю

1. Які основні кліматичні ризики необхідно враховувати під час проектування та експлуатації сучасних систем теплопостачання?
2. Як використання прогнозних моделей і сценарного планування підвищує стійкість систем теплопостачання в умовах змін клімату?
3. Яку роль відіграють індивідуальні теплові лічильники та автоматизовані вузли регулювання у формуванні енергоощадної поведінки споживачів?
4. У чому полягає взаємозв'язок між прозорістю обліку теплової енергії та мотивацією споживачів до зменшення теплових навантажень?
5. Які переваги та обмеження мають децентралізовані та локальні системи теплопостачання порівняно з традиційними централізованими мережами?
6. Як диверсифікація джерел тепла впливає на надійність і гнучкість теплозабезпечення в умовах кризових ситуацій?
7. Як поєднання адаптації до кліматичних змін, активної участі споживачів та розвитку децентралізованих систем формує основу сталого розвитку теплопостачання?

16 ЕКОНОМІЧНІ ТА ОРГАНІЗАЦІЙНІ АСПЕКТИ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

16.1 Економічна ефективність та фінансові механізми модернізації систем теплопостачання

Модернізація систем теплопостачання є капіталомістким процесом, тому її успішна реалізація потребує комплексної економічної оцінки та застосування адекватних фінансових механізмів. В умовах енергетичного переходу економічна ефективність проєктів визначається не лише прямими витратами і доходами, а й довгостроковими вигодами, зниженням ризиків та екологічними ефектами.

1. Методи техніко-економічного обґрунтування проєктів.

Life Cycle Cost (LCC) – метод оцінки вартості життєвого циклу дозволяє врахувати всі витрати, пов'язані з об'єктом теплопостачання: капітальні інвестиції, експлуатаційні витрати, ремонти, модернізації та ліквідацію. LCC дає змогу порівнювати альтернативні технологічні рішення з урахуванням їх довговічності та експлуатаційної надійності, що є особливо важливим для теплових мереж і джерел тепла з тривалим строком експлуатації.

Levelized Cost of Heat (LCOH) – LCOH відображає усереднену собівартість виробництва одиниці теплової енергії протягом усього строку експлуатації установки. Цей показник широко застосовується для порівняння різних джерел тепла (котельні, теплові насоси, когенерація, відновлювані джерела) незалежно від масштабу проєкту та структури витрат.

Cost–Benefit Analysis (CBA) – аналіз «витрати – вигоди» дозволяє оцінити доцільність проєкту з позицій суспільної ефективності. Окрім фінансових показників, у CBA враховуються зовнішні ефекти: скорочення викидів, зниження залежності від імпортного палива, покращення надійності та якості теплопостачання. Це робить метод особливо релевантним для проєктів, що реалізуються за участю держави або міжнародних інституцій.

2. Інвестиційні моделі та фінансування модернізації.

Інвестиційні моделі. Модернізація систем теплопостачання може реалізовуватися за різними моделями: муніципальні інвестиції, державно-приватне партнерство, енергосервісні контракти, концесії. Вибір моделі залежить від масштабу проєкту, фінансової спроможності замовника та рівня ризиків, які сторони готові взяти на себе.

Тарифоутворення. Економічна стійкість проєктів значною мірою визначається тарифною політикою. Сучасні підходи передбачають перехід до економічно обґрунтованих тарифів, які покривають повні витрати життєвого

циклу та стимулюють інвестиції в енергоефективні технології. Водночас важливим є баланс між інвестиційною привабливістю та соціальною доступністю теплової енергії.

Державна підтримка та міжнародні фінансові інструменти. Для зменшення фінансового навантаження застосовуються механізми державної підтримки: субсидії, податкові пільги, гарантії, компенсація відсоткових ставок. Значну роль відіграють міжнародні фінансові інституції, які надають пільгові кредити, гранти та технічну допомогу для проєктів декарбонізації та підвищення енергоефективності.

3. Оцінка економічних ризиків і невизначеностей.

