

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до проведення практичних занять та організації самостійної роботи
з навчальної дисципліни

«СПЕЦІАЛЬНІ НАУКОВІ ПИТАННЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ»

*(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

Методичні рекомендації до проведення практичних занять та організації самостійної роботи з навчальної дисципліни «Спеціальні наукові питання теплопостачання» (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. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. О. В. Гвоздецький. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. – 98 с.

Укладач канд. техн. наук, доц. О. В. Гвоздецький

Рецензент

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

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

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ ТА ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЕЛЕМЕНТІВ І СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ	6
1.1 Термодинамічний аналіз елементів систем теплопостачання.....	6
1.2 Ексергетичний аналіз систем теплопостачання.....	9
1.3 Порівняльний аналіз схем теплопостачання (термодинамічні та ексергетичні критерії)	13
Завдання до практичного заняття 1	15
2 МЕТОДИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ	17
2.1 Математичне моделювання систем теплопостачання.....	17
2.2 Ідентифікація параметрів та верифікація моделей.....	20
2.3 Оптимізація систем теплопостачання	22
Завдання до практичного заняття 2	24
3 СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ЧЕТВЕРТОГО ТА П'ЯТОГО ПОКОЛІНЬ (4GDH, 5GDH)	26
3.1 Аналіз температурних режимів 3GDH, 4GDH, 5GDH	26
3.2 Розрахунок теплового навантаження кварталу / мікрорайону для 4GDH ...	32
3.3 Узгодження параметрів мережі з характеристиками будівель	35
Завдання до практичного заняття 3	37
4 ІНТЕГРАЦІЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ	40
4.1 Моделювання інтеграції сонячних теплових колекторів, біомаси, геотермальної енергії	41
4.2 Аналіз частки ВДЕ в тепловому балансі.....	45
4.3 Оцінка впливу на викиди CO ₂	47
Завдання до практичного заняття 4.....	48
5 СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ	50
5.1 Розрахунок коротко- та довгострокових акумуляторів (TES, PTES, BTES)	51
5.2 Вибір оптимальних об'ємів і температур акумуляторів	54
5.3 Аналіз економічної доцільності.....	56

Завдання до практичного заняття 5	57
6 ЗНИЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ВТРАТ У СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ .	58
6.1 Аналіз і розрахунок теплових втрат у теплових мережах.....	59
6.2 Сучасні технології та матеріали для зменшення теплових втрат	62
6.3 Оцінка енергоефективності та економічної доцільності заходів зі зниження теплових втрат	67
Завдання до практичного заняття 6	69
7 ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ	70
7.1 Оцінювання екологічних показників систем теплопостачання	71
7.2 Енергоефективні та низьковуглецеві технології в теплопостачанні.....	74
7.3 Комплексний аналіз заходів з підвищення екологічної безпеки та енергоефективності	76
Завдання до практичного заняття 7	78
8 АДАПТАЦІЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ДО ЗМІН КЛІМАТУ ТА КОЛИВАНЬ ПОПИТУ	79
8.1 Вплив змін клімату на теплові навантаження та режими роботи систем теплопостачання.....	80
8.2 Моделювання та прогнозування коливань теплового попиту	81
8.3 Гнучкі та адаптивні технічні рішення в системах теплопостачання.....	84
Завдання до практичного заняття 8	85
ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ	87
Теми рефератів до ЗМ 1: МЕТОДИ АНАЛІЗУ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА ЇХНІХ КОМПОНЕНТІВ.....	87
Теми рефератів до ЗМ 2: НОВІТНІ РІШЕННЯ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ.....	87
Теми рефератів до ЗМ 3: НАПРЯМКИ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ.....	88
ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ РЕФЕРАТІВ	89
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ	90
ДОДАТОК А.....	97

ВСТУП

Дисципліна «Спеціальні наукові питання з теплопостачання» належить до циклу професійної підготовки здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти та спрямована на формування практичних навичок і системного наукового підходу до вирішення сучасних і перспективних проблем теплопостачання. У межах практичних занять особлива увага приділяється закріпленню теоретичних знань через їх застосування, розвитку аналітичних і дослідницьких компетентностей, а також підготовці здобувачів до самостійної наукової та інженерної діяльності.

Практичні заняття зорієнтовані на аналіз реальних умов функціонування сучасних систем теплопостачання, які розвиваються в контексті енергетичного переходу, декарбонізації, цифровізації та підвищених вимог до енергоефективності й екологічної безпеки. У процесі виконання практичних завдань здобувачі застосовують міждисциплінарні методи аналізу, працюють із інноваційними технологіями, досліджують можливості інтеграції відновлюваних і вторинних джерел енергії, а також виконують оптимізацію режимів роботи систем із використанням сучасних інформаційних і математичних інструментів.

У межах практичних занять передбачено:

- застосування фундаментальних методів аналізу систем теплопостачання як складних ієрархічних технічних систем;
- розрахунок і оцінювання ефективності новітніх технологічних рішень (4GDH, 5GDH, теплові насоси, системи акумулювання тепла, цифрові мережі);
- розроблення та обґрунтування практичних заходів з удосконалення існуючих систем з урахуванням технічних, екологічних та економічних чинників.

Особлива увага на практичних заняттях приділяється термодинамічному, ексергетичному, гідравлічному й оптимізаційному підходам та багатокритеріальному аналізу ефективності систем. Практична частина формує методологічні навички у сфері теплопостачання, енергосистем і енергоефективних технологій.

Практичні заняття забезпечують формування у здобувачів цілісного прикладного бачення сучасних систем теплопостачання як складних техніко-економічних та екологічних об'єктів. Набуті вміння та компетентності є основою для виконання дисертаційних досліджень, розроблення інноваційних рішень і подальшої професійної діяльності у сфері сталого розвитку теплопостачання.

1 ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ ТА ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЕЛЕМЕНТІВ І СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Мета заняття: формування у студентів знань і навичок щодо оцінки ефективності роботи систем теплопостачання на основі законів термодинаміки та ексергетики, а також уміння порівнювати різні схеми теплопостачання за енергетичними та ексергетичними критеріями.

Теоретичні положення. У межах термодинамічного аналізу розглядається застосування першого закону термодинаміки для складання енергетичних балансів, визначення теплових потоків, ентальпії та внутрішньої енергії, а також розрахунок коефіцієнтів корисної дії котлів, теплообмінників, насосів та інших елементів системи. Особлива увага приділяється втратам енергії у вигляді теплових втрат, механічних та гідравлічних опорів. Ексергетичний аналіз базується на другому законі термодинаміки та дозволяє оцінити якість енергії, тобто її здатність виконувати корисну роботу. Вводиться поняття ексергії як міри корисності енергії відносно навколишнього середовища, розглядаються ексергетичні втрати у процесах теплопередачі, згоряння та транспортування теплоносія, а також визначається ексергетичний коефіцієнт корисної дії системи. Це дає змогу виявити ділянки найбільшої деградації енергії та визначити шляхи підвищення ефективності. Порівняльний аналіз схем теплопостачання здійснюється за термодинамічними критеріями (енергетичний баланс, ККД, питомі витрати палива) та ексергетичними критеріями (ексергетичний ККД, рівень втрат корисної енергії, ступінь необоротності процесів). Розглядаються централізовані та децентралізовані системи теплопостачання, а також комбіновані схеми з використанням когенерації та відновлюваних джерел енергії. Комплексне застосування термодинамічного та ексергетичного аналізу дозволяє обґрунтовано вибирати оптимальні схеми теплопостачання, забезпечувати раціональне використання енергоресурсів та відповідність сучасним вимогам енергозбереження й екологічної безпеки.

1.1 Термодинамічний аналіз елементів систем теплопостачання

Мета: закріпити навички складання енергетичних балансів, визначення ККД та аналізу впливу температурних режимів на ефективність роботи елементів систем теплопостачання з урахуванням першого і другого законів термодинаміки.

Загальне рівняння енергетичного балансу (стаціонарний режим):

$$\Sigma \dot{Q}_{\text{вх}} + \Sigma \dot{W}_{\text{вх}} = \Sigma \dot{Q}_{\text{вих}} + \Sigma \dot{W}_{\text{вих}} + \dot{Q}_{\text{втр}} , \quad (1.1)$$

де $\Sigma \dot{Q}_{\text{вх}}$ – сумарна теплова потужність (тепловий потік) на вході, теплота яка надходить у систему;

$\Sigma \dot{W}_{\text{вх}}$ – робота, що підводиться до системи, зовнішня енергія, яка необхідна для роботи системи;

$\Sigma \dot{Q}_{\text{вих}}$ – сумарна теплова потужність (тепловий потік) на виході, корисна теплота, що передається споживачу або наступному елементу системи;

$\Sigma \dot{W}_{\text{вих}}$ – робота, що відводиться від системи, корисна механічна або електрична робота, яку система виконує назовні;

$\dot{Q}_{\text{втр}}$ – теплові втрати, теплота, що втрачається в навколишнє середовище.

Для більшості теплотехнічних елементів ключову роль відіграють теплові потоки та втрати (механічна робота відсутня, накопичення енергії ≈ 0).

Енергетичний баланс котла:

$$\dot{Q}_B = \dot{Q}_k + \dot{Q}_{\text{втр}} , \quad (1.2)$$

де $\dot{Q}_B$ – теплота згоряння палива;

$\dot{Q}_k$ – теплота, яка передана теплоносію;

$\dot{Q}_{\text{втр}}$ – втрати з димовими газами, в навколишнє середовище, хімічні та механічні недопали.

Теплота згоряння палива знаходиться за формулою:

$$\dot{Q}_B = B \cdot Q_{\text{нр}} , \quad (1.3)$$

де B – витрата палива;

$Q_{\text{нр}}$ – нижча теплота згоряння палива.

Приклад: Визначити втрати на котлі та ККД котла, якщо нижча теплота згоряння палива становить 34 МДж/м³, витрата палива 10 м³/год, теплота, яка передана теплоносію 290 МДж.

Рішення:

Визначаємо за формулою 1.3 теплоту згоряння палива:

$$\dot{Q}_B = 10 \times 34 = 340 \text{ МДж.}$$

Визначаємо втрати на котлі:

$$\dot{Q}_{\text{втр}} = 340 - 290 = 50 \text{ МДж.}$$

Визначаємо ККД котла:

$$\eta = \frac{290}{340} \cdot 100 = 85 \text{ \%}.$$

Рівняння теплового балансу пластинчастого або кожухотрубного теплообмінного апарату:

$$G_1 \cdot c_1 \cdot (T_1 - T_2) = G_2 \cdot c_2 \cdot (\tau_1 - \tau_2) + \dot{Q}_{\text{втр}}, \quad (1.4)$$

де G_1 – масова витрата теплоносія у первинному контурі (середовище яке гріє);

c_1 – питома теплоємність теплоносія у первинному контурі;

T_1 – температура теплоносія у первинному контурі на вході у теплообмінник;

T_2 – температура теплоносія у первинному контурі на виході з теплообмінника;

G_2 – масова витрата теплоносія у вторинному контурі (середовище, що нагрівається);

c_2 – питома теплоємність теплоносія у вторинному контурі;

τ_1 – температура води (теплоносія) у вторинному контурі на виході з теплообмінника;

τ_2 – температура теплоносія у вторинному контурі на вході у теплообмінник;

$\dot{Q}_{\text{втр}}$ – теплові втрати теплообмінника (кількість теплоти, яка втрачається в навколишнє середовище через теплову ізоляцію, корпус теплообмінника, фланцеві з'єднання. У добре ізольованих теплообмінниках: $\dot{Q}_{\text{втр}} \approx 0$).

Ефективність теплообмінника визначається за формулою:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{\phi}}{\dot{Q}_{\text{max}}}, \quad (1.5)$$

де ε – термічна ефективність теплообмінника;

$\dot{Q}_{\phi}$ – реальна кількість теплоти, що передається від гарячого до холодного теплоносія за одиницю часу;

$\dot{Q}_{\text{max}}$ – максимально можливий тепловий потік (теоретична межа теплопередачі за ідеальних умов).

$$\dot{Q}_{max} = c_{min} \cdot (T_1 - \tau_2) . \quad (1.6)$$

$$c_{min} = \min(G_1 \cdot c_1; G_2 \cdot c_2) . \quad (1.7)$$

ε показує, наскільки реально використовується температурний потенціал між потоками.

Значення:

- $\varepsilon \approx 0,3-0,5$ – низька ефективність;
- $\varepsilon \approx 0,6-0,8$ – типові інженерні значення;
- $\varepsilon \rightarrow 1$ – теоретична межа.

На практиці: забруднення поверхонь $\rightarrow$ зменшення коефіцієнта теплопередачі $\rightarrow$ зниження ε .

Енергетична ефективність теплового пункту оцінюється комплексно, як: теплові втрати; електроспоживання насосів; точність підтримання температурних режимів:

$$\eta_{\text{тп}} = \frac{\dot{Q}_k}{\dot{Q}_{\text{вх}} + \dot{W}_e} , \quad (1.8)$$

де $\eta_{\text{тп}}$ – енергетична ефективність теплового пункту;

$\dot{Q}_k$ – корисна теплова потужність, яка передана споживачам (системи опалення, вентиляції, гарячого водопостачання, технологічні апарати);

$\dot{Q}_{\text{вх}}$ – теплова енергія, що надходить із зовнішньої теплової мережі (первинного контуру);

$\dot{W}_e$ – електрична потужність, яка споживається обладнанням теплового пункту (насоси, регулюючі клапани тощо).

1.2 Ексергетичний аналіз систем тепlopостачання

Мета: формування практичних навичок визначення ексергетичних втрат (руйнування ексергії), складання ексергетичних балансів та оцінювання ексергетичної ефективності (ексергетичного ККД) елементів і систем тепlopостачання.

Ексергія — це максимально можлива корисна робота, яку можна отримати з енергетичного потоку при його переході в стан термодинамічної рівноваги з навколишнім середовищем.

Згідно з другим законом:

- тепло самочинно передається лише від вищої температури до нижчої;

- чим більший перепад температур – тим більші ексергетичні втрати.

Для теплового потоку:

$$\dot{E}_x = \dot{Q} \cdot \left(1 - \frac{T_o}{T}\right), \quad (1.9)$$

де $\dot{E}_x$ – ексергія теплового потоку (максимально корисна робота, яку теоретично можна отримати з цієї кількості теплоти при взаємодії з навколишнім середовищем);

$\dot{Q}$ – теплова енергія, що передається або підводиться при температурі T ;

T – абсолютна температура джерела теплоти (температура, при якій відбувається передача теплоти);

T_o – температура навколишнього середовища (характеризує стан термодинамічної рівноваги, відносно якого визначається ексергія).

Анергія – це частина енергії, яка не може бути перетворена на корисну роботу за даних умов середовища. Анергія повністю пов'язана з ентропією, вона неминуче зростає в реальних процесах. У теплопостачанні анергія домінує при низьких температурах.

Ілюстративний приклад порівняння 1 МДж теплової енергії при різних температурах наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння 1 МДж теплової енергії при різних температурах

Температура	Ексергія	Частка ексергії
600 К (327 °С)	$(1 \cdot (1 - 293/600) = 0,51)$ МДж	51 %
350 К (77 °С)	$(1 \cdot (1 - 293/350) = 0,16)$ МДж	16 %

Теплота низької температури має низьку ексергетичну цінність, що критично важливо для систем теплопостачання.

Загальний ексергетичний баланс для стаціонарного режиму:

$$\Sigma E_{x(\text{вх})} = \Sigma E_{x(\text{вих})} + E_{x(\text{втр})}, \quad (1.10)$$

де $\Sigma E_{x(\text{вх})}$ – сумарна ексергія на вході в систему (елемент);

$\Sigma E_{x(\text{вих})}$ – сумарна ексергія на виході з системи (елемента);

$E_{x(\text{втр})}$ – ексергетичні втрати (руйнування ексергії). Кількість ексергії, що безповоротно знищується внаслідок необоротностей процесу.

$$E_{x(\text{втр})} = T_o \cdot \Delta S_{\text{ген}}, \quad (1.11)$$

де $\Delta S_{\text{ген}}$ – генерація ентропії.

Ексергетичний баланс котла:

$$E_{x(B)} = E_{x(T)} + E_{x(втр)}, \quad (1.12)$$

де $E_{x(B)}$ – ексергія палива (вхідна ексергія котла);

$E_{x(T)}$ – ексергія теплоносія.

Газ має ексергію $\approx 100 \%$, а теплота води при 80°C – лише $\approx 15\text{--}20 \%$.

Основна частина ексергії руйнується в котлі.

Ексергетичний баланс теплообмінного апарату:

$$E_{x(h)} = E_{x(c)} + E_{x(втр)}, \quad (1.13)$$

де $E_{x(h)}$ – ексергія середовища, яке гріє;

$E_{x(c)}$ – частина ексергії, яка передана середовищу, що нагрівається в процесі теплообміну.

Основні джерела ексергетичних втрат:

- теплообмін при кінцевій різниці температур;
- теплові втрати через стінки теплообмінника;
- гідравлічні втрати.

Ексергетичний баланс теплових мереж:

$$E_{x(вх)} = E_{x(вих)} + E_{x(тв)} + E_{x(гідр)}, \quad (1.14)$$

де $E_{x(вх)}$ – ексергія теплоносія на вході в систему (мережу);

$E_{x(вих)}$ – ексергія теплоносія на виході з мережі;

$E_{x(тв)}$ – ексергетичні втрати через теплову ізоляцію;

$E_{x(гідр)}$ – ексергетичні втрати на подолання гідравлічного опору.

Ексергетичний ККД визначається за формулою:

$$\eta_{ex} = \frac{E_{x(k)}}{E_{x(вх)}}, \quad (1.15)$$

де η_{ex} – ексергетичний ККД;

$E_{x(вх)}$ – вхідна ексергія. Максимально можлива корисна робота, що надходить у систему або елемент (котел, теплообмінник, ТП, мережу);

$E_{x(k)}$ – корисна ексергія. Частина ексергії, яка реально використовується для виконання роботи або нагріву.

Приклад ексергетичного розрахунку котла и теплообмінного апарату в системі тепlopостачання.

Вихідні дані:

- теплота згоряння газу $Q_B = 300$ кВт;
 - температура продуктів згоряння $T_r = 573$ К;
 - температура теплоносія на вході в котел $T_2 = 293$ К;
 - температура теплоносія на виході з котла $T_1 = 353$ К;
 - температура навколишнього середовища $T_o = 293$ К;
 - масова витрата теплоносія $G = 1$ кг/с;
- Питома теплоємність $c = 4,18$ кДж/(кг · К).

Рішення.

Для спрощення вважаємо, що ексергія палива близька до його теплоти згоряння:

$$E_{x(B)} = Q_B = 300 \text{ кВт.}$$

Визначаємо корисну теплову потужність, яка передана теплоносію:

$$Q_k = G \cdot c \cdot (T_1 - T_2) = 1 \times 4,18 \times (353 - 293) = 250,8 \text{ кВт.}$$

Знаходимо середню температуру теплоносія:

$$T_{\text{сер}} = \frac{T_1 + T_2}{2} = 323 \text{ К.}$$

Визначаємо за формулою 1.9 ексергію теплоносія:

$$E_{x(\text{вих})} = Q_k \cdot \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) = 250,8 \times \left(1 - \frac{293}{323}\right) = 23,3 \text{ кВт.}$$

Знаходимо ексергетичні втрати:

$$E_{x(\text{втр})} = E_{x(B)} - E_{x(\text{вих})} = 300 - 23,3 = 276,7 \text{ кВт.}$$

Визначаємо ексергетичний ККД котла:

$$\eta_{ex} = \frac{E_{x(\text{вих})}}{E_{x(B)}} \cdot 100 = \frac{23,3}{300} \cdot 100 = 7,8 \text{ \%}.$$

Висновок:

1. Ексергетичний ККД котла дуже низький (≈ 8 %) через великий температурний перепад між паливом і низькотемпературним теплоносієм.
2. Основна частина ексергії (≈ 92 %) руйнується через необоротні процеси: горіння, теплообмін, втрати димових газів.

3. Навіть при високому тепловому ККД котла, якість енергії (ексергія) використовується мало.