В умовах енергетичного переходу економічні розрахунки супроводжуються значною невизначеністю. До ключових ризиків належать:

- коливання цін на енергоносії та вуглецеві викиди;
- зміни нормативно-регуляторного середовища;
- технологічні ризики, пов'язані з впровадженням нових рішень;
- фінансові та валютні ризики при залученні зовнішнього фінансування.

Для зниження впливу невизначеностей застосовуються сценарний аналіз, чутливісні дослідження та поетапна реалізація проєктів. Такий підхід дозволяє адаптувати інвестиційні рішення до змін зовнішніх умов і підвищити їхню довгострокову економічну стійкість.

Економічна ефективність модернізації систем теплопостачання формується на перетині техніко-економічного аналізу, гнучких фінансових механізмів та системного управління ризиками. Використання методів LCC, LCON і CBA, поєднане з сучасними інвестиційними моделями та державною підтримкою, створює основу для сталого та економічно обґрунтованого розвитку теплопостачання в умовах енергетичного переходу.

16.2 Організаційні моделі управління та регулювання розвитку систем теплопостачання

Ефективний розвиток систем теплопостачання визначається не лише технічними та економічними рішеннями, а й адекватними організаційними моделями управління, які формують правила взаємодії між виробниками тепла, операторами мереж, споживачами та регуляторними органами. В умовах енергетичного переходу управління теплопостачанням дедалі більше орієнтується на гнучкість, прозорість і залучення локальних стейкхолдерів.

1. Централізовані та децентралізовані моделі управління.

Централізована модель управління.

Передбачає єдиного оператора або групу операторів, відповідальних за виробництво, транспортування та постачання теплової енергії в межах великої території. Така модель забезпечує:

- узгоджене стратегічне планування розвитку інфраструктури;
- ефект масштабу при закупівлях і експлуатації;
- стандартизацію технічних рішень та процедур.

Разом з тим централізоване управління часто характеризується низькою адаптивністю до локальних умов та обмеженою мотивацією до впровадження інновацій.

Децентралізована модель управління.

Базується на розподілі повноважень між кількома незалежними або напівнезалежними суб'єктами (локальні оператори, енергосервісні компанії, об'єднання споживачів). Основні переваги:

- підвищена гнучкість та швидкість ухвалення рішень;
- краща адаптація до місцевих потреб і ресурсів;
- стимулювання конкуренції та інновацій.

Децентралізоване управління потребує чітких правил координації та розмежування відповідальності, щоб уникнути фрагментації системи.

2. Регуляторні механізми та роль місцевих громад.

Регуляторні механізми.

Регулювання розвитку теплопостачання включає встановлення правил тарифоутворення, технічних стандартів, вимог до якості послуг та екологічних обмежень. Сучасні підходи передбачають:

- перехід від жорсткого адміністративного контролю до стимулюючого регулювання;
- створення умов для залучення приватних інвестицій;
- підтримку інноваційних і низьковуглецевих технологій.

Роль місцевих громад і муніципалітетів.

Муніципалітети відіграють ключову роль як власники або замовники послуг теплопостачання. Їхні функції включають:

- стратегічне планування розвитку теплопостачання на місцевому рівні;
- координацію між різними учасниками ринку;
- забезпечення балансу між економічною ефективністю та соціальними інтересами.

Активна участь громад сприяє підвищенню прозорості управління та прийняттю рішень, орієнтованих на довгострокову стійкість.

3. Інституційні бар'єри впровадження інновацій.

До основних інституційних бар'єрів належать:

- фрагментоване законодавство та суперечливі регуляторні вимоги;
- обмежена автономія місцевих операторів;
- недостатня координація між енергетичними та екологічними політиками;
- дефіцит управлінських і технічних компетенцій.

Такі бар'єри уповільнюють впровадження інноваційних технологій і знижують інвестиційну привабливість сектора.

4. Шляхи подолання інституційних обмежень.

Подолання інституційних бар'єрів потребує комплексного підходу, який включає:

- гармонізацію нормативно-правової бази з цілями декарбонізації;
- розширення повноважень і відповідальності місцевих органів управління;
- розвиток партнерств між державою, бізнесом і громадами;
- інституційне навчання та підвищення кваліфікації персоналу.