1.3 Порівняльний аналіз схем теплопостачання (термодинамічні та ексергетичні критерії)

Мета: формування у здобувачів умінь здійснювати обґрунтований вибір технічних рішень на основі термодинамічних та ексергетичних критеріїв, що включає оцінювання кількісної ефективності використання енергії відповідно до першого закону термодинаміки, аналіз якості енергії та необоротних втрат згідно з другим законом термодинаміки, а також перевірку відповідності температурних рівнів джерел тепла та споживачів.

Критерії оцінювання схем теплопостачання.

1. Термодинамічні критерії.

Базуються на енергетичному балансі:

- теплове навантаження Q , кВт;
- тепловий ККД;
- питомі втрати тепла в мережах, % або кВт/м;
- паливні витрати.

2. Ексергетичні критерії.

Базуються на ексергетичному балансі:

- ексергетичні втрати $E_{x(втр)}$;
- ексергетичний ККД η_{ex} ;
- відповідність температурного рівня джерела тепла температурі споживача.

3. Термодинамічні та ексергетичні особливості централізованих систем теплопостачання.

Термодинамічні особливості:

- високий сумарний тепловий ККД джерела;
- значні втрати тепла при транспортуванні.

Ексергетичні особливості:

- великі ексергетичні втрати в мережах;
- невідповідність між високою температурою теплоносія та низькотемпературним попитом будівель.

Централізовані системи ефективні при великій щільності теплового навантаження та використанні когенерації.

4. Термодинамічні та ексергетичні особливості децентралізованих систем теплопостачання.

Термодинамічні особливості:

- нижчий тепловий ККД окремого джерела;
- практично відсутні мережеві втрати.

Ексергетичні особливості:

- менші втрати ексергії при транспортуванні;
- краща відповідність джерела тепла потребам споживача.

Децентралізовані системи доцільні для малоповерхової та розосередженої забудови.

5. Високотемпературні та низькотемпературні системи.

5.1. Високотемпературні системи (90–130 °C).

Переваги:

- менші витрати теплоносія;
- компактні теплообмінні поверхні.

Недоліки (з ексергетичної точки зору):

- значне руйнування ексергії;
- нераціональне використання високоякісної енергії для низькотемпературного опалення.

5.2. Низькотемпературні системи (30–60 °C).

Переваги:

- високий ексергетичний ККД;
- можливість інтеграції теплових насосів, ВДЕ;
- зменшення необоротних втрат.

Недоліки:

- більші теплообмінні поверхні;
- вимоги до сучасних систем опалення (теплі підлоги, фанкойли).

6. Термодинамічне та ексергетичне порівняння централізованої та децентралізованої системи теплопостачання з температурними графіками систем опалення 95/70 °C та 45/35 °C.

Порівняння наведені у таблицях 1.2 та 1.3.

Таблиця 1.2 – Термодинамічне порівняння схем теплопостачання

Параметр	Централізована система теплопостачання з температурним графіком 95/70 °C	Децентралізована система теплопостачання з температурним графіком 45/35 °C
Тепловий ККД	Високий	Нижчі
Мережеві втрати	Значні	Відсутні
Паливні витрати	Вищі	Нижчі

Таблиця 1.3 – Ексергетичне порівняння схем теплопостачання

Параметр	Централізована система теплопостачання з температурним графіком 95/70 °C	Децентралізована система теплопостачання з температурним графіком 45/35 °C
Температурна відповідність	Низька	Висока
Ексергетичні втрати	Значні	Мінімальні
Ексергетичний ККД	5–10 %	25–40 %

Порівняльний аналіз показав, що за однакового теплового навантаження низькотемпературна децентралізована схема має суттєво вищу ексергетичну ефективність завдяки кращій відповідності температурного рівня джерела тепла потребам споживача. Незважаючи на нижчий тепловий ККД окремого обладнання, сумарні ексергетичні втрати системи є меншими, що робить схему перспективною з погляду сталого розвитку та декарбонізації.

Термодинамічний аналіз відповідає на питання «скільки енергії?». Ексергетичний аналіз відповідає на питання «наскільки раціонально використана енергія?». Оптимальна схема теплопостачання повинна мінімізувати руйнування ексергії, а не лише теплові втрати.

Завдання до практичного заняття 1

Варіант 1.

Виконати термодинамічний аналіз водогрійної котельні.

Вихідні дані:

- тип котла: водогрійний, газовий;
- номінальна теплова потужність: 10 МВт;
- температурний графік: 95/70 °C;
- витрата природного газу: 1 150 м³/год;
- нижча теплота згоряння газу: 34 МДж/м³;
- температура димових газів: 160 °C;
- температура навколишнього середовища: 10 °C.

Варіант 2.

Виконати ексергетичний аналіз котла.

Вихідні дані:

- теплова потужність котла: 5 МВт;
- температура теплоносія на вході / виході: 60/90 °C;

- температура спалювання (умовна): 1 200 К;
- температура навколишнього середовища: 293 К;
- ККД котла (енергетичний): 0,92.

Варіант 3.

Виконати термодинамічний аналіз теплообмінника ЦТП.

Вихідні дані:

- теплове навантаження: 2,5 МВт;
- температурний графік первинного контуру: 130/70 °С;
- температурний графік вторинного контуру: 70/50 °С;
- витрата теплоносія у первинному контурі: 20 кг/с;
- втрати тиску: 30 кПа;
- температура навколишнього середовища: 293 К.

Варіант 4.

Виконати ексергетичний аналіз теплової мережі.

Вихідні дані:

- довжина теплової мережі: 4 км;
- температурний графік: 120/70 °С;
- витрата теплоносія: 150 т/год;
- питомі теплові втрати: 120 Вт/м;
- температура ґрунту: 8 °С;
- температура навколишнього середовища (для ексергії): 283 К.

Варіант 5.

Виконати порівняння централізованої та децентралізованої системи тепlopостачання (термодинамічні та ексергетичні критерії).

Вихідні дані:

Централізована система:

- котельня: 15 МВт, ККД 90 %;
- температурний графік: 140/70 °С;
- тепла мережа: 6 км, втрати – 12 %.

Децентралізована система:

- індивідуальні котли: 24 × 0,6 МВт;
- ККД котлів: 94 %;
- температурний графік: 80/60 °С.

2 МЕТОДИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Мета заняття: закріплення навичок застосування методів математичного моделювання та оптимізації для аналізу і вдосконалення систем теплопостачання, що дозволяє оцінювати їх ефективність, визначати оптимальні режими роботи та забезпечувати раціональне використання енергоресурсів.

Теоретичні положення. У рамках теми розглядається математичне моделювання систем теплопостачання, яке передбачає побудову адекватних моделей елементів та процесів на основі рівнянь теплового балансу, гідравліки та термодинаміки, що дає змогу досліджувати поведінку системи в різних експлуатаційних умовах. Важливим етапом є ідентифікація параметрів та верифікація моделей, що включає визначення реальних характеристик обладнання, коригування моделі відповідно до експериментальних даних та перевірку її адекватності шляхом порівняння результатів моделювання з фактичними показниками роботи системи. Завершальним аспектом є оптимізація систем теплопостачання, яка здійснюється на основі критеріїв мінімізації витрат палива та енергії, зниження ексергетичних втрат, забезпечення стабільності температурних режимів та екологічної безпеки. Комплексне використання методів моделювання, ідентифікації та оптимізації дозволяє обґрунтовано приймати техніко-економічні рішення, підвищувати ефективність роботи систем теплопостачання та забезпечувати їх відповідність сучасним вимогам енергозбереження й сталого розвитку.

2.1 Математичне моделювання систем теплопостачання

Мета: набути навичок формалізації фізичних процесів у системах теплопостачання; побудови математичних моделей різного рівня складності; чисельної реалізації моделей у програмних середовищах; інтерпретації результатів моделювання для інженерних і наукових висновків.

1. Типи математичних моделей систем теплопостачання.

1.1 За фізичною суттю.

Теплові моделі.

Описують:

- теплообмін у джерелах тепла;
- втрати тепла в мережах;

- тепловий стан будівель.

Базові рівняння:

- закон збереження енергії;
- рівняння теплопровідності;
- рівняння конвективного теплообміну.

Гідравлічні моделі.

Описують:

- розподіл витрат теплоносія;
- втрати тиску;
- роботу насосів.

Базові рівняння:

- рівняння нерозривності;
- рівняння Бернуллі;
- емпіричні формули гідравлічного опору.

1.2 За рівнем деталізації.

Математичні моделі за рівнем деталізації наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Типи математичних моделей за рівнем деталізації

Тип моделі	Характеристика	Приклад
Аналітичні	Прості, з явними формулами	Розрахунок тепловтрат трубопроводами
Чисельні	Розв'язання систем рівнянь	Мережеві моделі
Імітаційні	Врахування динаміки	Річне моделювання теплових навантажень

1.3 За часовою залежністю.

- стаціонарні – режим незмінний у часі;
- нестаціонарні – враховують акумулювання тепла та зміну навантаження.

навантаження.

2. Структура рівнянь теплових процесів.

2.1. Енергетичний баланс елемента системи:

$$\dot{G} \cdot c \cdot (T_1 - T_2) = Q_{\text{вх}} - Q_{\text{втр}} , \quad (2.1)$$

де $\dot{G}$ – масова витрата теплоносія;

c – питома теплоємність теплоносія;

T_1 – температура теплоносія на вході в елемент системи;

T_2 – температура теплоносія на виході з елемента системи;

$Q_{\text{вх}}$ – підведена теплова потужність;

$Q_{\text{втр}}$ – втрати теплової потужності.

2.2. Теплові втрати трубопроводу:

$$Q_{\text{втр(т)}} = k \cdot L \cdot (T_{\text{сер}} - T_o), \quad (2.2)$$

де k – лінійний коефіцієнт теплових втрат трубопроводу;

L – довжина трубопроводу;

$T_{\text{сер}}$ – середня температура теплоносія;

T_o – температура навколишнього середовища (повітря або ґрунту).

2.3. Нестационарна теплова модель:

$$C \frac{dT}{dt} = Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вих}}, \quad (2.3)$$

де C – теплова ємність системи;

$\frac{dT}{dt}$ – швидкість зміни температури за часом;

$Q_{\text{вх}}$ – підведена теплова потужність;

$Q_{\text{вих}}$ – відведена теплова потужність.

3. Структура рівнянь гідравлічних процесів.

3.1. Рівняння нерозривності:

$$\Sigma \dot{G}_{\text{вх}} = \Sigma \dot{G}_{\text{вих}}. \quad (2.4)$$

3.2. Визначення втрат тиску (формула Дарсі – Вейсбаха):

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (2.5)$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного тертя, який залежить від режиму течії (ламінальний / турбулентний) та шорсткості труби;

D – внутрішній діаметр трубопроводу;

ρ – густина теплоносія;

v – швидкість теплоносія.

3.3. Баланс напорів у контурі:

$$H_n = \Sigma \Delta H_{\text{втр}}, \quad (2.6)$$

де H_n – напір, який створює насос;

$\Sigma \Delta H_{\text{втр}}$ – сумарні втрати напору у гідравлічному контурі.

4. Приклад побудови спрощеної математичної моделі одноконтурної

системи теплопостачання, при стаціонарному режимі, яка складається: котел → подавальний трубопровід → споживач → зворотний трубопровід.

4.1 Формалізація моделі.

Теплові рівняння:

$$\begin{cases} Q_{\text{кот}} = \dot{G} \cdot c \cdot (T_1 - T_2) \\ Q_{\text{втр}} = k \cdot L \cdot (T_{\text{сер}} - T_o) \end{cases} \quad (2.7)$$

Гідравлічне рівняння:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{терт}} + \Delta P_{\text{місц}}, \quad (2.8)$$

де $\Delta P_{\text{терт}}$ – втрати тиску на тертя в прямолінійних ділянках трубопроводу;

$\Delta P_{\text{місц}}$ – втрати тиску в місцевих опорах.

4.2 Припущення:

- усталений режим;
- постійні властивості теплоносія;
- одновимірний теплоперенос.

Математична модель системи теплопостачання є інструментом кількісного аналізу, що дозволяє:

- прогнозувати режими роботи;
- порівнювати альтернативні технічні рішення;
- обґрунтовувати вибір параметрів системи.

2.2 Ідентифікація параметрів та верифікація моделей

Мета: навчитися працювати з експериментальними та експлуатаційними даними.

Ідентифікація параметрів і верифікація математичних моделей є ключовими етапами науково обґрунтованого моделювання, які дозволяють:

- адаптувати теоретичні моделі до реальних об'єктів;
- підвищити точність прогнозування;
- оцінити межі застосування моделі.

1. Джерела даних для ідентифікації.

- експериментальні дані лабораторних досліджень;
- експлуатаційні дані теплових пунктів і мереж (SCADA, BMS);
- архіви диспетчерських систем;
- дані енергоаудиту.

2. Методи ідентифікації параметрів.

2.1. Аналітичні методи – застосовуються, коли модель має просту структуру. Наприклад, ідентифікація коефіцієнта тепловтрат трубопроводу k (визначається без оптимізації):

$$k = \frac{Q_{\text{втр}}}{L \cdot (T_{\text{сер}} - T_o)}. \quad (2.9)$$

2.2. Метод найменших квадратів – найпоширеніший метод ідентифікації:

$$\min \sum_{i=1}^n (y_i^{\text{вим}} - y_i^{\text{мод}})^2, \quad (2.10)$$

де $y_i^{\text{вим}}$ – виміряне (експериментальне) значення вихідної величини;
 $y_i^{\text{мод}}$ – модельне (розрахункове) значення вихідної величини;
 $y_i^{\text{мод}}$ – модельне (розрахункове) значення вихідної величини;
 $(y_i^{\text{вим}} - y_i^{\text{мод}})$ – похибка (нев'язка) моделі.

2.3. Нелінійна параметрична ідентифікація – застосовується для складних моделей (теплові насоси, ТП).

Методи:

- градієнтні алгоритми;
- Levenberg – Marquardt;
- генетичні алгоритми.

2.4. Байєсівська ідентифікація – дозволяє врахувати апіорну інформацію та невизначеність параметрів (розподіли ймовірності параметрів, а не єдині значення).

3. Оцінка адекватності та верифікація моделей.

3.1. Порівняння модельних і вимірних даних.

Показники якості:

- середньоквадратична похибка (RMSE);
- середня абсолютна похибка (MAE);
- коефіцієнт детермінації R^2 .

3.2. Балансні перевірки:

- перевірка енергетичного балансу;
- перевірка масового балансу;
- фізична правдоподібність параметрів.

3.3. Крос-верифікація:

- розділення даних на навчальну і тестову вибірки;
- перевірка стійкості параметрів.

Ідентифікація та верифікація моделей:

- є необхідною умовою достовірного математичного моделювання;
- поєднує експериментальні дані та теоретичні залежності;
- забезпечує наукову обґрунтованість інженерних рішень.

2.3 Оптимізація систем теплопостачання

Мета: сформувати навички розв'язання оптимізаційних задач у теплопостачанні.

1. Критерії та обмеження оптимізації.

1.1. Критерії оптимізації:

- економічні:
 - мінімізація витрат палива або електроенергії;
 - мінімізація експлуатаційних витрат;
- енергетичні:
 - максимізація ККД котельної або системи;
 - мінімізація теплових втрат у мережі;
- ексергетичні:
 - мінімізація ексергетичних втрат;
 - підвищення ексергетичної ефективності системи;
- екологічні:
 - зменшення викидів CO_2 ;
 - мінімізація забруднення повітря.

1.2. Обмеження.

Технічні: допустимі температури подачі та звороту, межі роботи насосів та котлів.

Гідравлічні: максимальні витрати теплоносія, обмеження тиску.

Регуляторні та експлуатаційні: стандарти якості теплопостачання, безпека роботи.

2. Однокритеріальна та багатокритеріальна оптимізація.

2.1. Однокритеріальна – мінімізує або максимізує один критерій при виконанні всіх обмежень. Наприклад, мінімізація витрат палива при забезпеченні температурного графіка.

2.2. Багатокритеріальна – одночасно враховує декілька критеріїв, що часто суперечать один одному. Наприклад, мінімізація паливних витрат та викидів CO_2 при максимальному ККД системи.

3. Приклад оптимізації температурного графіку.

Мета: знайти оптимальні температури в подавальному та зворотному трубопроводах, щоб мінімізувати втрати в мережі та паливні витрати.

Задача:

$$\min F = f(Q_B, Q_{\text{втр}}).$$

Обмеження: $T_1 \leq 120 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_2 \geq 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Початкові умови:

$T_1 = 110 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Витрати палива 500 кг/год; втрати у мережі 30 кВт.

Оптимізація (зменшення температури в подавальному трубопроводі до $95 \text{ }^\circ\text{C}$, підвищення температури у зворотному трубопроводі до $65 \text{ }^\circ\text{C}$):

- витрати палива $\rightarrow 470 \text{ кг/год}$;
- втрати у мережі $\rightarrow 25 \text{ кВт}$.

4. Приклад мінімізації ексергетичних втрат.

Мета: зменшити неефективне використання енергії.

Задача:

$$\min \sum \dot{E}_{\text{втр}} = \sum (1 - \frac{T_o}{T}) \cdot Q_{\text{втр}},$$

де T – температура теплоносія;

T_o – температура навколишнього середовища;

$\dot{E}_{\text{втр}}$ – ексергетичні втрати;

$Q_{\text{втр}}$ – теплові втрати.

Мережа з втратами 20 кВт при $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ і $T_o = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;

Оптимізація температури до $T = 70 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow$ ексергетичні втрати зменшуються на 15 %.

5. Аналіз та інтерпретація результатів.

Побудова графіків температурного режиму та витрат палива.

Побудова графіка Pareto для багатокритеріальної оптимізації.

Висновок: зміна температурного графіка дозволяє одночасно підвищити ефективність і зменшити витрати палива та втрати енергії.

6. Методологія оптимізації.

6.1. Визначення цілей та критеріїв (економічні, енергетичні, ексергетичні).

6.2. Формалізація обмежень (технічні, гідравлічні, температурні).

6.3. Побудова математичної моделі системи.

6.4. Вибір методу оптимізації: аналітичний, чисельний, еволюційний.

6.5. Виконання оптимізації та перевірка результатів:

- перевірка фізичної реалізованості;
- аналіз чутливості параметрів;
- аналіз економічного ефекту.

Завдання до практичного заняття 2

Варіант 1.

Побудувати математичну модель водогрійної котельні та виконати оптимізацію режиму роботи за критерієм мінімуму витрат палива.

Вихідні дані:

- номінальна теплова потужність котельні: 8 МВт;
- тип котла: газовий водогрійний;
- температура подачі / звороту: 95/70 °С;
- температура зовнішнього повітря: –10 °С;
- ККД котла (номінальний): 92 %;
- нижча теплота згоряння газу: 34 МДж/м³.

Варіант 2.

Розробити математичну модель теплових втрат у тепловій мережі та виконати ідентифікацію параметрів за експериментальними даними.

Вихідні дані:

- довжина теплової мережі: 3,2 км;
- температурний графік: 120/70 °С;
- витрата теплоносія: 140 т/год;
- температура ґрунту: 7 °С;
- виміряні теплові втрати: 380 кВт;
- експериментальні дані температури теплоносія на виході мережі.

Варіант 3.

Побудувати динамічну модель теплового стану будівлі, виконати верифікацію за експериментальними даними та оптимізувати температурний режим.

Вихідні дані:

- площа будівлі: 6 000 м²;
- розрахункові тепловтрати: 90 Вт/м²;
- теплова інерційність будівлі: $2,5 \times 10^8$ Дж/К;
- температура внутрішнього повітря (задана): 20 °С;
- зовнішня температура (змінна): –15...0 °С;
- експериментальні дані температури приміщень (добовий графік).

Варіант 4.

Виконати багатокритеріальну оптимізацію системи тепlopостачання з урахуванням енергетичних та ексергетичних показників.

Вихідні дані:

- теплове навантаження: 10 МВт;
- варіанти джерел теплоти:
 - газова котельня ($\eta = 0,93$);
 - теплонасосна установка ($\text{COP} = 3,2$);
- температурні режими: 90/60 °С, 70/40 °С;
- температура навколишнього середовища: 5 °С;
- вартість палива: у відносних одиницях.

Варіант 5.

Розробити модель системи тепlopостачання та виконати оптимізацію температурного графіка за критерієм мінімізації сумарних енергетичних втрат.

Вихідні дані:

- теплове навантаження: 12 МВт;
- початковий температурний графік: 130/70 °С;
- діапазон допустимих температур подачі: 90–130 °С;
- ККД джерела теплоти: 0,90–0,95;
- температура ґрунту: 8 °С;
- питомі втрати в тепловій мережі:

$$q = 0,15 \cdot (T_{\text{сер}} - T_{\text{гр}}) ,$$

де q – питомі теплові втрати, кВт/км;
 $T_{\text{сер}}$ – середня температура теплоносія, °С;
 $T_{\text{гр}}$ – температура ґрунту, °С.

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

Мета заняття: закріплення знань і навичок щодо сучасних систем теплопостачання четвертого та п'ятого поколінь (4GDH, 5GDH), які орієнтовані на підвищення енергоефективності, інтеграцію відновлюваних джерел енергії та забезпечення сталого розвитку.

Теоретичні положення. У межах теми здійснюється дослідження температурних режимів систем теплопостачання третього, четвертого та п'ятого поколінь: якщо для 3GDH характерні відносно високі температури теплоносія, то 4GDH працює на понижених температурах, що зменшує теплові втрати та створює умови для використання низькопотенційних джерел енергії; 5GDH базується на ще нижчих температурах та принципах інтеграції теплових насосів, що дозволяє поєднувати виробництво тепла й холоду та максимально адаптувати систему до потреб споживачів. Важливим аспектом є вплив температури теплоносія на теплові втрати в мережах: зниження температури суттєво зменшує втрати, але водночас висуває підвищені вимоги до теплоізоляції трубопроводів, що забезпечує стабільність роботи системи та економію енергії. Окремо розглядається узгодження параметрів мережі з характеристиками будівель, адже ефективність 4GDH і 5GDH можлива лише за умови відповідності теплових навантажень сучасним стандартам енергоефективності будівель, низькотемпературним системам опалення та високій якості огорожувальних конструкцій. Комплексний підхід до аналізу та оптимізації систем теплопостачання нового покоління дозволяє забезпечити раціональне використання енергоресурсів, зменшення екологічного впливу та інтеграцію у стратегії сталого розвитку енергетики.

3.1 Аналіз температурних режимів 3GDH, 4GDH, 5GDH

Мета: формування умінь аналізувати та порівнювати температурні режими систем теплопостачання різних поколінь, оцінювати вплив температур теплоносія на теплові втрати, гідравлічні режими, коефіцієнт корисної дії джерел тепла та можливості інтеграції відновлюваних джерел енергії, обґрунтовувати доцільність переходу від систем третього покоління (3GDH) до систем четвертого та п'ятого поколінь (4GDH та 5GDH), а також виконувати розрахунки для типових експлуатаційних і проєктних ситуацій з метою підвищення ефективності та надійності сучасних систем теплопостачання.

Класифікація температурних режимів DH-систем наведена у таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Загальна характеристика поколінь

Параметр	3GDH	4GDH	5GDH
1	2	3	4
Тип мережі	Високотемпературна	Низькотемпературна	Ультранизькотемпературна
Температура подачі	90–130 °C	50–70 °C	10–30 °C
Температура звороту	50–70 °C	25–40 °C	5–20 °C
Тип теплоносія	Вода / пара	Вода	Вода / водно-гліколева
Споживач	Пасивний	Частково активний	Активний (prosumer)
Теплові втрати	Дуже високі	Помірні	Мінімальні
Вимоги до ізоляції	Високі	Середні	Низькі
Сумісність з ВДЕ	Обмежена	Висока	Максимальна

1. Вплив температури на теплові втрати мережі.

Теплові втрати в трубопроводах знаходять за формулою 2.2.

Перехід від 3GDH до 4GDH → зниження теплових втрат на 30–50 %.

Перехід до 5GDH → теплові втрати можуть зменшуватись у 5–10 разів.

В існуючих системах теплопостачання зменшення різниці температур приводе до збільшення: витрати теплоносія; вимог до балансування; ролі інтелектуального керування.

2. Приклад порівняння теплових втрат у теплової мережі для 3GDH, 4GDH та 5GDH поколінь систем теплопостачання.

Вихідні дані:

- довжина мережі: 1 км;
- $T_{\text{грунту}} = 10\text{ °C}$;
- режими:
 - 3GDH: 120/70 °C;
 - 4GDH: 65/30 °C;
 - 5GDH: 20/12 °C.

Завдання: обчислити відносне зниження теплових втрат. Побудувати графік залежності втрат від середньої температури мережі.

Рішення.

Лінійні теплові втрати теплової мережі описуються залежністю 2.2.

Оскільки довжина мережі та коефіцієнт теплопередачі однакові, для порівняльного аналізу достатньо використовувати відносні теплові втрати, пропорційні лише температурному напору:

$$Q_{\text{втр}} \sim (T_{\text{сер}} - T_{\text{грунту}}).$$

Визначаємо середню температуру теплоносія в теплової мережі:

$$T_{\text{сер}} = \frac{T_1 + T_2}{2}.$$

Температурний напір відносно ґрунту:

$$\Delta T = T_{\text{сер}} - T_{\text{грунту}}.$$

Відносні теплові втрати (нормування до 3GDH). Приймаємо теплові втрати 3GDH = 100 %:

$$Q_{\text{відн}} = \frac{\Delta T_i}{\Delta T_{3\text{GDH}}} \cdot 100.$$

Результати розрахунку зводимо у таблицю 3.2. Графік залежності втрат від середньої температури мережі наведено на рисунку 3.1.

Таблиця 3.2 – Результат розрахунку теплових втрат

Система	$T_{\text{подачі}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{звороту}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{сер}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T = T_{\text{сер}} - T_{\text{грунту}}, ^\circ\text{C}$	Відносні втрати, %
3GDH	120	70	95	85	100
4GDH	65	30	47,5	37,5	44,11764706
5GDH	20	12	16	6	7,058823529

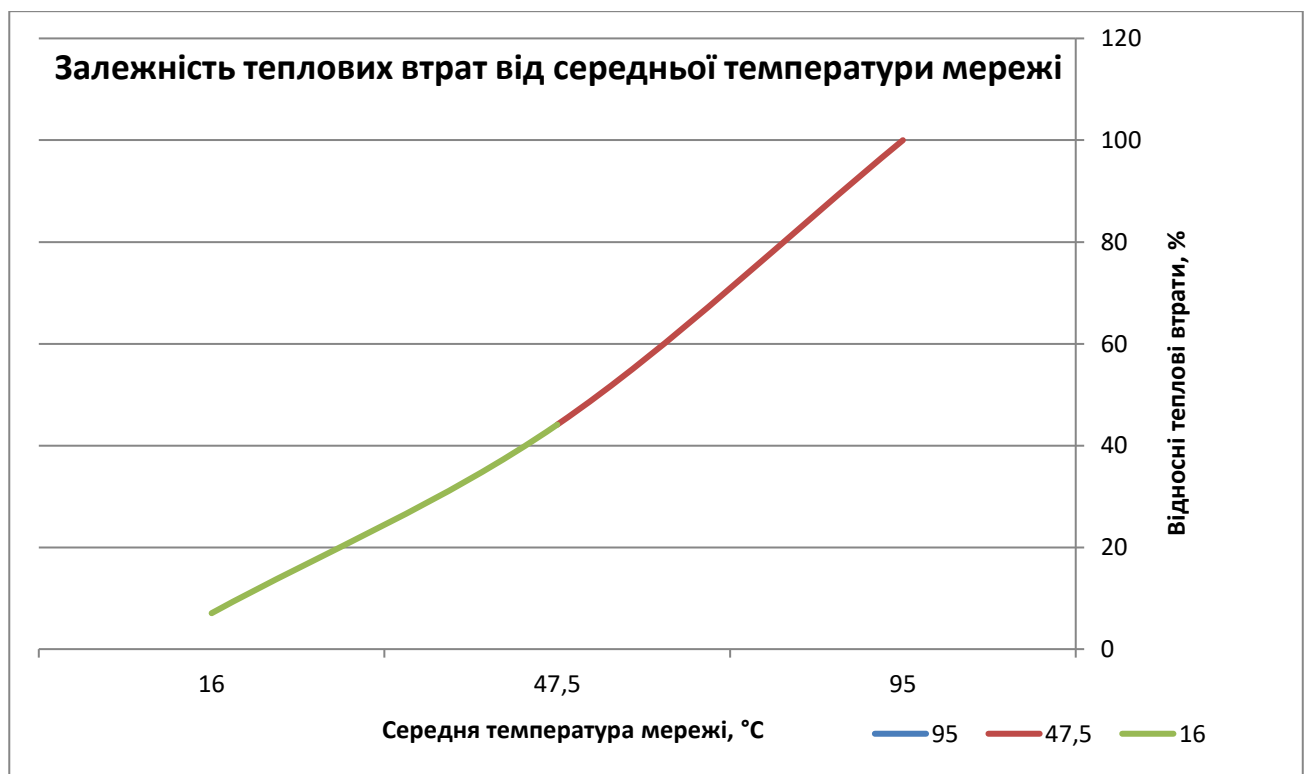


Рисунок 3.1 – Графік залежності втрат від середньої температури мережі

3. Визначення абсолютних теплових втрат для наведеного вище прикладу.

Вихідні дані:

- довжина мережі: 1 км;
- $T_{\text{грунту}} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- трубопровід теплової мережі Д108*4 мм. Труба попередньо ізольована (заводського виготовлення);
- приведений коефіцієнт теплопередачі: $k=0,25\text{ Вт/(м*К)}$;
- режими:
 - 3GDH: 120/70 $^{\circ}\text{C}$;
 - 4GDH: 65/30 $^{\circ}\text{C}$;
 - 5GDH: 20/12 $^{\circ}\text{C}$.

Рішення.

Визначаємо лінійні теплові втрати визначаємо за формулою 2.2.

Результати розрахунку зводимо у таблицю 3.3. Порівняльна діаграма теплових втрат системами теплопостачання 3GDH, 4GDH та 5GDH наведена на рисунку 3.2.

Таблиця 3.3 – Результат визначення абсолютних теплових втрат

Система	$T_{\text{подачі}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{звороту}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{сер}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T,\text{ }^{\circ}\text{C}$	Втрати, кВт
3GDH	120	70	95	85	21,25
4GDH	65	30	47,5	37,5	9,38
5GDH	20	12	16	6	1,5

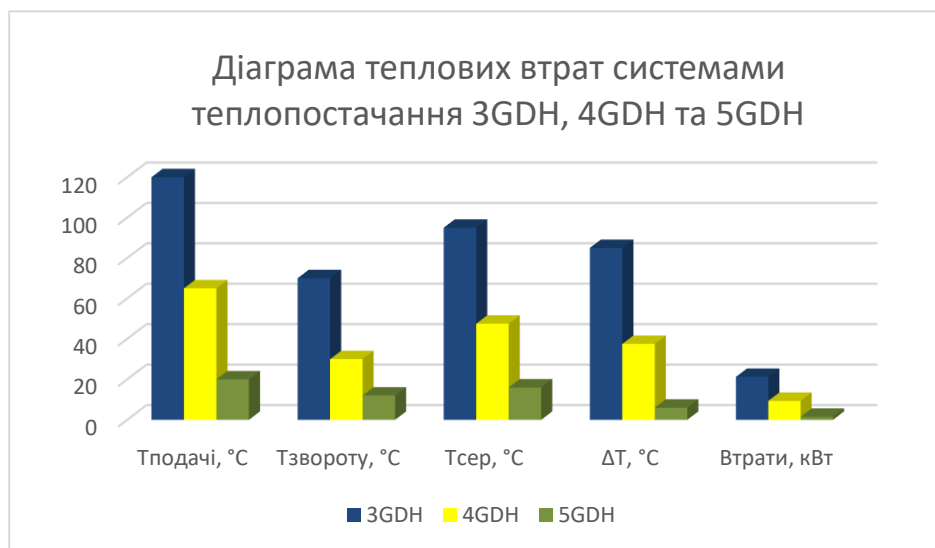


Рисунок 3.2 – Порівняльна діаграма теплових втрат системами теплопостачання 3GDH, 4GDH та 5GDH

4. Аналіз COP теплового насоса в 3GDH, 4GDH та 5GDH системах теплопостачання.

Вихідні дані:

- джерело низькопотенційного тепла: $15\text{ }^{\circ}\text{C} = 288\text{ K}$;
- температура подачі:
 - 3GDH: $65\text{ }^{\circ}\text{C} = 338\text{ K}$;
 - 4GDH: $45\text{ }^{\circ}\text{C} = 318\text{ K}$;
 - 5GDH: $35\text{ }^{\circ}\text{C} = 308\text{ K}$ (локально).

Завдання:

- оцінити зміну COP;
- зробити висновок про доцільність кожної системи.

Рішення.

Ідеальний COP теплового насоса, що працює в режимі нагріву:

$$COP_i = \frac{T_h}{T_h - T_c}.$$

Реальні теплові насоси мають:

$$COP_{\text{реал}} \approx (0,45 \div 0,55) \cdot COP_i.$$

У розрахунку приймемо коефіцієнт реальності 0,5 (типове значення для сучасних ТН).

Виконуємо розрахунок COP для кожного покоління систем.

3GDH:

$$COP_{i(3GDH)} = \frac{T_h}{T_h - T_c} = \frac{338}{338 - 288} = 6,76.$$

$$COP_{\text{реал}(3GDH)} = 0,5 \cdot 6,76 = 3,38 \approx 3,4.$$

4GDH:

$$COP_{i(4GDH)} = \frac{T_h}{T_h - T_c} = \frac{318}{318 - 288} = 10,6.$$

$$COP_{\text{реал}(4GDH)} = 0,5 \cdot 10,6 = 5,3.$$

5GDH:

$$COP_{i(5GDH)} = \frac{T_h}{T_h - T_c} = \frac{308}{308 - 288} = 15,4.$$

$$COP_{\text{реал}(5GDH)} = 0,5 \cdot 15,4 = 7,7.$$

Отримані результати зводимо у порівняльну таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Порівняльна таблиця результатів

Система	Тподачі, °C	ΔT , K	COP (реальний)
3GDH	65	50	$\approx 3,4$
4GDH	45	30	$\approx 5,3$
5GDH	35	20	$\approx 7,7$

Аналіз отриманих результатів:

- зниження температури подачі на 20 K $\rightarrow$ приріст COP $\approx +55$ %;
- зниження на 30 K $\rightarrow$ COP зростає більш ніж у 2 рази.

Енергетичні наслідки (на 1 МВт·год тепла) наведені у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Енергетичні наслідки

Система	Споживання електроенергії
3GDH	≈ 290 кВт·год
4GDH	≈ 190 кВт·год
5GDH	≈ 130 кВт·год

Графік залежності COP від температури подачі наведено на рисунку 3.3.

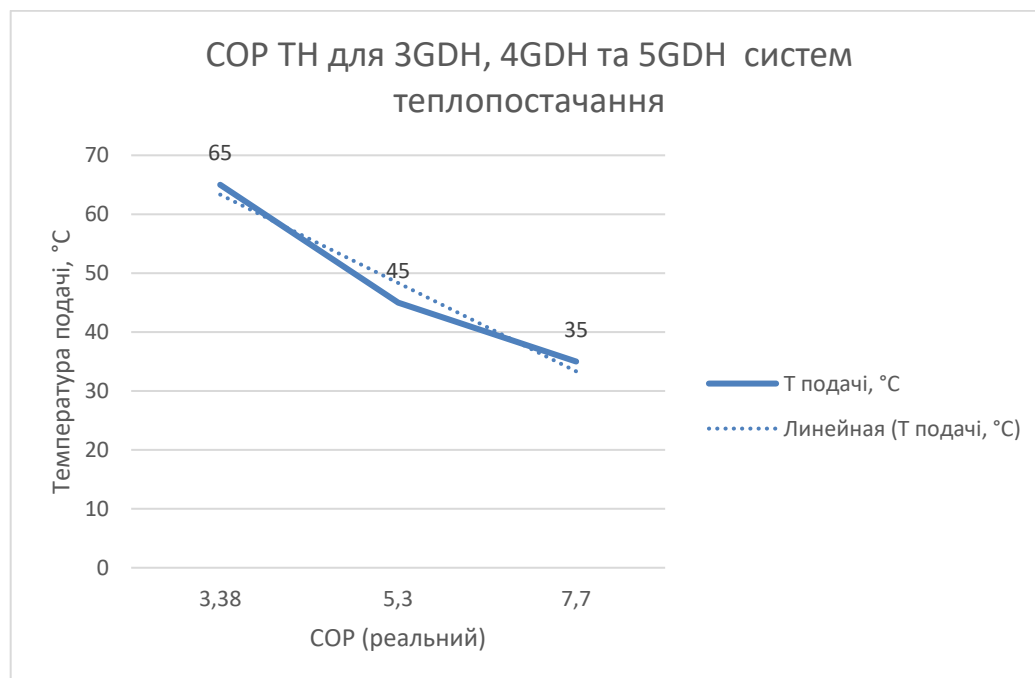


Рисунок 3.3 – Залежність реального COP теплового насоса від температур подачі у системах теплопостачання 3GDH, 4GDH та 5GDH

Висновок:

1. 3GDH + теплові насоси → термодинамічно нераціональне поєднання (великий температурний підйом, низький COP).
2. 4GDH є оптимальною системою перехідного періоду:
 - високий COP;
 - збереження централізованої архітектури.
3. 5GDH забезпечує максимальну ефективність теплових насосів, оскільки:

$$\Delta T \Rightarrow \min.$$

3.2 Розрахунок теплового навантаження кварталу / мікрорайону для 4GDH

Мета: формування у здобувачів навичок визначення розрахункового теплового навантаження житлового кварталу для систем теплопостачання четвертого покоління (4GDH), врахування низькотемпературних режимів роботи (55/25, 60/30, 65/30 °C), здійснення переходу від будівельного рівня до рівня кварталу та джерела тепла, а також аналізу впливу енергоефективності забудови на необхідну потужність джерел тепла з метою забезпечення оптимальної роботи сучасних систем теплопостачання.

Вихідні дані:

- десять дев'ятиповерхових житлових будинків, 2018 року забудови, м. Київ;
- площа одного поверху складає: 600 м²;
- розрахункова опалювальна температура зовнішнього повітря: –22 °C;
- середня температура зовнішнього повітря за опалювальний період: –0,1 °C;
- температура внутрішнього повітря: 22 °C;
- тривалість опалювального періоду: 4 224 години;
- питомі теплові втрати: 50 Вт/м²;
- середня забезпеченість централізованого ГВП: 35 Вт/м²;
- температурний графік системи теплопостачання покоління 3GDH: 95/70 °C;
- температурний графік системи теплопостачання покоління 4GDH: 60/30 °C.

Завдання: визначити розрахункове теплове навантаження житлового мікрорайону для 4GDH; врахувати низькотемпературні режими (55/25, 60/30, 65/30 °C); виконати аналіз впливу енергоефективності забудови на потужність джерела тепла.

Рішення:

1. Визначаємо загальну опалювальну площу житлового мікрорайону:

$$A = 10 \times 9 \times 600 = 54\,000 \text{ м}^2.$$

2. Знаходимо розрахункову різницю температур внутрішнього повітря та опалювальної температури зовнішнього повітря:

$$\Delta T = 20 + 22 = 42 \text{ }^\circ\text{C}.$$

3. За укрупненими показниками визначаємо максимальне теплове навантаження систем опалення житлового мікрорайону:

$$Q_o = 50 \times 54\,000 = 2\,700\,000 \text{ Вт} = 2,7 \text{ МВт}.$$

4. Проведемо корекцію на 4GDH (низькотемпературний режим).

Для 4GDH:

- збільшення площі теплообміну;
- зменшення температурного напору;
- компенсація типу розмірів радіаторів або застосування ТП.

Корекційний коефіцієнт складає: $1,05 \div 1,1$; приймаємо $k = 1,07$.