Важливим елементом є формування довгострокових стратегій розвитку теплопостачання, які поєднують технічні, економічні та організаційні аспекти.

Організаційні моделі управління та регулювання розвитку систем теплопостачання визначають здатність галузі до модернізації та інновацій. Поєднання централізованого стратегічного планування з децентралізованими механізмами реалізації, активна роль муніципалітетів і подолання інституційних бар'єрів створюють основу для сталого та адаптивного розвитку теплопостачання в умовах енергетичного переходу.

16.3 Управління проєктами модернізації та ризиками в системах теплопостачання

Модернізація систем теплопостачання є багатовимірним процесом, що поєднує технічні, економічні, організаційні та соціальні аспекти. Ефективне управління проєктами в цій сфері спрямоване на забезпечення досягнення запланованих показників енергоефективності, надійності та екологічної сталості за умов високої невизначеності та довготривалих інвестиційних циклів.

1. Планування та етапність реалізації проєктів модернізації.

Планування проєктів модернізації теплопостачання ґрунтується на системному підході та поетапній реалізації. Типова структура включає:

- передпроєктний етап, що охоплює аудит технічного стану, формування цілей і вибір сценаріїв розвитку;
- проєктування, де деталізуються технічні рішення, графіки робіт і кошториси;
- реалізацію, яка передбачає реконструкцію об'єктів, монтаж обладнання та інтеграцію нових технологій;
- введення в експлуатацію та оптимізацію, з коригуванням режимів роботи;
- експлуатаційний етап, орієнтований на досягнення довгострокових ефектів.

Поетапність дозволяє зменшити фінансове навантаження, мінімізувати ризики збоїв у теплопостачанні та адаптувати проєкт до змін зовнішніх умов.

2. Ідентифікація ризиків у проєктах теплопостачання.

Проєкти модернізації супроводжуються широким спектром ризиків, які доцільно класифікувати за групами.

Технічні ризики пов'язані з невідповідністю нових технологій існуючій інфраструктурі, недостатньою надійністю обладнання або помилками в проєктуванні.

Економічні ризики включають перевищення капітальних витрат, зміну цін на енергоносії, інфляційні процеси та обмеження платоспроможності споживачів.

Регуляторні ризики виникають унаслідок змін тарифної політики, нормативних вимог або умов державної підтримки.

Соціальні ризики пов'язані з несприйняттям проєктів населенням, побоюваннями щодо зростання тарифів або тимчасових незручностей під час реконструкції.

3. Інструменти управління ризиками.

Управління ризиками базується на систематичному процесі, який включає їх ідентифікацію, оцінювання та розробку заходів реагування. Серед ключових інструментів:

- матриці ризиків, що дозволяють ранжувати ризики за ймовірністю та наслідками;
- сценарний і чуттєвий аналіз, які враховують вплив невизначеностей;
- резервування ресурсів і гнучке фінансове планування;
- контракти з розподілом ризиків між учасниками проєкту.

Важливу роль відіграє постійний моніторинг ризиків на всіх стадіях життєвого циклу проєкту.

4. Управління зацікавленими сторонами.

Успішна реалізація проєктів модернізації неможлива без ефективної взаємодії з усіма зацікавленими сторонами: органами влади, операторами теплопостачання, інвесторами, підрядниками та споживачами. Stakeholder management включає:

- ідентифікацію інтересів та очікувань сторін;
- прозору комунікацію щодо цілей і результатів проєкту;
- залучення ключових стейкхолдерів до процесу ухвалення рішень.

Такий підхід зменшує соціальні ризики та підвищує рівень підтримки проєкту.

5. Забезпечення довгострокової стійкості проєктів.

Довгострокова стійкість проєктів модернізації досягається через інтеграцію технічних, економічних і управлінських рішень. Це передбачає:

- орієнтацію на життєвий цикл об'єктів;
- адаптивне управління в умовах змін клімату та ринкових факторів;
- розвиток управлінських компетенцій і цифрових інструментів контролю.

У результаті модернізації систем теплопостачання перетворюється з разового інвестиційного заходу на безперервний процес підвищення ефективності та надійності.