5. Визначаємо максимальне теплове навантаження систем опалення для 4GDH системи:

$$Q_o^{4GDH} = 2,7 \times 1,07 = 2,89 \text{ МВт}.$$

6. Визначаємо середнє теплове навантаження системи опалення:

$$Q_{o(\text{сеп})}^{4GDH} = 2,89 \cdot \frac{20+1}{20+22} = 1,445 \text{ МВт}.$$

7. Визначаємо середнє теплове навантаження системи опалення за опалювальний період:

$$Q_{o(\text{сеп})}^{4GDH} = 1,445 \times 4\,224 = 6\,104 \text{ МВт} \cdot \text{год}.$$

8. Знаходимо середнє теплове навантаження системи гарячого водопостачання:

$$Q_{\text{ГВП}}^{\text{сеп}} = 35 \times 54\,000 = 1,89 \text{ МВт}.$$

9. Визначаємо максимальне теплове навантаження системи ГВП:

$$Q_{\text{ГВП}} = 1,89 \times 2,4 = 4,536 \text{ МВт.}$$

10. Визначаємо середнє теплове навантаження системи гарячого водопостачання за рік:

$$Q_{\text{ГВП}}^{\text{сер.рік}} = 1,89 \cdot (8\,760 - 360) = 8\,398 \text{ МВт} \cdot \text{год.}$$

11. Визначаємо сумарне максимальне теплове навантаження систем опалення та гарячого водопостачання:

$$\Sigma Q_{\text{max}} = 2,89 + 4,536 = 7,426 \text{ МВт.}$$

12. Визначаємо сумарне середнє за рік теплове навантаження систем опалення та гарячого водопостачання:

$$\Sigma Q^{\text{сер.рік}} = 6\,104 + 8\,398 = 14\,502 \text{ МВт} = 14,5 \text{ ГВт.}$$

Графік теплових навантажень відносно температур зовнішнього повітря наведено на рисунку 3.4, графік стояння теплових навантажень – рисунок 3.5.

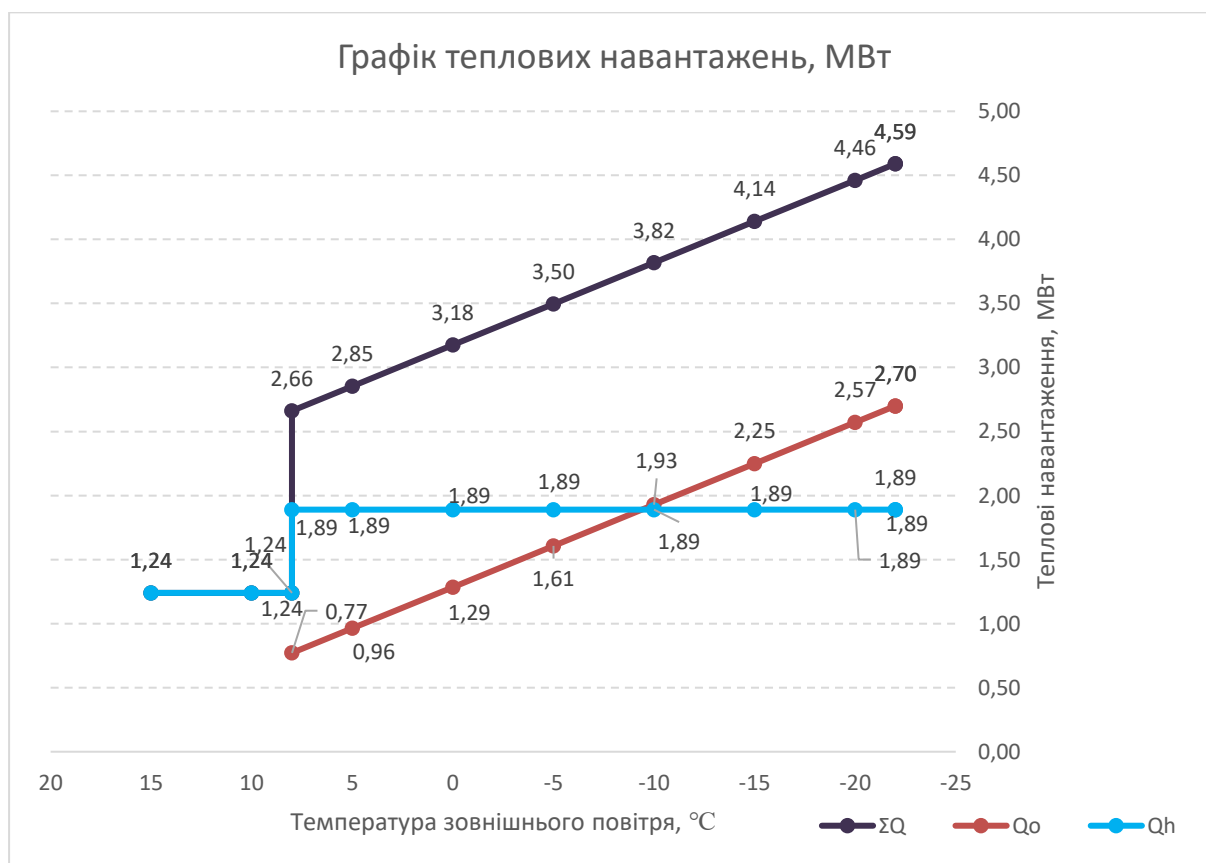


Рисунок 3.4 – Графік теплових навантажень залежно від температур зовнішнього повітря

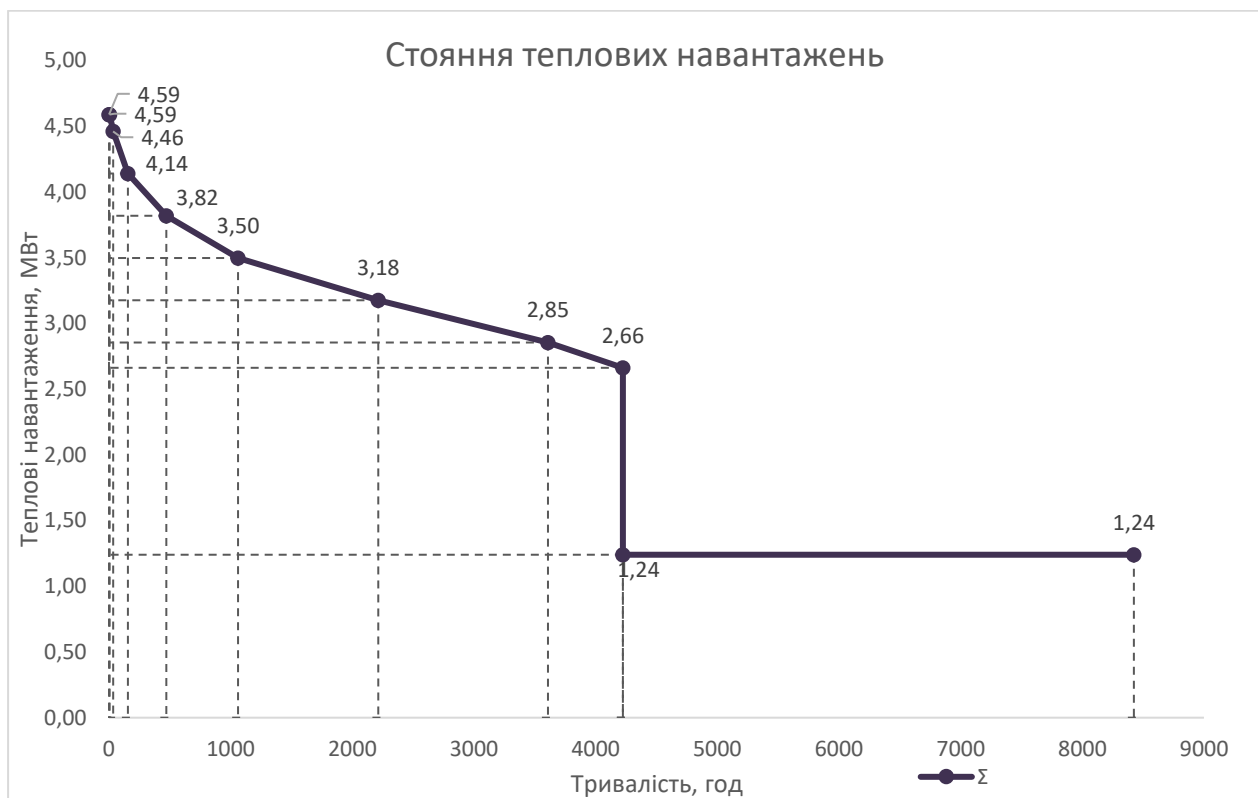


Рисунок 3.5 – Графік тривалості стояння теплових навантажень

Для 4GDH ключовим є не лише навантаження, а профіль споживання.

Зменшення температурного рівня:

- підвищує ефективність джерел тепла;
- зменшує втрати в мережі;
- потребує системного підходу до проєктування будівель.

Розрахунок теплового навантаження – базовий етап проєктування Smart Heat Grids.

3.3 Узгодження параметрів мережі з характеристиками будівель

Мета: формування у здобувачів здатності узгоджувати температурні та гідравлічні параметри теплових мереж із тепловими навантаженнями будівель та типами внутрішніх систем опалення, визначати технічні та експлуатаційні обмеження переходу до систем теплопостачання четвертого і п'ятого поколінь (4GDH та 5GDH), а також виконувати перевіірочні й оптимізаційні розрахунки при реконструкції теплових мереж з метою підвищення їх ефективності, надійності та відповідності сучасним вимогам енергоефективності.

Узгодження параметрів теплової мережі з теплотехнічними та гідравлічними характеристиками будівель є ключовою умовою ефективної

роботи систем теплопостачання, особливо при переході від традиційних систем 3-го покоління до 4GDH і 5GDH. Суть задачі полягає у забезпеченні відповідності між температурним режимом мережі, витратою теплоносія, можливостями внутрішніх систем опалення будівель та гідравлічними обмеженнями.

Розглянемо покрокове рішення на прикладі квартальної будівлі, яка підключається до теплової мережі 4GDH.

Вихідні дані: розрахункове теплове навантаження будівлі становить 600 кВт. Запроектований температурний режим теплової мережі – 60/30 °С. Теплоносій – вода з питомою теплоємністю $c = 4,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Будівля обладнана низькотемпературною радіаторною системою, мінімально допустима температура подачі – 55 °С.

Першим кроком виконується перевірка температурної сумісності мережі та будівлі. Температура подачі 60 °С перевищує мінімально допустиму для радіаторів (55 °С), отже з точки зору температурного режиму система потенційно працездатна. Далі визначається середній температурний напір у приладах. Для режиму 60/30 °С середня температура теплоносія становить 45 °С. За умови внутрішньої температури приміщень 20 °С середній температурний напір дорівнює 25 К. Це значення використовується для перевірки тепловіддачі радіаторів або для корекції їх площі теплообміну.

Другим кроком є визначення необхідної витрати теплоносія. Для цього використовується формула:

$$G = \frac{600}{4,18 \cdot (60 - 30)} = 4,78 \text{ кг/с}.$$

Отже, для покриття теплового навантаження будівлі при режимі 60/30 °С необхідна масова витрата теплоносія приблизно 4,8 кг/с. На цьому етапі вже можна порівняти з витратою при режимі 95/70 °С і побачити, що для 4GDH витрата буде істотно більшою, що безпосередньо впливає на гідравліку мережі.

Третім кроком виконується гідравлічна перевірка. Збільшена витрата призводить до зростання швидкості руху теплоносія та втрат тиску в трубопроводах. Для попередньої оцінки визначається швидкість потоку в трубі заданого діаметра, після чого втрати тиску оцінюються за формулою Дарсі – Вейсбаха (2.5).

Якщо отримані втрати тиску перевищують допустимі значення для насосного обладнання або внутрішніх систем будівлі, приймається рішення про збільшення діаметра труб, зонування мережі або застосування частотного регулювання насосів.

Четвертим кроком є узгодження параметрів на рівні індивідуального теплового пункту. У 4GDH ІТП повинен забезпечувати точне регулювання витрати теплоносія залежно від зовнішньої температури, мінімальний температурний перепад на теплообміннику та стабільну роботу внутрішньої системи опалення. За потреби вводиться змішувальний контур або акумулююча ємність для згладжування пікових навантажень.

П'ятим кроком виконується перевірка енергетичної доцільності рішення. Зниження температури подачі мережі зменшує теплові втрати в трубопроводах і підвищує ефективність теплових насосів, але вимагає більших витрат теплоносія та ретельнішого гідравлічного балансування. Остаточне рішення приймається на основі техніко-економічного порівняння варіантів.

Таким чином, узгодження параметрів теплової мережі з характеристиками будівель є послідовним інженерним процесом, який включає температурну перевірку, розрахунок витрати теплоносія, гідравлічний аналіз та адаптацію вузлів підключення. Для систем 4GDH і 5GDH цей процес стає визначальним, оскільки саме будівлі та їхні внутрішні системи формують граничні умови ефективної роботи всієї теплової мережі.

Завдання до практичного заняття 3

Варіант 1.

Виконати порівняльний аналіз 3GDH, 4GDH та 5GDH для житлового кварталу.

Вихідні дані:

- тип забудови: житлові будинки середньої поверховості;
- кількість будинків: 8;
- поверховість: 9 поверхів;
- загальна опалювана площа одного будинку: 6 300 м²;
- питоме теплове навантаження: 70 Вт/м²;
- кліматичний район: II;
- розрахункова температура зовнішнього повітря: –22 °С.

Температурні графіки:

- 3GDH: 95/70 °С;
- 4GDH: 65/35 °С;
- 5GDH: 40/25 °С.

Параметри тепломережі:

- середня довжина мережі: 1,2 км;
- коефіцієнт тепловтрат:
 - 3GDH – 12 %;
 - 4GDH – 7 %;
 - 5GDH – 4 %.

Необхідно визначити:

1. Загальне теплове навантаження кварталу.
2. Річні втрати тепла в мережі для кожного покоління.
3. Відносну економію теплової енергії.
4. Висновок щодо доцільності переходу на 4GDH або 5GDH.

Варіант 2.

Визначити вплив енергоефективності будівель на роботу 4GDH.

Вихідні дані за будівлями зведені у таблицю 3.6.

Таблиця 3.6 – Вихідні дані

Параметр	Будівля А	Будівля В	Будівля С
Рік забудови	1985	2005	2020
Площа, м ²	5 000	5 000	5 000
Устіни, Вт/(м ² · К)	1,2	0,6	0,25
Увікна, Вт/(м ² · К)	2,4	1,4	0,9
Вентиляція	природна	механічна	з рекуперацією

Для всіх будинків:

- температурний графік мережі 4GDH: 55/25 °С;
- внутрішня температура: +20 °С;
- температура зовнішнього повітря: –20 °С.

Необхідно визначити:

1. Теплові втрати кожної будівлі.
2. Можливість покриття теплового навантаження при 55 °С.
3. Потребу в додаткових джерелах (локальні ТН).
4. Висновки щодо реконструкції огорожувальних конструкцій.

Варіант 3.

Розробити концепцію системи 5GDH для нового житлового комплексу.

Вихідні дані:

- тип об'єкта: новий житловий комплекс;
- кількість будинків: 5;

- поверховість: 12 поверхів;
- загальна площа комплексу: 42 000 м²;
- річне теплове навантаження на опалення: 45 кВт · год/(м² · рік);
- гаряче водопостачання: 20 кВт · год/(м² · рік);

Джерела низькопотенційного тепла:

- ґрунт: $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- стічні води: $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Параметри мережі:

- температурний рівень мережі: 30–20 °С;
- COP теплових насосів: 4,2.

Необхідно визначити:

1. Загальне річне споживання тепла.
2. Потужність теплових насосів.
3. Споживання електроенергії.
4. Порівняння з системою 4GDH (65/35 °С).

Варіант 4.

Виконати реконструкцію існуючої тепломережі до рівня 4GDH.

Вихідні дані:

- існуюча система: 3GDH (95/70 °С);
- довжина тепломережі: 2,4 км;
- діаметр труб: DN200;
- стан теплоізоляції: задовільний;
- поточні тепловтрати: 15 %.

Після реконструкції (4GDH):

- температурний графік: 65/35 °С;
- очікувані тепловтрати: 8 %;
- загальне теплове навантаження споживачів: 9,5 МВт.

Необхідно визначити:

1. Зменшення тепловтрат у Гкал/рік.
2. Вплив зниження температури на теплове навантаження будівель.
3. Необхідність модернізації внутрішніх систем опалення.
4. Інженерні обмеження з точки зору будівельних конструкцій.

Варіант 5.

Будівля як активний елемент системи 5GDH.

Вихідні дані:

- тип будівлі: громадська (офісна);

- площа: 8 000 м²;
- тепловиділення від обладнання: 12 Вт/м²;
- річна потреба в опаленні: 30 кВт · год/м²;
- річна потреба в охолодженні: 25 кВт · год/м².

Параметри 5GDH:

- температура мережі: 25–35 °С;
- COP теплового насоса:
 - опалення – 4,5;
 - охолодження – 5,0.

Необхідно визначити:

1. Баланс тепла будівлі за рік.
2. Обсяг тепла, що може бути переданий у мережу.
3. Вплив будівлі на загальний режим системи 5GDH.
4. Переваги активної ролі будівель у міській забудові.

4 ІНТЕГРАЦІЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Мета заняття: набуття здобувачами освіти практичних навичок моделювання та аналізу застосування відновлюваних джерел енергії в системах теплопостачання, зокрема сонячних теплових колекторів, біомаси та геотермальної енергії, визначення їх частки у загальному тепловому балансі системи, а також оцінки впливу впровадження ВДЕ на зменшення викидів CO₂ порівняно з традиційними джерелами енергії з урахуванням технічних, енергетичних та екологічних показників.

Теоретичні положення. Інтеграція відновлюваних джерел енергії в системи теплопостачання є важливим напрямом підвищення енергоефективності та зниження негативного впливу на довкілля. До основних відновлюваних джерел теплової енергії належать сонячні теплові колектори, біоенергетичні установки на основі біомаси та геотермальні системи, які можуть використовуватися як автономно, так і в поєднанні з традиційними джерелами тепла. Процес інтеграції ВДЕ передбачає моделювання режимів роботи систем теплопостачання з урахуванням теплових навантажень, кліматичних умов, сезонної нерівномірності виробництва тепла та характеристик обладнання. Важливим показником ефективності є частка відновлюваних джерел у тепловому балансі, яка визначається співвідношенням виробленої з ВДЕ теплової енергії до загального обсягу споживання тепла.

Збільшення цієї частки сприяє зменшенню споживання викопного палива та підвищенню енергетичної незалежності системи. Впровадження ВДЕ в теплопостачання також має значний екологічний ефект, що проявляється у скороченні викидів CO₂ та інших забруднюючих речовин, оцінка якого здійснюється шляхом порівняння питомих викидів традиційних і відновлюваних джерел енергії. Отже, теоретичні засади інтеграції ВДЕ базуються на поєднанні енергетичного, техніко-економічного та екологічного аналізу систем теплопостачання.

4.1 Моделювання інтеграції сонячних теплових колекторів, біомаси, геотермальної енергії

Мета: вміти опанувати методи моделювання інтеграції сонячних теплових колекторів, біоенергетичних установок та геотермальних джерел у системи теплопостачання з урахуванням технічних параметрів, режимів роботи та кліматичних умов.

1. Концепція гібридної системи теплопостачання

Інтегрована система включає:

- сонячні теплові колектори – покриття пікових та сезонних теплових навантажень;
- геотермальну енергію (теплові насоси) – базове теплове навантаження;
- біомасу (котли або ТЕЦ) – резервне та балансує джерело.

Функціональна схема:

1. Сонячна енергія → тепловий акумулятор.
2. Геотермальна установка → постійне теплопостачання.
3. Біомаса → компенсація дефіциту та пікові навантаження.
4. Система управління → оптимальний розподіл потоків енергії.

2. Математичне моделювання компонентів.

2.1. Сонячні теплові колектори.

Корисна теплова потужність колектора:

$$Q_{col} = A_{col} \cdot [G_t \cdot \eta_o - U_l \cdot (T - T_o)], \quad (4.1)$$

де A_{col} – площа колекторів, м²;

G_t – сумарна сонячна радіація, Вт/м²;

η_o – оптичний ККД;

U_l – коефіцієнт теплових втрат;

T – середня температура теплоносія, °С;

T_o – середня температура зовнішнього повітря, °С.

Модель виходу енергії за період:

$$E_{col} = \int Q_{col}(t)dt . \quad (4.2)$$

2.2. Геотермальна енергія.

Теплова потужність:

$$Q_g = COP \cdot P_{el} , \quad (4.3)$$

де P_{el} – споживана електрична потужність компресора теплового насоса, Вт (кВт).

Коефіцієнт перетворення:

$$COP = \frac{T_h}{T_h - T_c} , \quad (4.4)$$

де T_h – абсолютна температура теплоносія на стороні конденсатора (теплоспоживання), К;

T_c – абсолютна температура теплоносія на стороні випарника (геотермальне джерело), К.

Спрощена модель ґрунтового теплообміну:

$$q = \lambda \cdot \frac{T_g - T_b}{\ln(r_2/r_1)} , \quad (4.5)$$

де q – питома теплова потужність (лінійний тепловий потік) від ґрунту до теплоносія, Вт/м;

λ – коефіцієнт теплопровідності ґрунту, Вт/(м·К);

T_g – температура непорушеного ґрунту на віддаленні від теплообмінника, К;

T_b – середня температура теплоносія (розсіл, антифриз) у геотермальному контурі, К;

r_2 – радіус теплового впливу (ефективна відстань, на якій температура ґрунту вважається сталою), м;

r_1 – зовнішній радіус геотермальної труби, м.

2.3 Біоенергетичні установки.

Теплова потужність котла на біомасі:

$$Q_{bio} = B \cdot Q_n \cdot \eta_k , \quad (4.6)$$

де B – витрата біопалива, кг/с;

Q_n – нижча теплота згоряння палива, МДж/кг;

η_k – ККД котла.

3. Баланс теплової енергії системи.

Для кожного розрахункового інтервалу:

$$Q_{\Sigma} = Q_{col} + Q_g + Q_{bio} \pm Q_{ак}, \quad (4.7)$$

де $Q_{ак}$ – заряд/розряд акумулятора тепла.

4. Алгоритм інтегрованого моделювання

4.1. Визначення погодних даних (радіація, температура).

4.2. Розрахунок виходу сонячної енергії.

4.3. Оцінка стабільної геотермальної потужності.

4.4. Визначення дефіциту тепла.

4.5. Покриття дефіциту біомасою.

4.6. Оптимізація режимів роботи акумулятора.

5. Оптимізаційна постановка задачі.

Цільова функція.

Мінімізація сумарних витрат:

$$\min(C_{bio} + C_e + C_{екс}), \quad (4.8)$$

де C_{bio} – річні приведені витрати на біопаливо, грн/рік;

C_e – річні витрати на електроенергію, грн/рік;

$C_{екс}$ – річні експлуатаційні та сервісні витрати, грн/рік.

Обмеження:

- тепловий баланс;
- мінімальна та максимальна потужність обладнання;
- екологічні нормативи (CO_2 , NO_x);
- температурні графіки мережі.

Приклад.

Вихідні дані:

– середнє теплове навантаження будівлі: 500 кВт;

– площа колекторів: 600 м²;

– середня річна корисна теплопродуктивність колекторів: 730 кВт·год/

(м² · рік);

– геотермальний ТН: 200 кВт;

– біокотел: 400 кВт;

– питомі викиди CO_2 котла: 0,202 кг/(кВт · год);

– акумулятор: 1 000 кВт · год;

– тривалість опалювального періоду: 4 000 годин.

Рішення:

1. Визначаємо попит у теплової енергії за опалювальний період:

$$Q_{\text{рік}} = 500 \times 4\,000 = 2\,000\,000 \text{ кВт/рік.}$$

2. Річний виробіток сонячної теплової енергії:

$$Q_{\text{col}} = 600 \times 730 = 438\,000 \text{ кВт/рік.}$$

3. Визначаємо частку сонячної енергії:

$$n_{\text{col}} = \frac{438\,000}{2\,000\,000} = 0,219 \approx 22 \, \%.$$

4. Річний виробіток теплової енергії ТН:

$$Q_{\text{тн}} = 200 \times 4\,000 = 800\,000 \text{ кВт/рік.}$$

5. Частка геотермальної енергії:

$$n_{\text{тн}} = \frac{800\,000}{2\,000\,000} = 0,4 = 40 \, \%.$$

6. Визначаємо необхідну теплову енергію, яку повинен виробляти біокотел за рік:

$$Q_{\text{к}} = 2\,000\,000 - 438\,000 - 800\,000 = 762\,000 \text{ кВт/рік.}$$

7. Частка біомаси:

$$n_{\text{к}} = \frac{762\,000}{2\,000\,000} = 0,381 \approx 38 \, \%.$$

8. Перевірка за потужністю котла:

$$Q_{\text{к}} = \frac{762\,000}{4\,000} = 190,5 \text{ кВт.}$$

$$400 > 190,5 .$$

Біокотел забезпечує пікове навантаження.

9. Оцінка ролі акумулятора.

Акумулятор дозволяє:

- накопичувати надлишкову сонячну енергію;
- зменшувати включення біокотла в перехідні періоди;
- зменшувати кількість пусків теплового насоса.

Для добового циклу:

$$T = \frac{1\,000}{500} = 2 \text{ год.}$$

Акумулятор дозволяє 2 години автономної роботи за добу.

10. Оцінка скорочення викидів CO₂.

Базові викиди без ВДЕ:

$$CO_2 = 2\,000\,000 \times 0,202 = 404\,000 \text{ кг/рік.}$$

Частка ВДЕ:

$$40 + 22 = 62 \text{ \%}.$$

Скорочення викидів:

$$0,62 \times 404\,000 = 250\,480 \text{ кг/рік.}$$

4.2 Аналіз частки ВДЕ в тепловому балансі

Метою аналізу частки відновлюваних джерел енергії у тепловому балансі є кількісне визначення внеску ВДЕ в загальний обсяг виробництва теплової енергії системи, оцінка її відповідності чинним нормативним вимогам і стратегічним цілям декарбонізації, а також виявлення можливих резервів для підвищення частки відновлюваних джерел енергії без зміни встановленої потужності теплогенеруючого обладнання.

1. Поняття теплового балансу з позиції ВДЕ.

Тепловий баланс системи у часовому інтервалі Δt описується як:

$$\Sigma Q_i = Q_{\text{сп}} + Q_{\text{втр}} + \Delta Q_{\text{ак}}, \quad (4.9)$$

де ΣQ_i – теплова енергія, вироблена i -тим джерелом;

$Q_{\text{сп}}$ – теплоспоживання;

$Q_{\text{втр}}$ – втрати в мережі та обладнанні;

$\Delta Q_{\text{ак}}$ – зміна запасу тепла в акумуляторах.

ВДЕ-складова включає лише ті джерела, у яких первинна енергія є відновлюваною (сонце, геотермія, біомаса).

2. Коефіцієнт частки ВДЕ.

2.1. Річна енергетична частка ВДЕ:

$$n_R^E = \frac{\Sigma Q_R}{\Sigma Q_{tot}}, \quad (4.10)$$

де ΣQ_R – сумарна теплова енергія, вироблена усіма відновлюваними джерелами;

ΣQ_{tot} – загальна теплова енергія, подана споживачам системи.

Показник n_R^E є інтегральним і не відображає нерівномірність генерації у часі.

2.2. Потужнісна частка ВДЕ:

$$n_R^E = \frac{\Sigma P_R}{P_{max}}. \quad (4.11)$$

Використовується для:

- аналізу пікових режимів;
- перевірки здатності ВДЕ покривати максимальні навантаження.

2.3. Динамічний аналіз ВДЕ, для кожного часового кроку:

$$n_R^E(t) = \frac{Q_R(t)}{Q_d(t)}, \quad (4.12)$$

де $Q_R(t)$ – теплова потужність або теплова енергія, вироблена відновлюваними джерелами у момент часу t ;

$Q_d(t)$ – поточне теплове навантаження (попит) споживачів у той самий момент часу, t .

Цей підхід дозволяє:

- виявити періоди надлишкової генерації ВДЕ;
- ідентифікувати часові зони залежності від викопних джерел;
- оцінити ефективність акумулювання.

3. Вплив акумуляції на частку ВДЕ.

Запровадження теплових акумуляторів змінює фактичну частку використаної ВДЕ, але не встановлену потужність:

$$n_R^{ef} = \frac{Q_{R(реал)}}{Q_{tot}}, \quad (4.13)$$

де $Q_{R(реал)}$ – реально використана, а не згенерована енергія ВДЕ;

Q_{tot} – загальна теплова енергія, спожита системою.

4. Структурний аналіз теплового балансу.

Рекомендується виконувати розподіл балансу за:

- джерелами;
- сезонами (зима / міжсезоння / літо);
- рівнями температур (високотемпературний / низькотемпературний

контур).

Це дозволяє:

- виявити термодинамічні обмеження ВДЕ;
- коректно оцінити потенціал сонячних і геотермальних джерел.

5. Критичні аспекти інтерпретації.

При аналізі частки ВДЕ необхідно враховувати:

- різницю між генерованою та спожитою енергією;
- вплив допоміжного електроспоживання;
- реальні експлуатаційні режими;
- обмеження температурного графіка мережі.

Аналіз частки ВДЕ в тепловому балансі:

- є ключовим інструментом обґрунтування технічних рішень;
- дозволяє перейти від формальної інтеграції ВДЕ до реальної

декарбонізації;

- є необхідним етапом проектування систем 4–5 покоління теплопостачання.

4.3 Оцінка впливу на викиди CO₂

Оцінка впливу на викиди CO₂ є невід’ємною складовою аналізу ефективності систем теплопостачання з інтеграцією відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та використовується для обґрунтування технічних рішень, оцінки екологічних переваг і відповідності стратегічним цілям декарбонізації. Методологічно оцінка базується на порівнянні базового (референтного) варіанта системи теплопостачання, у якому тепла енергія виробляється з викопного палива, з альтернативним варіантом, що передбачає часткове або повне заміщення цього палива ВДЕ.

Кількісна оцінка річних викидів CO₂ визначається через добуток обсягу виробленої теплової енергії на питомий коефіцієнт викидів відповідного енергоносія. Для референтної системи загальні річні викиди обчислюються як сума викидів від усіх викопних джерел тепла з урахуванням їх фактичного виробітку. Для системи з ВДЕ враховується зменшення обсягу теплової енергії, що виробляється з викопного палива, а також додаткові непрямі викиди,

пов'язані зі споживанням електроенергії (наприклад, для роботи теплових насосів), які оцінюються за вуглецевою інтенсивністю електроенергетичного міксу.

Скорочення викидів CO₂ визначається як різниця між викидами референтного варіанта та викидами модернізованої системи з ВДЕ. Цей показник може бути поданий як у абсолютному вираженні (кг або т CO₂ на рік), так і у відносному – у відсотках від базового рівня. Для коректної інтерпретації результатів важливо враховувати, що біомаса зазвичай розглядається як умовно вуглецево нейтральне паливо, проте в практичних оцінках доцільно враховувати викиди, пов'язані з її заготівлею, транспортуванням і підготовкою. Аналогічно, для теплових насосів ключовим фактором є не лише коефіцієнт перетворення, а й структура виробництва електроенергії в енергосистемі.

Отримані результати дозволяють зробити висновок щодо екологічної доцільності впровадження ВДЕ, визначити ефективність конкретної конфігурації системи теплопостачання та порівняти різні сценарії розвитку. У практиці проєктування та наукових досліджень оцінка впливу на викиди CO₂ використовується як один з ключових критеріїв разом з економічними та енергетичними показниками, забезпечуючи комплексний підхід до аналізу сталого розвитку систем теплопостачання.

Завдання до практичного заняття 4

Варіант 1.

Інтеграція сонячних теплових колекторів.

Система теплопостачання житлового будинку має річне теплове споживання 1 200 МВт · год. Планується встановлення сонячної теплової установки площею 350 м². Середньорічна питома корисна теплова продуктивність колекторів становить 480 кВт · год/м². Тепло з традиційної котельні виробляється на природному газі з питомими викидами 0,202 т CO₂/МВт · год.

Завдання:

- 1) визначити річний обсяг теплової енергії від сонячних колекторів;
- 2) розрахувати частку ВДЕ в тепловому балансі;
- 3) оцінити річне скорочення викидів CO₂.

Варіант 2.

Використання біомаси в котельні.

Теплопостачальна система споживає $2\,500 \text{ МВт} \cdot \text{год/рік}$ теплової енергії. Частину навантаження покриває біомасова котельня потужністю 500 кВт , що працює $3\,200 \text{ год/рік}$. ККД котельні становить 85% . Альтернативне джерело тепла – вугільна котельня з питомими викидами $0,34 \text{ т CO}_2/\text{МВт} \cdot \text{год}$.

Завдання:

- 1) визначити річний обсяг тепла, виробленого з біомаси;
- 2) обчислити частку ВДЕ в тепловому балансі;
- 3) визначити скорочення викидів CO_2 .

Варіант 3.

Геотермальна тепла система.

Адміністративна будівля має річну потребу в теплі $900 \text{ МВт} \cdot \text{год}$. Встановлюється геотермальний тепловий насос з тепловою потужністю 120 кВт та коефіцієнтом перетворення $\text{COP} = 4,0$. Річний час роботи – $2\,200 \text{ год}$. Традиційним джерелом тепла є газова котельня з питомими викидами $0,202 \text{ т CO}_2/\text{МВт} \cdot \text{год}$.

Завдання:

- 1) визначити річний тепловий виробіток геотермальної системи;
- 2) знайти частку ВДЕ в тепловому балансі;
- 3) оцінити зменшення викидів CO_2 .

Варіант 4.

Комбінована система: сонячні колектори + біомаса.

Річне теплове навантаження системи становить $3\,000 \text{ МВт} \cdot \text{год}$. Сонячна тепла установка площею 250 м^2 має питому продуктивність $500 \text{ кВт} \cdot \text{год/м}^2 \cdot \text{рік}$. Біомасова котельня виробляє $900 \text{ МВт} \cdot \text{год/рік}$. Решта тепла покривається газовою котельнею з питомими викидами $0,202 \text{ т CO}_2/\text{МВт} \cdot \text{год}$.

Завдання:

- 1) визначити загальний обсяг тепла з ВДЕ;
- 2) розрахувати частку ВДЕ у тепловому балансі;
- 3) оцінити скорочення викидів CO_2 порівняно з повністю газовою системою.

Варіант 5.

Порівняльний аналіз сценаріїв.

Теплоспоживання мікрорайону становить $5\,000 \text{ МВт} \cdot \text{год/рік}$.

Розглядаються два сценарії:

- сценарій А: сонячні колектори (400 м^2 , $470 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2 \cdot \text{рік}$) + газова котельня;
- сценарій Б: біомасова котельня ($1\,600 \text{ МВт} \cdot \text{год}/\text{рік}$) + геотермальний тепловий насос ($800 \text{ МВт} \cdot \text{год}/\text{рік}$).

Питомі викиди газової котельні – $0,202 \text{ т CO}_2/\text{МВт} \cdot \text{год}$.

Завдання:

- 1) визначити частку ВДЕ для кожного сценарію;
- 2) порівняти річні викиди CO_2 ;
- 3) зробити висновок щодо екологічної ефективності сценаріїв.

5 СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Мета заняття: формування у здобувачів системного розуміння сучасних технологій акумулювання теплової енергії та набуття практичних навичок їхнього розрахунку й аналізу. Заняття спрямоване на ознайомлення з різними типами акумуляторів тепла (TES, PTES, BTES), розвиток умінь визначати оптимальні параметри об'ємів і температурних режимів, а також на формування здатності оцінювати економічну доцільність впровадження таких систем у енергетичних та будівельних проєктах.

Теоретичні положення. Практичне заняття охоплює базові принципи функціонування систем акумулювання теплової енергії та їх класифікацію на сенсильні, латентні й термохімічні. Розглядаються особливості короткострокових акумуляторів, що забезпечують добове балансування теплових навантажень, та довгострокових систем сезонного зберігання тепла, таких як PTES і BTES. Теоретичною основою є рівняння теплового балансу, яке визначає кількість накопиченої енергії залежно від маси теплоносія, його теплоємності та різниці температур.

Окремо аналізуються критерії вибору оптимальних об'ємів і температурних режимів: врахування добових і сезонних потреб у теплі, теплових втрат при зберіганні, геологічних умов для BTES, а також вплив робочих температур на ефективність теплових насосів і загальний коефіцієнт корисної дії системи.

Завершальна частина присвячена економічному аналізу: оцінці капітальних та експлуатаційних витрат, застосуванню показників LCOE, NPV, IRR, а також врахуванню екологічних і соціальних ефектів, зокрема зменшенню викидів CO_2 та підвищенню енергонезалежності.

5.1 Розрахунок коротко- та довгострокових акумуляторів (TES, PTES, BTES)

Мета: формування у здобувачів умінь виконувати інженерні розрахунки систем теплового акумуляування, обґрунтовувати вибір типу акумулятора залежно від часових масштабів акумуляування, оцінювати енергетичну, теплотехнічну та системну ефективність TES, PTES та BTES, а також інтегрувати акумулятори в тепловий баланс систем теплопостачання четвертого та п'ятого покоління.

1. Класифікація теплових акумуляторів за часовим масштабом.

Короткострокові акумулятори (TES).

Тривалість зберігання: години – 1–2 доби.

Основне призначення:

- вирівнювання добових коливань навантаження;
- узгодження генерації ВДЕ та споживання.

Типові приклади: водяні баки-акумулятори, буферні ємності.

Довгострокові (сезонні) акумулятори.

Тривалість зберігання: тижні – місяці;

Основне призначення:

- перенесення тепла з літа в опалювальний сезон;
- підвищення частки ВДЕ.

Основні типи:

- PTES (Pit Thermal Energy Storage) – котлованні водяні акумулятори;
- BTES (Borehole Thermal Energy Storage) – свердловинні акумулятори у ґрунті.

Загальні принципи розрахунку теплових акумуляторів

Базове рівняння теплової ємності:

$$Q_{\text{ак}} = V \cdot c \cdot \rho \cdot \Delta T, \quad (5.1)$$

де $Q_{\text{ак}}$ – акумуляована теплова енергія;

V – об'єм акумулятора, м³;

c – питома теплоємність, кДж/(кг·К);

ρ – густина теплоакumuлюючого середовища, кг/м³;

ΔT – робочий температурний інтервал, К.

2. Розрахунок короткострокового TES (водяний акумулятор).

Потрібно забезпечити покриття пікового дефіциту тепла протягом часу τ .

2.1. Вихідні дані:

- дефіцит потужності $Q_{\text{деф}}$, кВт;
- тривалість покриття τ , год;
- температурний діапазон ΔT .

2.2. Визначаємо необхідну енергоємність:

$$Q_{\text{ак}} = Q_{\text{деф}} \cdot \tau. \quad (5.2)$$

2.3. Знаходимо необхідний об'єм акумулятора:

$$V = \frac{Q_{\text{ак}}}{c \cdot \rho \cdot \Delta T}. \quad (5.3)$$

2.4. Перевірка температурного графіка мережі та допустимого перегріву.

2.5. Особливості TES:

- висока швидкість заряд / розряд;
- низькі питомі втрати;
- обмежена економічна доцільність для сезонного зберігання.

3. Розрахунок котлованного акумулятора PTES¹.

3.1. Теплова енергоємність визначається за формулою 5.1. Робочий температурний інтервал знаходиться у межах $T_{\text{макс}}=80\div95$ °С, а $T_{\text{мін}}=30\div40$ °С.

3.2. Середні теплові втрати:

$$Q_{\text{втр}} = U \cdot A \cdot (T_{\text{сер}} - T_o) \cdot t, \quad (5.4)$$

де U – коефіцієнт теплопередачі огорожень акумулятора, Вт/(м² · К);

A – площа конструкції огорожень акумулятора, м²;

$T_{\text{сер}}$ – середня температура теплоакумуючого середовища, К;

T_o – температура навколишнього середовища, К;

t – тривалість періоду тепловтрат.

Тривалість періоду тепловтрат вибирається відповідно до інтервалу аналізу: добового, місячного, сезонного.

3.3 ККД сезонного зберігання:

$$\eta_{\text{сез}} = \frac{Q_{\text{к}}}{Q_{\text{з}}}, \quad (5.5)$$

¹ PTES — це великооб'ємний теплоізований резервуар (десятки – сотні тисяч м³), заповнений водою, зазвичай заглиблений у ґрунт.