Управління проєктами модернізації та ризиками в системах теплопостачання є ключовим чинником успішного енергетичного переходу. Системне планування, рання ідентифікація ризиків, активне управління зацікавленими сторонами та орієнтація на довгострокову стійкість дозволяють реалізовувати складні проєкти модернізації з мінімальними втратами та максимальним ефектом.

Питання для самоконтролю

1. Які основні економічні чинники визначають доцільність модернізації та реконструкції систем теплопостачання?

2. Як методи оцінки інвестиційної ефективності застосовуються до проєктів у сфері теплопостачання?

3. Яку роль відіграє тарифна політика у стимулюванні енергоефективності та декарбонізації систем теплопостачання?

4. Які організаційні моделі управління є найбільш ефективними для розвитку сучасних систем теплопостачання?

5. Як механізми державної підтримки та міжнародного фінансування впливають на впровадження інноваційних рішень у теплопостачанні?

6. У чому полягають особливості управління ризиками під час реалізації проєктів модернізації систем теплопостачання?

7. Як інтеграція екологічних та соціальних критеріїв впливає на економічну оцінку та ухвалення управлінських рішень у сфері теплопостачання?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.5-39:2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі. – Чинний від 2018-01-07. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 56 с.
2. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. – Чинний від 2022-01-09. – Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2021. – 27 с.
3. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. – Чинний від 2014-01-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. – 149 с.
4. ДСТУ Б А.2.4-28:2008. Мережі теплові (тепломеханічна частина). Робочі креслення. – Чинний від 2010-01-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 13 с.
5. HeatNet NWE. Heerlen transition roadmap: District heating Interreg North-West Europe, 2019 [Electronic resource]. – Electronic text data. – Regime of access: https://www.nweurope.eu/media/10451/heatnetnwe_heerlen-transition-roadmap_district-heating.pdf, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.
6. Dansk Fjernvarme. Climate policy. Dansk Fjernvarme, 6.p. [Electronic resource]. – Electronic text data. – Regime of access: <https://danskfjernvarme.dk/english/english/climate-policy>, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.
7. International Energy Agency. Linking heat and electricity systems [Electronic resource]. – Electronic text data. – Paris : IEA, 2021. – Regime of access: <https://www.iea.org/reports/linking-heat-and-electricity-systems>, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.
8. International Energy Agency. Large-scale heat pumps in district heating systems [Electronic resource]. – Electronic text data. – Paris : IEA Technology Collaboration Programme on District Heating and Cooling, 2019. – 36 p. – Regime of access: https://www.iea-dhc.org/fileadmin/documents/Annex_TS3/IEA_DHC_Annex_TS3_Guidebook_-_final.pdf, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.
9. Swedish Energy Agency. Data centers and district heating: opportunities for excess heat utilization [Electronic resource]. – Electronic text data. – Stockholm : Energimyndigheten, 2020. – 56 p. – Regime of access: <https://www.energimyndigheten.se/en/climate/climate/data-centre-energy-performance-reporting/>, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.