де Q_k – корисно віддана (розряджена) теплова енергія за сезон;
 Q_3 – теплова енергія, подана на заряд акумулятора за той самий сезон.
 Типові значення 70–90 % для сучасних PTES.

4. Розрахунок свердловинного акумулятора BTES².

4.1. Спрощений вигляд оцінки акумульованої енергії:

$$Q_{ак} = V_{гр} \cdot c_{гр} \cdot \rho_{гр} \cdot \Delta T_{гр}, \quad (5.6)$$

де $Q_{ак}$ – акумульована теплова енергія;
 $V_{гр}$ – ефективний об'єм ґрунту, м³;
 $c_{гр}$ – теплоємність ґрунту, кДж/(кг · К);
 $\rho_{гр}$ – щільність ґрунту, кг/м³;
 $\Delta T_{гр}$ – допустиме підвищення температури масиву, К.

4.2. BTES характеризується:

- значними початковими втратами;
- виходом на стабільний режим через 2–3 роки;
- сезонним ККД 50–70 %.

Порівняльний аналіз TES, PTES, BTES наведено у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Порівняльний аналіз TES, PTES, BTES

Показник	TES	PTES	BTES
Тривалість зберігання	Години – доба	Місяці	Місяці
Температурний рівень	Високий	Середній	Низький
Питомі втрати	Низькі	Середні	Низькі
Капітальні витрати	Низькі	Середні	Високі
Основне застосування	Балансування	Сонячні системи	STES + TH

Коротко- та довгострокові акумулятори теплової енергії є ключовими елементами сучасних систем теплопостачання, що дозволяють суттєво підвищити частку ВДЕ, зменшити пікові навантаження та забезпечити гнучкість роботи системи. Коректний розрахунок TES, PTES і BTES вимагає урахування часових масштабів акумулювання, температурного рівня, тепловтрат та інтеграції з іншими джерелами тепла.

² BTES використовує масив ґрунту або скельних порід як теплоакумульовальне середовище через систему вертикальних свердловин з теплообмінниками.

5.2 Вибір оптимальних об'ємів і температур акумуляторів

Мета: формування у здобувачів умінь здійснювати інженерний аналіз та обґрунтований вибір оптимальних об'ємів і температурних режимів акумуляторів теплової енергії з урахуванням добових і сезонних потреб споживачів, теплових втрат при зберіганні, ефективності роботи теплових насосів та інтеграції систем TES, PTES і BTES у сучасні теплопостачальні комплекси четвертого та п'ятого покоління.

Мета вибору об'єму V та робочого температурного рівня T акумулятора полягає не в максимізації запасеної енергії, а у мінімізації сумарних приведених витрат за умови забезпечення заданого теплового навантаження.

Оптимізація виконується з урахуванням:

- динаміки теплового попиту;
- джерел заряджання (ВДЕ, скидне тепло);
- обмежень на температурні режими мережі;
- допустимих тепловтрат і деградації температури.

1. Критерії оптимальності.

1.1. Мінімум питомих втрат енергії:

$$f = \frac{Q_{\text{втр}}}{Q_{\text{ак}}} \rightarrow \min. \quad (5.7)$$

Де збільшення об'єму зменшує відносні втрати, але підвищує капітальні витрати.

1.2. Температурна сумісність із системою.

Робочий температурний діапазон акумулятора має:

- забезпечувати передачу тепла без додаткових підвищувальних контурів;
- не перевищувати допустимі температури ізоляції та ґрунту (для PTES, BTES).

1.3 Мінімум ексергетичних втрат.

Оптимальний вибір температури пов'язаний з мінімізацією ексергетичних втрат:

$$E_x \sim Q \cdot \left(1 - \frac{T_o}{T}\right), \quad (5.8)$$

де Q – кількість переданої або накопиченої теплової енергії;

T_o – абсолютна температура навколишнього середовища, К;

T – абсолютна температура джерела тепла або акумулятора, К.

Завищена температура знижує ексергетичну ефективність системи.

2. Вибір оптимального об'єму акумулятора.

2.1. Принцип масштабного ефекту.

Зі збільшенням об'єму:

- запас енергії зростає пропорційно V ;
- площа тепловтрат зростає приблизно пропорційно $V^{2/3}$.

2.2. Орієнтація на тривалість покриття навантаження.

Об'єм вибирається з умови покриття:

- TES → 6–48 годин;
- PTES → 1–4 місяці;
- BTES → 3–6 місяців.

Перевищення цих значень різко знижує економічну доцільність.

3. Оптимальний температурний рівень.

3.1. Верхня межа температури.

Обмежується:

- стійкістю ізоляції;
- температурною стабільністю ґрунту;
- вимогами екологічної безпеки.

Типові межі:

- TES: 90–95 °C;
- PTES: 80–90 °C;
- BTES: 60–75 °C.

3.2. Нижня межа температури.

Визначається:

- мінімально допустимою температурою подачі;
- ефективністю теплообміну;
- температурою зворотної мережі.

Занадто низька температура призводить до:

- недовикористання об'єму;
- зростання втрат при відборі.

Практика показує, що збільшення об'єму при зниженні температури часто ефективніше, ніж зменшення об'єму при підвищенні температури. Це особливо актуально для систем 4GDH і 5GDH.

4. Алгоритм інженерного вибору.

4.1. Задати профіль теплового навантаження.

4.2. Визначити допустимий температурний діапазон мережі.

4.3. Обрати попередній температурний рівень акумулятора.

4.4. Розрахувати необхідний об'єм для заданої тривалості покриття.

4.5. Оцінити тепловтрати та ексергетичні втрати.

4.6. Знайти мінімум сумарних витрат.

4.7. Перевірити сумісність із ВДЕ.

Оптимальний вибір об'єму і температури акумулятора є багатокритеріальною задачею, де енергетичний максимум не збігається з економічним або ексергетичним оптимумом.

5.3 Аналіз економічної доцільності

Мета: набуття навичок проведення економічного аналізу застосування систем акумуляування теплової енергії, що передбачає визначення та порівняння капітальних і експлуатаційних витрат, використання показників ефективності (LCOE, NPV, IRR), оцінку результативності TES, PTES та BTES з позицій вартості й енергетики, а також врахування екологічних та соціальних переваг їхнього впровадження у сучасні системи теплопостачання.

Економічна доцільність інтеграції теплових акумуляторів та відновлюваних джерел енергії оцінюється на основі аналізу життєвого циклу системи, а не лише за величиною початкових інвестицій. Ключовим завданням є визначення, чи забезпечує система з акумуляуванням зменшення приведеної вартості виробництва теплової енергії за весь період експлуатації з урахуванням сезонності, тепловтрат і змін тарифів на енергоносії. Основну частину капітальних витрат формують будівельні та монтажні роботи, теплоізоляція, системи заряджання та розряджання акумулятора, а також автоматизація, причому залежність вартості від об'єму акумулятора є нелінійною. Операційні витрати пов'язані з електроспоживанням насосного обладнання, технічним обслуговуванням, контролем стану ізоляції та компенсацією тепловтрат через використання заміщувальної енергії. Для кількісної оцінки економічної ефективності застосовують рівневу вартість тепла, дисконтований період окупності та аналіз чутливості до зміни цін на паливо й електроенергію. Важливу роль відіграє доходна складова, яка формується не лише шляхом економії палива, але й через зменшення пікових теплових навантажень, скорочення встановленої резервної потужності, зниження витрат на викиди CO₂ та можливість використання надлишкової енергії від ВДЕ. Зі збільшенням об'єму акумулятора питомі капітальні витрати зменшуються, однак загальний обсяг інвестицій зростає, що призводить до наявності економічного оптимуму, який, як правило, не збігається з максимальним енергетичним ефектом. У науково-практичному аспекті економічна доцільність теплових акумуляторів визначається їх здатністю

стабілізувати тепловий баланс системи, знизити залежність від коливань цін на енергоносії та забезпечити довгострокову фінансову й екологічну стійкість систем теплопостачання.

Завдання до практичного заняття 5

Варіант 1.

Короткостроковий водяний теплоаккумулятор (TES).

Система централізованого теплопостачання має добову нерівномірність теплового навантаження. Надлишкова теплова потужність у нічний період становить 0,8 МВт протягом 6 годин. Температура заряджання акумулятора 90 °С, температура розряджання 50 °С. Густина води – 1 000 кг/м³, питома теплоємність – 4,19 кДж/(кг · К).

Завдання:

- 1) визначити необхідну акумульовану теплову енергію;
- 2) розрахувати мінімальний об'єм водяного теплоаккумулятора;
- 3) оцінити доцільність використання короткострокового TES.

Варіант 2.

Довгостроковий басейновий акумулятор (PTES).

Для теплопостачання житлового району передбачається використання басейнового теплоаккумулятора для сезонного зберігання тепла від сонячних колекторів. Сумарна надлишкова теплова енергія за літній період становить 18 000 МВт · год. Робочий діапазон температур акумулятора – від 85 °С до 35 °С. ККД зберігання – 80 %.

Завдання:

- 1) визначити корисну кількість збереженої теплової енергії;
- 2) розрахувати необхідний об'єм PTES;
- 3) обґрунтувати вибір температурного режиму.

Варіант 3.

Ґрунтовий теплоаккумулятор (BTES).

Проектується ґрунтовий теплоаккумулятор для офісного комплексу. Річна потреба в акумульованій тепловій енергії становить 6 500 МВт·год. Ефективна теплоємність ґрунту – 2,3 МДж/(м³·К). Допустимий перепад температур ґрунту – 25 К. Сезонний коефіцієнт корисного використання – 70 %.

Завдання:

- 1) визначити корисну акумульовану енергію;
- 2) розрахувати необхідний об'єм ґрунтового масиву BTES;
- 3) оцінити вплив температурного діапазону на об'єм акумулятора.

Варіант 4.

Порівняльний вибір TES і PTES.

Потрібно акумулювати $4\,200\text{ МВт} \cdot \text{год}$ теплової енергії. Розглядаються два варіанти:

- TES: температурний діапазон $90/50\text{ }^{\circ}\text{C}$, ККД 95 %;
- PTES: температурний діапазон $80/30\text{ }^{\circ}\text{C}$, ККД 80 %.

Питома теплоємність води – $4,19\text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$.

Завдання:

- 1) розрахувати необхідний об'єм акумулятора для кожного варіанта;
- 2) порівняти отримані об'єми;
- 3) зробити висновок щодо доцільності використання TES або PTES.

Варіант 5.

Оптимізація об'єму та температури акумулятора.

Система тепlopостачання потребує акумулювання $1\,500\text{ МВт} \cdot \text{год}$ теплової енергії. Розглядаються три температурні режими водяного TES:

- $90/60\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- $85/45\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- $75/40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Допустимий максимальний об'єм акумулятора – $18\,000\text{ м}^3$, ККД – 92 %.

Завдання:

- 1) визначити необхідний об'єм акумулятора для кожного режиму;
- 2) перевірити відповідність обмеженню за об'ємом;
- 3) обрати оптимальний температурний режим з технічного погляду.

6 ЗНИЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ВТРАТ У СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Мета заняття: формування у здобувачів поглибленого розуміння фізичних процесів теплових втрат у системах тепlopостачання, методів їх науково обґрунтованого визначення та принципів розроблення ефективних технічних і організаційних заходів з їх мінімізації з урахуванням енергетичних, економічних та експлуатаційних факторів.

Теоретичні положення. Практичне заняття базуються на фундаментальних законах теплопередачі, які визначають механізми втрат теплової енергії в елементах систем тепlopостачання. Розглядаються процеси теплопровідності через стінки трубопроводів і теплоізоляційні шари,

конвективного теплообміну між зовнішньою поверхнею труб і навколишнім середовищем, а також теплового випромінювання, що набуває значення при високих температурах теплоносія. Аналізується вплив конструктивних параметрів трубопроводів (діаметр, матеріал, товщина стінки), властивостей теплоізоляційних матеріалів (коефіцієнт теплопровідності, вологостійкість, старіння) та умов прокладання мереж (канальна, безканальна, надземна) на величину теплових втрат.

Окрему увагу приділено теоретичним моделям визначення лінійних і місцевих теплових втрат у теплових мережах, зокрема в місцях розміщення арматури, компенсаторів і теплових камер. Розглядаються методи розрахунку теплових втрат у стаціонарних і нестаціонарних режимах роботи, а також вплив гідравлічних і температурних режимів системи на інтенсивність втрат. Теоретичні положення доповнюються принципами енергетичного аналізу систем тепlopостачання, що дозволяють оцінювати ефективність існуючих мереж і визначати потенціал їх модернізації.

Важливою складовою теоретичної частини є концепція енергоефективності та системного підходу до зниження теплових втрат, яка передбачає комплексне поєднання технічних рішень (модернізація мереж, впровадження сучасної теплоізоляції, автоматизація режимів) з організаційними та експлуатаційними заходами. Розглядаються методи техніко-економічного обґрунтування заходів, оцінювання енергетичного, екологічного та економічного ефекту, визначення терміну окупності та ролі зниження теплових втрат у підвищенні надійності та сталості функціонування систем тепlopостачання.

6.1 Аналіз і розрахунок теплових втрат у теплових мережах

Мета: формування у здобувачів уміння кількісно оцінювати теплові втрати в теплових мережах різних типів, застосовувати аналітичні та нормативні методи розрахунку, аналізувати вплив конструктивних, експлуатаційних і кліматичних чинників, а також використовувати результати розрахунків для оптимізації та модернізації мереж.

1. Класифікація теплових втрат у теплових мережах.

1.1. За фізичною природою:

- провідникові втрати – теплопередача крізь стінки труб та ізоляцію;
- конвективні втрати – теплообмін між зовнішньою поверхнею трубопроводу та повітрям або ґрунтом;

- радіаційні втрати – теплове випромінювання з поверхні труб (істотні для надземних мереж).

1.2. За умовами прокладання:

- надземні тепломережі;
- підземні каналні;
- підземні безканалні.

1.3. За експлуатаційним станом:

- нормативні втрати;
- додаткові втрати (зволоження ізоляції, деградація матеріалів, порушення гідравлічного режиму).

2. Теоретичні основи теплового балансу ділянки тепломережі.

Теплові втрати на ділянці трубопроводу довжиною L визначаються з рівняння теплового балансу:

$$Q_{\text{втр}} = G \cdot c \cdot (T_{\text{вх}} - T_{\text{вих}}), \quad (6.1)$$

де G – масова витрата теплоносія, кг/с;

c – питома теплоємність теплоносія, Дж/(кг · К);

$T_{\text{вх}}$ – температура теплоносія на вході ділянки, К;

$T_{\text{вих}}$ – температура теплоносія на виході ділянки, К.

Цей підхід застосовується для:

- аналізу фактичних втрат за результатами вимірювань;
- калібрування розрахункових моделей.

3. Розрахунок теплових втрат через ізоляцію трубопроводу.

3.1. Лінійні теплові втрати.

Для стаціонарного режиму теплопередачі:

$$q = \frac{2\pi(T - T_0)}{\frac{1}{\lambda_{\text{із}}} \ln\left(\frac{d_3}{d_{\text{н}}}\right) + \frac{1}{\alpha_3 \cdot d_3}}, \quad (6.2)$$

де q – питомі теплові втрати, Вт/м;

T – температура теплоносія;

T_0 – температура навколишнього середовища;

$\lambda_{\text{із}}$ – коефіцієнт теплопровідності теплової ізоляції;

d_3 – зовнішній діаметр теплової ізоляції;

$d_{\text{н}}$ – зовнішній діаметр трубопроводу;

α_3 – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні.

3.2. Врахування багатошарової ізоляції.

Для n шарів ізоляції:

$$R_{iz} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln\left(\frac{d_{iz}}{d_i}\right), \quad (6.3)$$

де R_{iz} – сумарний тепловий опір ізоляції, (м · К)/Вт;

λ_i – коефіцієнт теплопровідності i -го шару теплової ізоляції, Вт/(м · К);

d_{iz} – зовнішній діаметр i -го шару теплової ізоляції, м;

d_i – внутрішній діаметр i -го шару теплової ізоляції, м.

4. Особливості розрахунку для підземних тепломереж.

4.1. Теплопередача в ґрунт:

- урахування коефіцієнта теплопровідності ґрунту;
- вплив глибини залягання;
- взаємний тепловий вплив подавального та зворотного трубопроводів.

4.2. Поправочні коефіцієнти:

- сезонні коливання температури ґрунту;
- зволоження каналу або ізоляції;
- щільність укладання труб.

5. Нормативний та фактичний підходи до оцінки втрат.

5.1. Нормативний підхід:

- використання питомих теплових втрат за довідковими таблицями;
- швидка оцінка на етапі техніко-економічного аналізу;
- обмежена точність.

5.2 Фактичний (експериментально-розрахунковий) підхід:

- температурні вимірювання;
- тепловий баланс мережі;
- застосування SCADA та цифрових моделей.

6. Приклад розрахунку лінійних теплових втрат.

Вихідні дані:

Розглядається ділянка підземної теплової мережі з одношаровою теплоізоляцією (плити мінераловатні).

- температура теплоносія: 95 °С;
- температура ґрунту: 10 °С;
- зовнішній діаметр сталевих труб: 0,159 м;
- товщина теплової ізоляції: 0,05 м;
- загальний діаметр труби з урахуванням теплової ізоляції: 0,259 м;
- коефіцієнт теплопровідності теплової ізоляції: 0,045 Вт/(м · °С);
- коефіцієнт тепловіддачі до ґрунту: 8 Вт/(м² · °С);
- довжина ділянки: 200 м;
- теплова потужність: 1,2 МВт.

Задача: визначити питомі теплові втрати, теплові втрати на ділянці, відносні втрати теплової потужності.

Рішення:

6.1. Визначаємо опір теплової ізоляції:

$$R_{iz} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,045} \ln \left(\frac{0,259}{0,159} \right) = 1,72 \text{ (м} \cdot \text{°C)/Вт.}$$

6.2. Визначаємо опір теплопередачі з поверхні теплової ізоляції:

$$R_3 = \frac{1}{8 \cdot 3,14 \cdot 0,259} = 0,154 \text{ (м} \cdot \text{°C)/Вт.}$$

6.3. Визначаємо сумарний опір:

$$\Sigma R = 1,72 + 0,154 = 1,88 \text{ (м} \cdot \text{°C)/Вт.}$$

6.4. Визначаємо питомі теплові втрати:

$$q = \frac{95-10}{1,88} = 45,2 \text{ Вт/м.}$$

6.5. Теплові втрати на ділянці:

$$Q_{втр} = 200 \times 45,2 = 9\,040 \text{ Вт} = 9,04 \text{ кВт.}$$

6.6. Відносні теплові втрати:

$$\bar{Q}_{втр} = \frac{9,04}{1\,200} \cdot 100 \approx 0,75 \text{ \%}.$$

Розрахунок теплових втрат є ключовим інструментом:

- підвищення енергоефективності теплових мереж;
- обґрунтування реконструкції та заміни трубопроводів;
- переходу до систем тепlopостачання 4–5 поколінь з низькотемпературними режимами.

6.2 Сучасні технології та матеріали для зменшення теплових втрат

Мета: формування у здобувачів знань і практичних навичок щодо використання інноваційних матеріалів та конструкцій трубопроводів, сучасних технологій теплоізоляції й антикорозійного захисту, аналізу ефективності полімерних, композитних та багатошарових рішень, а також засвоєння методів оцінки й порівняння різних технологічних підходів з точки зору

енергоефективності та економічної доцільності, що дозволяє застосовувати результати досліджень і розрахунків для оптимізації, модернізації та підвищення надійності теплових мереж відповідно до сучасних європейських стандартів і вимог сталого розвитку.

1. Інтелектуальні теплоізоляційні системи.

1.1. Адаптивні ізоляційні матеріали.

Сучасні розробки передбачають матеріали зі змінними теплофізичними властивостями:

- фазозмінні матеріали (PCM), інтегровані в ізоляцію;
- зниження пікових теплових втрат під час температурних коливань;
- стабілізація температури поверхні труб.

Ефект: згладжування теплових потоків, зменшення динамічних втрат у змінних режимах роботи мереж.

2. Вакуумні теплоізоляційні панелі (VIP) для тепломереж.

2.1. Принцип дії.

VIP мають наднизьку теплопровідність завдяки:

- вакуумованому мікропористому ядру;
- герметичній оболонці з багат шарових бар'єрних матеріалів.

2.2. Застосування в теплових мережах.

- локальна ізоляція вузлів, компенсаторів, камер;
- реконструкція мереж в умовах обмеженого простору.

Перевага: у 5–8 разів менша теплопровідність порівняно з традиційною ізоляцією при однаковій товщині.

3. Аерогелеві ізоляційні матеріали.

3.1. Структурні особливості:

- нанопориста структура з пористістю $>90\%$;
- надзвичайно низька щільність;
- стабільність при високих температурах.

3.2. Практичні переваги:

- ефективна ізоляція труб малого діаметра;
- зменшення теплових втрат у надземних мережах;
- мінімальне збільшення габаритів трубопроводу.

4. Активні методи зменшення теплових втрат.

4.1. Підігрів зворотного трубопроводу тепловими насосами:

- використання втрат як джерела низькопотенційного тепла;
- інтеграція з тепловими насосами на ділянках з високими втратами;
- рекуперація енергії.

4.2. Керування температурними графіками:

- зниження температури теплоносія у періоди часткового навантаження;
- зменшення градієнта температур і теплових потоків;
- перехід до низькотемпературних режимів (4GDH).

5. Цифрові технології зменшення теплових втрат.

5.1. Розподілені системи моніторингу:

- волоконно-оптичні датчики температури вздовж трубопроводу;
- раннє виявлення зон підвищених втрат;
- локалізація дефектів ізоляції.

5.2. Цифрові двійники тепломереж:

- модельно-орієнтоване прогнозування теплових втрат;
- оптимізація режимів роботи в реальному часі;
- підтримка рішень щодо модернізації.

6. Конструктивні рішення нового покоління.

6.1. Модульні попередньоізольовані трубопроводи.

- заводська якість ізоляції та герметизації;
- мінімізація монтажних втрат;
- інтегровані системи контролю зволоження.

6.2. Композитні трубні матеріали:

- полімерні та гібридні труби з низькою теплопровідністю;
- зменшення теплових мостів;
- підвищена корозійна стійкість.

7. Приклад розрахунку лінійних теплових втрат при використанні попередньо ізольованих труб заводського виготовлення.

Вихідні дані (аналогічні з п. 6 розділу 6.1), але з врахуванням використання сталеві труби ППУ [34]:

- температура теплоносія: 95 °С;
- температура ґрунту: 10 °С;
- зовнішній діаметр сталеві труби: 0,159 м;
- товщина теплової ізоляції: 0,0455 м;
- загальний діаметр труби з урахуванням теплової ізоляції: 0,25 м;
- коефіцієнт теплопровідності теплової ізоляції: 0,027 Вт/(м·°С);
- коефіцієнт тепловіддачі до ґрунту: 8 Вт/(м²·°С);
- довжина ділянки: 200 м;
- теплова потужність: 1,2 МВт.

Задача: визначити питомі теплові втрати, теплові втрати на ділянці, відносні втрати теплової потужності.

Рішення:

7.1. Визначаємо опір теплової ізоляції:

$$R_{\text{із}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,027} \ln \left(\frac{0,25}{0,159} \right) = 2,67 \text{ (м} \cdot \text{°C)/Вт.}$$

7.2. Визначаємо опір теплопередачі з поверхні теплової ізоляції:

$$R_3 = \frac{1}{8 \cdot 3,14 \cdot 0,25} = 0,159 \text{ (м} \cdot \text{°C)/Вт.}$$

7.3. Визначаємо сумарний опір:

$$\Sigma R = 2,67 + 0,159 = 2,83 \text{ (м} \cdot \text{°C)/Вт.}$$

7.4. Визначаємо питомі теплові втрати:

$$q = \frac{95-10}{2,83} = 30,04 \text{ Вт/м.}$$

7.5. Теплові втрати на ділянці:

$$Q_{\text{втр}} = 200 \times 30,04 = 6\,008 \text{ Вт} = 6,01 \text{ кВт.}$$

7.6. Відносні теплові втрати:

$$\bar{Q}_{\text{втр}} = \frac{6,01}{1\,200} \cdot 100 \approx 0,5 \text{ \%}.$$

Отже, використання труб ППУ заводського виготовлення знижує теплові втрати 33,5 %. Порівняльна діаграма теплових втрат при використанні звичайної теплової ізоляції (плити мінераловатні) та труб у пінополіуретанової теплової ізоляції наведена на рисунку 6.1.

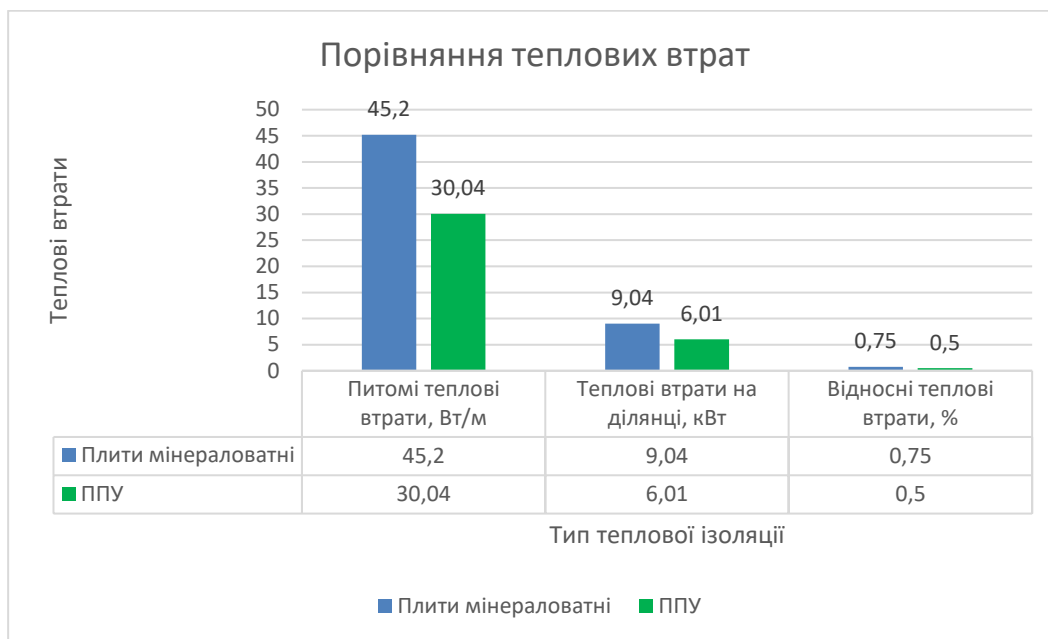


Рисунок 6.1 – Порівняльна діаграма теплових втрат при використанні звичайної теплової ізоляції (плити мінераловатні) та труб у пінополіуретанової теплової ізоляції

8. Урбаністичні та системні підходи.

8.1. Оптимізація трасування тепломереж:

- скорочення довжини мереж;
- децентралізація джерел тепла;
- інтеграція з локальними акумуляторами тепла.

8.2. Синергія з будівельними системами:

- інтеграція тепломереж у теплові оболонки будівель;
- використання підземних теплових коридорів;
- спільне зниження втрат у мережі та споживача.

Сучасні підходи до зменшення теплових втрат у теплових мережах істотно виходять за межі традиційного уявлення про теплоізоляцію як єдиний інструмент підвищення енергоефективності. Вони ґрунтуються на поєднанні інноваційних матеріалів із заданими або адаптивними теплофізичними властивостями, застосуванні активних методів рекуперації низькопотенційного тепла та впровадженні цифрових технологій моніторингу й управління. Використання інтелектуальних систем контролю стану мережі, цифрових двійників і оптимізованих температурних режимів дозволяє не лише зменшувати поточні теплові втрати, а й прогнозувати їх виникнення та локалізувати проблемні ділянки на ранніх етапах. У поєднанні з модульними попередньоізольованими трубопроводами, новими композитними матеріалами

та раціональним трасуванням мереж це забезпечує системну інтеграцію теплопостачання в міське енергетичне середовище та створює передумови для переходу до низькотемпературних, керованих і стійких систем теплопостачання нового покоління.

6.3 Оцінка енергоефективності та економічної доцільності заходів зі зниження теплових втрат

Мета: здобувач повинен вміти оцінювати енергоефективність заходів зі зниження теплових втрат як інструмент переходу від інтуїтивних або суто нормативних рішень до науково обґрунтованого інвестиційного та експлуатаційного управління, що забезпечує кількісне зіставлення технічних результатів (зменшення теплових втрат, стабілізація режимів роботи, підвищення надійності системи) з економічними наслідками (обсяг інвестицій, експлуатаційні витрати та рівень ризиків).

1. Базові показники енергоефективності теплових мереж.

1.1. Інтегральні енергетичні індикатори:

- питома втрата теплової енергії на одиницю довжини мережі або одиницю переданої енергії;
- коефіцієнт корисного використання теплової енергії мережі, що відображає частку тепла, доставлену споживачам;
- енергетична інтенсивність транспортування тепла, яка дозволяє порівнювати мережі різної конфігурації та масштабу.

1.2. Динамічні показники:

- сезонна та добова мінливість втрат;
- залежність втрат від температурного графіка та завантаження;
- чутливість енергоефективності до деградації ізоляції.

2. Методологія оцінки енергетичного ефекту заходів.

2.1. Принцип «базового сценарію».

Енергетичний ефект визначається не в абсолютних величинах, а як різниця між:

- базовим сценарієм (без впровадження заходу);
- модернізованим сценарієм.

Такий підхід дозволяє коректно врахувати:

- кліматичні коливання;
- зміну попиту;
- вплив суміжних технічних рішень.

2.2. Нормалізація результатів:

- приведення теплових втрат до стандартного кліматичного року;
- урахування тривалості та структури опалювального періоду;
- виключення ефектів, не пов'язаних безпосередньо з заходом.

3. Економічна оцінка заходів зі зниження теплових втрат.

3.1. Структура витрат:

- капітальні витрати (матеріали, монтаж, проектування);
- експлуатаційні витрати (обслуговування, ремонт, моніторинг);
- витрати на зупинку або обмеження теплопостачання;
- витрати, пов'язані з ризиками та невизначеністю.

3.2. Структура економічного ефекту:

- зменшення витрат на виробництво тепла;
- зниження споживання палива та електроенергії;
- подовження строку служби мережі;
- зменшення аварійності та штрафних санкцій;
- непрямі вигоди (екологічні, соціальні, регуляторні).

4. Інструменти економічної доцільності.

4.1. Класичні показники:

- простий та дисконтований термін окупності;
- чиста приведена вартість (NPV);
- внутрішня норма дохідності (IRR).

4.2. Життєвий цикл (LCC):

Оцінка на основі вартості життєвого циклу дозволяє:

- порівнювати альтернативні технології з різними строками служби;
- враховувати майбутні витрати на заміну або утилізацію;
- уникати помилок, пов'язаних з мінімізацією початкових інвестицій.

5. Багатокритеріальна оцінка ефективності.

Зниження теплових втрат часто має некомерційні ефекти, які неможливо адекватно оцінити лише фінансовими показниками. Тому застосовують:

- багатокритеріальні моделі ухвалення рішень;
- зважування технічних, економічних, екологічних та соціальних критеріїв;

- ранжування альтернативних заходів за інтегральним показником.

6. Аналіз ризиків і невизначеностей.

6.1. Технічні ризики:

- відхилення фактичних теплових втрат від розрахункових;
- деградація матеріалів;
- помилки монтажу.

6.2. Економічні та регуляторні ризики:

- зміна тарифів на тепло та енергоносії;
- інфляційні процеси;
- зміни нормативної бази.

Для їхнього урахування застосовують:

- сценарний аналіз;
- аналіз чутливості;
- імовірнісні моделі.

7. Верифікація досягнутого ефекту.

7.1. Післяпроектний моніторинг:

- порівняння прогнозованих і фактичних результатів;
- коригування моделей;
- підтвердження економічної ефективності.

7.2. Стандартизовані підходи:

- протоколи вимірювання та верифікації енергетичних заощаджень;
- інтеграція результатів у системи енергоменеджменту.

Оцінка енергоефективності та економічної доцільності заходів зі зниження теплових втрат є ключовим елементом сучасного управління тепловими мережами, що забезпечує раціональний вибір технічних рішень на основі повного життєвого циклу, урахування ризиків та багатокритеріальних ефектів. Саме такий підхід створює основу для сталого розвитку теплопостачання та переходу до високоефективних низьковуглецевих енергетичних систем.

Завдання до практичного заняття 6

Варіант 1.

Розрахувати лінійні теплові втрати ділянки теплопроводу довжиною 120 м, якщо зовнішній діаметр ізолюваної труби становить 0,325 м, середня температура теплоносія дорівнює 95 °С, температура навколишнього середовища – 5 °С, а приведений коефіцієнт тепловіддачі становить 0,85 Вт/(м² · К). Визначити сумарні теплові втрати ділянки та питомі теплові втрати на 1 м трубопроводу.

Варіант 2.

Визначити річну економію теплової енергії при заміні теплоізоляції трубопроводу довжиною 80 м, якщо при температурі теплоносія 110 °С та температурі ґрунту 10 °С питомі теплові втрати для існуючої ізоляції

становлять 42 Вт/м, а для нової – 18 Вт/м. Тривалість опалювального періоду прийняти рівною 4 500 год/рік.

Варіант 3.

Оцінити додаткові теплові втрати, що виникають унаслідок зволоження теплоізоляції, якщо питомі теплові втрати сухої ізоляції становлять 25 Вт/м, при зволоженні вони зростають на 35 %, а довжина теплової мережі дорівнює 200 м. Визначити додаткові втрати теплової потужності в ватах і кіловатах.

Варіант 4.

Розрахувати річний економічний ефект від зниження теплових втрат у системі теплопостачання, якщо річне скорочення втрат теплової енергії становить 180 МВт·год, а тариф на теплову енергію дорівнює 1 900 грн/МВт · год.

Варіант 5.

Визначити простий термін окупності заходів з модернізації теплової мережі, якщо капітальні витрати становлять 2,4 млн грн, річна економія коштів від зниження теплових втрат – 520 тис. грн, а додаткові експлуатаційні витрати – 40 тис. грн на рік, та зробити висновок щодо економічної доцільності впровадження заходів.

7 ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Мета заняття: формування у здобувачів системного наукового розуміння сучасних підходів до підвищення екологічної безпеки та енергоефективності систем теплопостачання, набуття навичок аналізу екологічних і енергетичних показників теплових систем, а також опрацювання методів обґрунтування технічних і організаційних рішень щодо зниження негативного впливу теплопостачання на довкілля та підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів.

Теоретичні положення. Підвищення екологічної безпеки та енергоефективності теплопостачання є одним із ключових напрямів сталого розвитку енергетичних систем і передбачає комплексний науково обґрунтований підхід до функціонування систем «джерело тепла – тепла мережа – споживач». Системи теплопостачання мають суттєвий вплив на довкілля через споживання первинних паливно-енергетичних ресурсів, викиди парникових газів і забруднюючих речовин, а також значні теплові втрати на

етапах генерації та транспортування теплової енергії. Енергоефективність теплопостачання визначається рівнем раціонального використання енергоресурсів і характеризується коефіцієнтом корисної дії теплогенеруючого обладнання, питомими витратами палива, величиною втрат у теплових мережах і ефективністю кінцевого споживання тепла. Екологічна безпека систем теплопостачання полягає у зменшенні негативного впливу на атмосферне повітря, водні та земельні ресурси шляхом впровадження маловідходних і низьковуглецевих технологій, оптимізації режимів роботи обладнання та дотримання екологічних нормативів. Теоретично обґрунтованими напрямками підвищення ефективності є модернізація джерел тепла, застосування когенераційних установок, теплових насосів і відновлюваних джерел енергії, зниження теплових втрат у мережах шляхом термомодернізації та автоматизації, а також підвищення енергоефективності будівель і систем споживання тепла. Реалізація цих заходів базується на принципах системності, енергозбереження, екологічної відповідальності та відповідності сучасним нормативно-правовим вимогам у сфері енергоефективності й охорони довкілля.

7.1 Оцінювання екологічних показників систем теплопостачання

Мета: здатність здійснювати кількісне та якісне оцінювання екологічних показників систем теплопостачання, аналізувати їхній вплив на довкілля та обґрунтовувати інженерні й наукові рішення щодо підвищення екологічної та енергетичної ефективності теплопостачальних систем з урахуванням принципів сталого розвитку та декарбонізації.

Оцінювання екологічних показників систем теплопостачання є важливою складовою аналізу їх ефективності, сталості та відповідності сучасним вимогам енергетичного переходу й екологічної безпеки. Для аспірантів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» таке оцінювання має комплексний характер і поєднує інженерні розрахунки з еколого-аналітичним підходом, що дозволяє ухвалювати обґрунтовані рішення щодо вибору та модернізації теплопостачальних систем.

Екологічні показники систем теплопостачання характеризують рівень негативного впливу на навколишнє середовище в процесі виробництва, транспортування та споживання теплової енергії, а також, у розширеному підході, протягом усього життєвого циклу обладнання. Основними джерелами екологічного навантаження є спалювання викопного палива, втрати теплової енергії в мережах, низька ефективність обладнання та використання електроенергії з високим вуглецевим інтенсивом.

Основну групу екологічних показників становлять показники викидів забруднюючих речовин в атмосферу. До них належать викиди діоксиду вуглецю як головного парникового газу, а також оксидів азоту, оксиду вуглецю, діоксиду сірки та твердих часток. Для інженерного аналізу використовують питомі показники викидів, віднесені до одиниці виробленої теплової енергії, що дає змогу порівнювати різні технологічні рішення незалежно від їх потужності.

Другу важливу групу становлять енергетично-екологічні показники, які відображають ефективність використання первинних енергоресурсів і безпосередньо пов'язані з рівнем викидів. До них належать коефіцієнт корисного використання палива, питомі витрати первинної енергії на виробництво тепла, а також частка відновлюваних джерел енергії в структурі теплопостачання. Підвищення цих показників є ключовим шляхом зниження негативного впливу систем теплопостачання на довкілля.

Важливе значення для наукових досліджень мають інтегральні екологічні показники, зокрема вуглецевий слід системи теплопостачання. Він визначається як сукупність прямих і непрямих викидів парникових газів протягом життєвого циклу системи, включаючи етапи виробництва обладнання, будівництва теплових мереж, експлуатації та утилізації. Такий підхід дозволяє обґрунтовано порівнювати традиційні та інноваційні системи теплопостачання.

Приклад оцінювання екологічних показників локальної газової котельні, що забезпечує теплопостачання житлового будинку, та її порівняння з альтернативним варіантом — системою теплопостачання на основі теплового насоса.

Вихідні дані:

- річна потреба в тепловій енергії будівлі: $1\,000\text{ МВт} \cdot \text{год} = 3\,600\text{ ГДж}$;
- тип палива для базового варіанту: природний газ;
- ККД газової котельні: 90 %;
- нижча теплота згоряння природного газу: 34 МДж/м^3 ;
- коефіцієнт викидів CO_2 для природного газу: $56\text{ кг}(\text{CO}_2)/\text{ГДж}$;
- COP теплового насоса: 3,5;
- коефіцієнт викидів CO_2 при виробництві електроенергії: $40\text{ кг}(\text{CO}_2)/\text{ГДж}$.

Рішення:

1. Знаходимо річну потребу в первинній енергії:

$$Q = \frac{3\,600}{0,9} = 4\,000\text{ ГДж}.$$

2. Знаходимо річну витрату природного газу:

$$B = \frac{4\,000}{34} \cdot 10^3 = 117\,650 \text{ м}^3.$$

3. Визначаємо річні викиди CO₂:

$$M_{CO_2} = 4\,000 \times 56 = 224\,000 \text{ кг(CO}_2\text{)/рік.}$$

4. Визначаємо питомі викиди CO₂:

$$m_{CO_2} = \frac{224\,000}{3\,600} = 62,2 \text{ кг(CO}_2\text{)/ГДж.}$$

5. Знаходимо річне споживання електроенергії при роботі теплового насоса:

$$E_{el} = \frac{3\,600}{3,5} = 1\,030 \text{ ГДж}^3.$$

6. Визначаємо річні викиди CO₂ при роботі теплового насоса:

$$M_{CO_2}^{TH} = 1\,030 \times 40 = 41\,200 \text{ кг(CO}_2\text{)/рік.}$$

7. Зниження викидів CO₂: $\Delta M_{CO_2} = 183 \text{ т/рік}$ або 82 %.