10. Fortum Oyj. Waste heat recovery from data centers for district heating in Finland [Electronic resource]. – Electronic text data. – Espoo : Fortum, 2021. – 44 p. – Regime of access: <https://www.fortum.com/>, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.
11. Lund R. Excess heat from industry and data centers in district heating systems / R. Lund, S.Werner // Applied Energy. – 2018. – Vol. 222. – P. 831–842.
12. Water from abandoned mines as a heat source: practical experiences of open- and closed-loop strategies, United Kingdom [Electronic resource] / D. Banks, A. Athresh, A. Al-Habaibeh, N. Burnside // Sustainable Water Resources Management. – Electronic text data. – 2019. – Vol. 5, № 1. – P. 29–50. – Regime of access: https://link.springer.com/article/10.1007/s40899-017-0094-7?utm_source=chatgpt.com, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.
13. British Geological Survey. Mine water heat: the UK potential [Electronic resource]. – Electronic text data. – Nottingham : BGS, 2020. – 48 p. – Regime of access: <https://www.gov.uk/government/collections/mine-water-heat>, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.
14. Interreg North-West Europe Programme. D2GRIDS: development of low-temperature district heating and cooling grids [Electronic resource]. – Electronic text data. – Brussels : Interreg NWE, 2022. – 60 p. – Regime of access: <https://vb.nweurope.eu/projects/project-search/d2grids-increasing-the-share-of-renewable-energy-by-accelerating-the-roll-out-of-demand-driven-smart-grids-delivering-low-temperature-heating-and-cooling-to-nwe-cities/>, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.
15. Department for Energy Security and Net Zero (UK). Heat networks: market framework and low-carbon transition [Electronic resource]. – Electronic text data. – London : DESNZ, 2021. – 94 p. – Regime of access: <https://www.gov.uk/government/collections/heat-networks>, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.
16. Energy Systems Catapult. District Heat Networks in the UK: barriers & opportunities [Electronic resource]. – Electronic text data. – Birmingham : Energy Systems Catapult, 2020. – Regime of access: <https://es.catapult.org.uk/report/district-heat-networks-in-the-uk-potential-barriers-and-opportunities/>, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.

17. Construction21. D2GRIDS project: discover five pilots implementing 5GDHC heating and cooling [Electronic resource]. – Electronic text data. – Construction21, 2020. – Regime of access: <https://www.construction21.org/articles/h/D2GRIDS-project-discover-five-pilots-implementing-5gdHC-heating-and-cooling.html>, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.
18. European Parliament, Council of the European Union. Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast) [Electronic resource]. – Electronic text data. – Brussels : Official Journal of the European Union, 2024. – 120 p. – Regime of access: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj>, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.
19. European Commission. Renovation Wave for Europe: greening our buildings, creating jobs, improving lives [Electronic resource]. – Electronic text data. – Brussels : European Commission, 2020. – 26 p. – Regime of access: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0662>, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.
20. European Commission. REPowerEU Plan [Electronic resource]. – Electronic text data. – Brussels : European Commission, 2022. – 28 p. – Regime of access: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022DC0230>, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.
21. European Heat Pump Association. Heat pumps and district heating: policy and market outlook [Electronic resource]. – Electronic text data. – Brussels : EHPA, 2021. – 52 p. – Regime of access: <https://www.ehpa.org/market-data/>, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.
22. International Energy Agency. Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector [Electronic resource]. – Electronic text data. – Paris : IEA, 2021. – 224 p. – Regime of access: https://www.oecd.org/en/publications/net-zero-by-2050_c8328405-en.html, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.
23. European Investment Bank. Heating and cooling decarbonisation: financing low-carbon district energy [Electronic resource]. – Electronic text data. – Luxembourg : EIB, 2020. – 64 p. – Regime of access: <https://www.eib.org/en/publications/?sortColumn=startDate&sortDir=desc&pageNumber=0&itemPerPage=10&pageable=true&la=EN&deLa=EN>, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.

24. European Commission. InvestEU Programme: sustainable infrastructure window [Electronic resource]. – Electronic text data. – Brussels : European Commission, 2021. – 38 p. – Regime of access: https://commission.europa.eu/funding%2%80%91tenders/find%2%80%91funding/eu%2%80%91funding%2%80%91programmes/investeu_en, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.
25. World Bank Group. District heating modernization and decarbonization [Electronic resource]. – Electronic text data. – Washington, DC : World Bank, 2019. – 86 p. – Regime of access: <https://openknowledge.worldbank.org/home>, free (application: 30.12.2025). – Header from the screen.
26. Mijwater BV. Minewater project Heerlen: sustainable thermal energy from mine water [Electronic resource]. – Electronic text data. – Heerlen : Mijwater, 2018. – 40 p. – Regime of access: <https://www.renewables-networking.eu/documents/CaseStudy-Heerlen-TheNetherlands.pdf>, free (date of the application date: 30.12.2025). – Header from the screen.
27. European Court of Auditors. Energy efficiency in buildings: greater focus on cost-effectiveness needed [Electronic resource]. – Electronic text data. – Luxembourg : ECA, 2020. – 66 p. – Regime of access: https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR20_11/SR_Energy_efficiency_in_buildings_EN.pdf, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.
28. 4th generation district heating (4GDH): integrating smart thermal grids into future energy systems [Electronic resource] / H. Lund, P. A. Østergaard, D. Connolly et al. // Energy. – Electronic text data. – 2014. – Vol. 68. – P. 1–11. – Regime of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544214002369>, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.
29. 5th generation district heating and cooling systems: a review of existing cases [Electronic resource] / S. Buffa, M. Cozzini, M. D’Antoni et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – Electronic text data. – 2019. – Vol. 104. – P. 504–522. – Regime of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118308608>, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.
30. International Energy Agency. Digital demand-driven electricity networks [Electronic resource]. – Electronic text data. – Paris : IEA, 2020. – 180 p. – Regime of access: <https://www.iea.org/programmes/digital-demand-driven-electricity-networks-initiative>, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.

31. CEN-CENELEC-ETSI. Smart grid coordination group: smart grid reference architecture [Electronic resource]. – Electronic text data. – Brussels : CEN-CENELEC-ETSI, 2012. – 231 p. – Regime of access: https://www.cencenelec.eu/media/CEN-CENELEC/AreasOfWork/CEN-CENELEC_Topics/Smart%20Grids%20and%20Meters/Smart%20Grids/reference_architecture_smartgrids.pdf, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.

32. Werner S. International review of district heating and cooling [Electronic resource] / S. Werner // Energy. – Electronic text data. – 2017. – Vol. 137. – P. 617–631. – Regime of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421730614X>, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.

33. Міністерство розвитку громад та територій України. Реформа системи централізованого теплопостачання в Україні: міжнародний досвід та національні пріоритети : аналіт. звіт [Електрон. ресурс]. – Електрон. текст. дані. – Київ : Мінрегіон України, 2021. – 52 с. – Режим доступу: <https://mtu.gov.ua/news/36600.html>, вільний (дата звернення: 30.12.2025). – Назва з екрана.

34. Енергоресурс інвест. Вироби для теплопостачання та гарячого водопостачання [Електрон. ресурс] : сайт. – Електрон. текст. дані. – Оновлюється постійно. – Режим доступу: <https://energoresurs.com>, вільний (дата звернення: 30.12.2025). – Назва з екрана.

35. Алексахін О.О. Розрахунок теплових втрат подавальними трубопроводами розгалужених теплових мереж [Електрон. ресурс] / О. О. Алексахін, С. В. Єна, О. П. Гордиєнко // Інтегровані технології та енергозбереження. – Електрон. текст. дані. – 2017. – № 3. – С. 51–56. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/86de994b-f4eb-4c45-b44f-1e16aced1f0d/content>, вільний (дата звернення: 30.12.2025). – Назва з екрана.

36. Алексахін О. О. Обчислення втрат теплоти у мікрорайонних теплових мережах // Комунальне господарство міст : зб. наук. праць / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. – Вип. 114. – С. 82–84.

37. Порівняння варіантів виконання розподільної теплової мережі мікрорайону [Електрон. ресурс] / О. О. Алексахін, С. В. Єна, О. П. Гордієнко, В. Новіков, Д. Цемох // Інтегровані технології та енергозбереження. – Електрон. текст. дані. – 2021. – № 3. – С. 51–56. – Режим доступу: <http://ite.khpi.edu.ua/article/view/243852>, вільний (дата звернення: 30.12.2025). – Назва з екрана.

38. Ганжа А. М. Обґрунтування варіантів реконструкції системи теплопостачання житлового масиву з використанням математичного моделювання теплових втрат при транспортуванні теплоносія / А. М. Ганжа, Н. А. Марченко, В. М. Підкопай // Вісник НТУ «ХПІ». Серія : Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – № 13 (987). – С. 51–56. – Існує електрон. версія. (Режим доступу: https://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова_періодика/vestnik/Енергетичні%20та%20теплотехнічні%20процеси%20й%20устаткування/2013/13/13_13_14.pdf, вільний).

39. Алексахін О. О. Теплові і гідравлічні режими мікрорайонних в умовах реформування централізованого теплопостачання : монографія / О. О. Алексахін, О. В. Бобловський ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 180 с.

40. Operation of heat networks under conditions of «reduced» heating temperature schedule [Електрон. ресурс] / О. Gvozdeckiy, О. Milanko, R. Tkachenko, A. Yuzbashyan, S. Romanenko // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Електрон. текст. дані. – Харків : УкрДУЗТ, 2025. – № 211. – С. 60–74. – Режим доступу: DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327173>, вільний (дата звернення: 30.12.2025). – Назва з екрана.

41. The possibility of combined regulation of heat supply systems as the basis of energy efficiency [Electronic resource] / O. Taradai, V. Bugai, O. Gvozdetskyi, S. Diachenko // Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering. – Electronic text data. – 2022. – Vol. 1(58). – С. 74–81. – Regime of access: <https://tgv.kname.edu.ua/images/files/GVST3.pdf>, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.

42. Economic dependence of the consumer on the feasibility to regulate the heat supply system [Electronic resource] / O. Taradai, V. Bugai, O. Gvozdetskyi, S. Diachenko // Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering. – Electronic text data. – 2022. – Vol. 2(59). – С. 52–57. – Regime of access: <https://tgv.kname.edu.ua/images/files/GVST2.pdf>, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.

43. Про теплопостачання : Закон України від 2 червня 2005 р. // Відомості Верховної Ради. – 2005, № 28, ст. 373.
44. Про комерційний облік теплової енергії та водопостачання : Закон України від 22 червня 2017 р. // Відомості Верховної Ради. – 2017, № 34, ст. 370.
45. Правила технічної експлуатації теплових установок і мереж: затв. М-вом палива та енергетики України від 14.02.2007 наказ № 71. Зареєстровано у Міністерстві юстиції України 5.03.2007 за № 197/13464. – Чинний з 2007–03–05. – Харків : Форт, 2007 – 176 с.
46. Низькопотенційна енергетика : навч. посіб. / [А. О. Редько, М. К. Безродний, М. В. Загорученко, Г. С. Ратушняк, О. Ф. Редько, М. Г. Хмельнюк] ; за заг. ред. А. А. Долинського. – Харків : ТОВ «Друкарня Мадрид», 2016. – 412 с.
47. Арсеньєв В. М., Шарапов С. О. Методи термодинамічного аналізу термомеханічних систем: основи теорії, приклади та завдання : навч. посіб. / В. М. Арсеньєв, С. О. Шарапов. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 322 с.
48. Співак О. Ю. Тепломасообмін. Методи інтенсифікації : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електрон. ресурс] / О. Ю. Співак, Н. В. Резидент. – Електрон. текст. дані. – Вінниця : Вінницький національний технічний університет, 2023. – 112 с. – Режим доступу: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2023/Spivak_2023_112.pdf, вільний (дата звернення: 30.12.2025). – Назва з екрана.
49. Чейлитко А. О. Проектування та оптимізація систем теплопостачання : навч.-метод. посіб. для студентів ЗДІА напряму 144 «Теплоенергетика» денної і заочної форми навчання / А. О. Чейлитко. – Запоріжжя : ЗДІА, 2016. – 200 с.

Електронне навчальне видання

ГВОЗДЕЦЬКИЙ Олександр Вадимович,
РЕДЬКО Ігор Олександрович

**СПЕЦІАЛЬНІ НАУКОВІ ПИТАННЯ
ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

(для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності G19 – Будівництво та цивільна інженерія галузі знань G – Інженерія, виробництво та будівництво, освітня програма «Будівництво та цивільна інженерія»)

Відповідальний за випуск *О. В. Гвоздецький*

Редактор *О. В. Михаленко*

Комп'ютерне верстання *О. В. Гвоздецький, І. В. Волосожарова*

План 2026, поз. 23Л

Підп. до друку 24.03.2026. Формат 60 × 84/16.
Ум. друк. арк. 8,7.

Видавець і виготовлювач:

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

Електронна адреса: office@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 8386 від 14.07.2025.