Порівняльна діаграма викидів CO₂ за умов роботи газової котельні та теплового насоса наведена на рисунку 7.1.

³ ГДж — це одиниця енергії, а не виду енергії. Тому: теплова енергія; електрична енергія; хімічна енергія палива можуть бути виражені в одних і тих самих енергетичних одиницях, зокрема в джоулях або гігаджоулях.

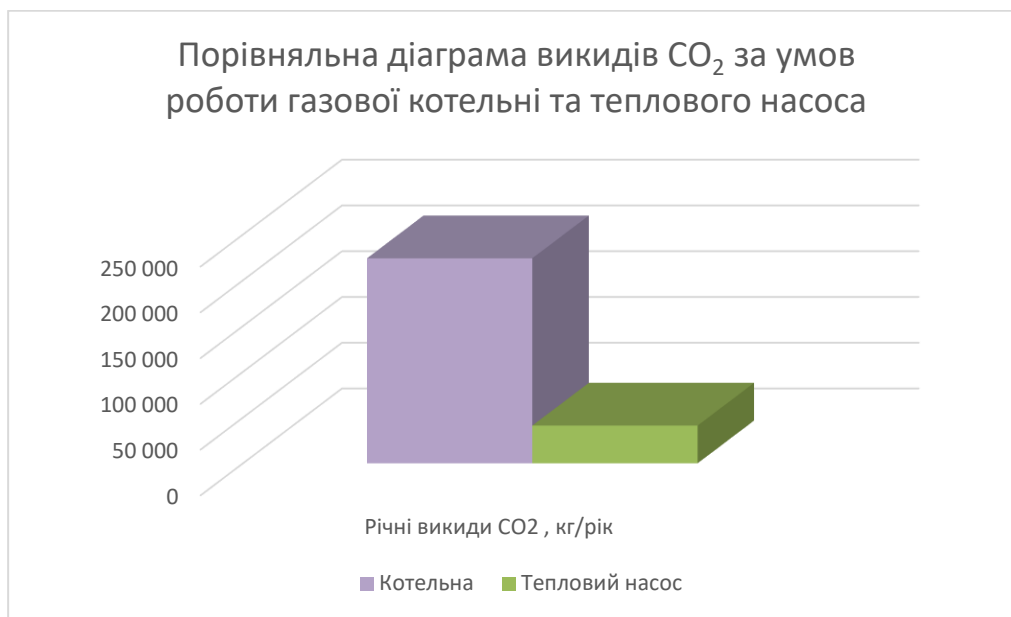


Рисунок 7.1 – Порівняльна діаграма викидів CO₂ за умов роботи газової котельні та теплового насоса

Отримані результати свідчать, що при однаковому тепловому навантаженні система теплопостачання на основі теплового насоса забезпечує суттєве зменшення питомих і сумарних викидів парникових газів порівняно з традиційною газовою котельнею. Це підтверджує екологічну доцільність переходу до низьковуглецевих технологій теплопостачання, особливо за умов подальшої декарбонізації електроенергетичного сектора.

Оцінювання екологічних показників систем теплопостачання є необхідним елементом підготовки здобувачів, оскільки формує системне бачення взаємозв'язку між енергетичною ефективністю, екологічною безпекою та сталим розвитком. Отримані знання та навички є основою для наукових досліджень, проєктування та модернізації сучасних систем теплопостачання з мінімальним негативним впливом на довкілля.

7.2 Енергоефективні та низьковуглецеві технології в теплопостачанні

Сучасний розвиток систем теплопостачання відбувається в умовах зростання вимог до енергоефективності, скорочення споживання викопних палив та мінімізації викидів парникових газів. У цьому контексті енергоефективні та низьковуглецеві технології розглядаються не лише як інженерні рішення, а як ключові елементи трансформації енергетичної інфраструктури відповідно до принципів сталого розвитку та кліматичної нейтральності.

Енергоефективність у теплопостачанні означає досягнення заданого рівня теплового комфорту за мінімальних витрат первинної енергії, тоді як низьковуглецевість характеризує здатність системи забезпечувати теплове навантаження з мінімальними викидами CO₂ та інших парникових газів протягом усього життєвого циклу.

Ключовою особливістю сучасних низьковуглецевих систем є зміна ролі джерела тепла. Якщо традиційні системи базуються на прямому спалюванні палива, то сучасні технології орієнтуються на використання низькопотенційної енергії, вторинних теплових ресурсів і відновлюваних джерел. Це супроводжується переходом до нижчих температурних рівнів у теплових мережах та інтеграцією електроенергетичного і теплового секторів.

Іншим важливим підходом є системна оптимізація, за якої підвищення ефективності досягається не лише завдяки окремому обладнанню, а шляхом узгодження джерел тепла, теплових мереж, акумулювання та споживачів.

Однією з ключових низьковуглецевих технологій є когенерація та тригенерація, які дозволяють одночасно виробляти теплову та електричну енергію з високим коефіцієнтом використання палива. Завдяки зменшенню втрат при перетворенні енергії такі установки забезпечують суттєве скорочення питомих викидів CO₂ порівняно з роздільним виробництвом енергії.

Перспективним напрямом є високоефективні котельні установки з конденсаційним режимом, особливо у поєднанні з оптимізованими температурними графіками. Хоча ці технології не є повністю безвуглецевими, вони забезпечують проміжний етап переходу до кліматично нейтральних систем.

Важливу роль у низьковуглецевому теплопостачанні відіграє утилізація вторинного тепла промислових процесів, дата-центрів, каналізаційних стоків та вентиляційних викидів. Такі джерела дозволяють зменшити потребу в первинній енергії та інтегрувати теплопостачання в концепцію циркулярної економіки.

Суттєвий потенціал мають сонячні теплові системи великої потужності, які можуть працювати як у складі локальних систем, так і в централізованих теплових мережах з сезонним акумулюванням. Їх ефективність значно зростає за умови зниження температури подачі в мережі.

Перехід до енергоефективних і низьковуглецевих технологій неможливий без трансформації теплових мереж. Низькотемпературні теплові мережі дозволяють зменшити теплові втрати, підвищити ефективність теплових насосів і розширити спектр доступних джерел тепла. Такі мережі стають платформою для інтеграції різномірних джерел, включаючи відновлювані та

децентралізовані.

Важливим аспектом є також цифровізація управління тепlopостачанням, що забезпечує оптимізацію режимів роботи, прогнозування навантажень та зменшення енергетичних втрат у реальному часі.

Акумуляування теплової енергії є ключовим елементом низьковуглецевих систем тепlopостачання, оскільки дозволяє узгоджувати виробництво тепла з нестабільною генерацією відновлюваних джерел. Короткострокові та сезонні акумулятори зменшують пікові навантаження, підвищують коефіцієнт використання обладнання та знижують потребу в резервних вуглецевих потужностях.

Суттєвим викликом залишається забезпечення надійності тепlopостачання в умовах зростаючої частки відновлюваних джерел та електрифікації теплового сектору, що потребує комплексного підходу до планування та управління.

Енергоефективні та низьковуглецеві технології в тепlopостачанні формують основу переходу від традиційних паливно-орієнтованих систем до інтегрованих, гнучких та кліматично нейтральних рішень. Для майбутніх науковців і інженерів у галузі будівництва та цивільної інженерії розуміння цих технологій є необхідною умовою розроблення та впровадження сучасних систем тепlopостачання, здатних відповідати як технічним, так і екологічним викликам ХХІ століття.

7.3 Комплексний аналіз заходів з підвищення екологічної безпеки та енергоефективності

Підвищення екологічної безпеки та енергоефективності інженерних систем є складним багатофакторним завданням, яке потребує інтегрованого підходу до оцінювання технічних, екологічних, економічних та соціальних аспектів функціонування енергетичної інфраструктури. На відміну від точкових технічних рішень, комплексний аналіз передбачає системне дослідження взаємодії елементів системи та визначення пріоритетності заходів з урахуванням їхнього сукупного ефекту.

Комплексний аналіз ґрунтується на принципі «від джерела до споживача», що передбачає одночасний розгляд етапів виробництва енергії, її транспортування, розподілу та кінцевого використання. Такий підхід дозволяє виявити приховані резерви зниження енергоспоживання та екологічного навантаження, які не можуть бути ідентифіковані при ізольованому аналізі окремих компонентів.

Важливою особливістю є врахування часової динаміки ефектів, оскільки деякі заходи мають миттєвий результат, тоді як інші реалізують свій потенціал лише в середньо- та довгостроковій перспективі.

За масштабом впливу заходи з підвищення екологічної безпеки та енергоефективності доцільно поділяти на стратегічні, тактичні та операційні. Стратегічні заходи формують довгостроковий напрям розвитку системи і включають зміну концепції енергозабезпечення, просторове планування та інтеграцію з іншими енергетичними секторами. Тактичні заходи спрямовані на оптимізацію структури та режимів роботи існуючих систем, тоді як операційні охоплюють регулювання, технічне обслуговування та моніторинг.

Екологічна безпека не може розглядатися як похідна від енергоефективності, оскільки між цими показниками можливі як синергія, так і конфлікти. Наприклад, підвищення енергоефективності шляхом інтенсифікації процесів може супроводжуватися локальним зростанням концентрацій забруднювальних речовин. Тому комплексний аналіз передбачає обов'язкове оцінювання побічних екологічних ефектів та ризиків.

Особливу увагу варто приділяти просторовому розподілу екологічного впливу, оскільки навіть загальне скорочення викидів не гарантує зменшення локального екологічного навантаження в зонах високої щільності населення.

Ключовим інструментом комплексного аналізу є багатокритеріальне оцінювання, яке дозволяє одночасно враховувати енергетичні, екологічні, економічні та соціальні критерії. Такий підхід забезпечує можливість порівняння альтернативних заходів не за одним показником, а за сукупністю взаємопов'язаних параметрів.

Для підвищення об'єктивності аналізу застосовуються методи нормування показників, вагового коефіцієнтування та сценарного аналізу. Це дозволяє адаптувати результати до конкретних умов реалізації проєкту або регіону.

Важливим елементом комплексного аналізу є оцінювання технічних, екологічних і регуляторних ризиків. Невизначеність вихідних даних, зміни нормативної бази та коливання енергетичних ринків можуть суттєво впливати на ефективність запланованих заходів. Тому доцільним є застосування методів чутливісного аналізу та аналізу сценаріїв розвитку.

Комплексний підхід передбачає безперервний моніторинг реалізованих заходів і коригування стратегії на основі фактичних результатів. Впровадження систем екологічного та енергетичного моніторингу дозволяє виявляти відхилення від проєктних показників і забезпечує адаптивне управління.

Комплексний аналіз заходів з підвищення екологічної безпеки та енергоефективності є ключовим інструментом переходу до сталих інженерних рішень. Його застосування дозволяє не лише досягати зниження енергоспоживання та екологічного навантаження, але й забезпечувати збалансований розвиток інженерної інфраструктури з урахуванням довгострокових технічних, екологічних і соціально-економічних наслідків.

Завдання до практичного заняття 7

Варіант 1.

Розглядається децентралізована система теплопостачання навчального корпусу з річною потребою в тепловій енергії $Q_h = 4\,500 \text{ МВт} \cdot \text{год}$. Теплопостачання забезпечується газовою котельнею потужністю 2,5 МВт із середнім сезонним ККД $\eta = 0,87$. Втрати тепла в розподільчій системі становлять 11 %. Нижча теплота згоряння природного газу приймається 34 МДж/м^3 , коефіцієнт викидів CO_2 – 56 кг/ГДж, NO_x – 0,17 кг/ГДж. Необхідно визначити річне споживання первинної енергії та об'єм природного газу, розрахувати сумарні й питомі викиди CO_2 та NO_x , а також оцінити екологічну ефективність системи. Додатково варто розглянути варіант модернізації шляхом підвищення ККД котельні до 0,94 та зниження втрат у системі до 7 %, визначивши абсолютне та відносне скорочення викидів.

Варіант 2.

Розглядається система централізованого теплопостачання житлової забудови з тепловим навантаженням $8\,000 \text{ МВт} \cdot \text{год/рік}$, що забезпечується газовою котельнею ККД 0,89 та тепловими мережами з втратами 16 %. Для аналізу екологічних показників приймаються питомі викиди CO_2 56 кг/ГДж. Необхідно визначити питомі викиди CO_2 на одиницю корисної теплової енергії та порівняти їх з альтернативним варіантом, у якому 40 % теплового навантаження покривається тепловим насосом із $\text{COP} = 3,4$, а решта – піковою котельнею з ККД 0,95. Коефіцієнт викидів електроенергії становить 42 кг/ГДж, втрати тепла в мережі зменшуються до 10 %. За результатами розрахунків необхідно зробити висновок щодо доцільності впровадження низьковуглецевої технології.

Варіант 3.

Розглядається теплозабезпечення адміністративної будівлі з річним тепловим споживанням $2\,800 \text{ МВт} \cdot \text{год}$, яке здійснюється електричною котельнею з ККД 0,98. Середній коефіцієнт викидів CO_2 для електроенергії

приймається 45 кг/ГДж. Необхідно визначити сумарні та питомі викиди CO₂ та порівняти їх із варіантом переходу на систему «тепловий насос + низькотемпературна система опалення», де COP = 4,1, а втрати тепла в будівлі після термомодернізації зменшуються на 18 %. За результатами розрахунків варто оцінити комплексний ефект заходів з погляду екологічної безпеки та енергоефективності.

Варіант 4.

Розглядається система теплопостачання мікрорайону з річною потребою в теплі 15 000 МВт · год, що працює на базі котельні з твердопаливними котлами ККД 0,82. Питомі викиди CO₂ становлять 98 кг/ГДж, втрати тепла в мережах – 18 %. Необхідно розрахувати екологічні показники системи та оцінити ефект переходу на комбіновану схему, яка включає сонячні теплові колектори, що забезпечують 20 % річного теплового балансу, та модернізовану котельню з ККД 0,90 і втратами в мережі 12 %. За результатами варто виконати комплексне порівняння варіантів і визначити пріоритетність заходів.

Варіант 5.

Розглядається територіальна система теплопостачання міської лікарні з тепловим споживанням 6 200 МВт · год/рік, що забезпечується газовою котельнею ККД 0,90 та тепловими мережами з втратами 13 %. Для підвищення екологічної безпеки пропонується впровадження теплового насоса, який покриває 50 % теплового навантаження, з COP = 3,8, а також зниження температурного графіка, що дозволяє скоротити втрати до 8 %. Необхідно визначити зміну споживання первинної енергії, сумарні викиди CO₂ (за коефіцієнтів 56 кг/ГДж для газу та 40 кг/ГДж для електроенергії), а також обґрунтувати системний ефект запропонованих заходів.

8 АДАПТАЦІЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ДО ЗМІН КЛІМАТУ ТА КОЛИВАНЬ ПОПИТУ

Мета заняття: формування у здобувачів науково обґрунтованого розуміння впливу кліматичних змін і нестабільності теплового попиту на функціонування систем теплопостачання, набуття теоретичних знань і аналітичних навичок щодо адаптації теплогенерувальних джерел, теплових мереж і систем споживання до змін зовнішніх умов, а також опрацювання підходів до підвищення надійності, гнучкості та енергоефективності теплопостачання в умовах довгострокових кліматичних трансформацій.

Теоретичні положення. Адаптація систем тепlopостачання до змін клімату та коливань попиту є складним міждисциплінарним завданням, що базується на аналізі довгострокових кліматичних тенденцій, варіабельності температур зовнішнього повітря та змін структури теплового навантаження. Підвищення середніх температур і зростання частоти екстремальних погодних явищ призводять до зменшення річного теплового попиту, скорочення тривалості опалювального періоду та збільшення нерівномірності споживання теплової енергії, що потребує перегляду принципів проектування й експлуатації систем тепlopостачання. Теоретичною основою адаптації є забезпечення гнучкості та стійкості системи шляхом оптимізації встановлених потужностей, впровадження модульних і багатоджерельних схем теплогенерації, використання теплових акумуляторів та інтелектуальних систем управління. Важливим положенням є узгодження режимів роботи джерел тепла з реальним попитом споживачів з урахуванням добових і сезонних коливань, що дозволяє знизити енергетичні втрати та підвищити економічну ефективність. Адаптаційні заходи також передбачають інтеграцію відновлюваних і низьковуглецевих джерел енергії, цифровізацію систем моніторингу та прогнозування теплового навантаження, а також підвищення термічної стійкості та надійності теплових мереж. Реалізація цих підходів ґрунтується на принципах сталого розвитку, кліматичної стійкості та системного управління тепlopостачанням в умовах невизначеності та змінного попиту.

8.1 Вплив змін клімату на теплові навантаження та режими роботи систем тепlopостачання

Кліматичні зміни формують нові умови функціонування систем тепlopостачання, за яких традиційні проєктні підходи втрачають ефективність. Зміщення кліматичних норм, підвищення міжрічної варіабельності температур і зростання частоти нетипових погодних сценаріїв зумовлюють необхідність перегляду методів розрахунку теплових навантажень і експлуатаційних стратегій теплових систем. Для науковців і практиків важливим є розуміння того, як кліматична нестабільність впливає на довгострокову надійність, економічність і стійкість тепlopостачання.

Теплове навантаження є функцією не лише температури зовнішнього повітря, а й вологості, швидкості вітру, сонячної радіації та теплової інерційності будівель. Зміни клімату призводять до перерозподілу цих факторів, що ускладнює використання лінійних залежностей між температурою та тепловим споживанням. Особливої ваги набуває аналіз чутливості теплового

навантаження до короткострокових кліматичних флуктуацій, які можуть спричиняти різкі зміни режимів роботи систем теплопостачання.

В умовах кліматичних змін джерела тепла дедалі частіше працюють у змінних і нестабільних режимах, що підвищує роль часткових навантажень, резервних потужностей і маневрених установок. Зниження тривалості періодів максимального навантаження призводить до зменшення фактичного коефіцієнта використання встановленої потужності, що потребує переоцінки доцільності великих централізованих джерел і стимулює розвиток децентралізованих та гібридних систем теплопостачання.

Зміна температурних режимів впливає на гідравлічну та теплову поведінку мереж, зокрема на величину температурних перепадів, втрати тепла та деформаційні процеси в трубопроводах. Часті переходи через температурні «нульові» зони збільшують ризик корозії, старіння матеріалів і аварійності теплових мереж. Це обґрунтовує необхідність врахування кліматичної адаптивності при виборі матеріалів, схем прокладання та режимів експлуатації.

Кліматична невизначеність ускладнює прогнозування теплових навантажень і планування режимів роботи систем теплопостачання. Теоретично важливим є застосування ймовірнісних і сценарних методів аналізу, які дозволяють оцінювати ризики недогріву або перевитрат енергоресурсів. У таких умовах підвищується значення гнучких алгоритмів управління, що здатні адаптуватися до швидких змін зовнішніх параметрів.

Адаптація систем теплопостачання до кліматичних змін базується на інтеграції прогнозних кліматичних моделей, методів оптимізації режимів роботи та цифрових технологій управління. Теоретично обґрунтовується перехід від нормативно-фіксованих режимів до динамічних систем керування, що враховують реальні погодні умови, теплову інерцію споживачів і економічні критерії ефективності. Такий підхід дозволяє підвищити стійкість теплопостачання та зменшити системні ризики в умовах кліматичної мінливості.

8.2 Моделювання та прогнозування коливань теплового попиту

Моделювання теплового попиту ґрунтується на уявленні теплопостачання як динамічної системи з множинними вхідними та вихідними параметрами, що змінюються у часі. Тепловий попит розглядається не як статична величина, а як стохастичний процес, що формується під впливом кліматичних, соціально-економічних і поведінкових факторів. Важливим теоретичним положенням є

врахування інерційності будівель і теплових мереж, яка зумовлює часові зсуви між зміною зовнішніх умов і реакцією споживання теплової енергії.

У наукових дослідженнях застосовуються детерміновані, імовірнісні та гібридні моделі теплового попиту. Детерміновані моделі базуються на фізичних законах теплопередачі та енергетичних балансах, тоді як імовірнісні моделі описують попит через статистичні залежності та розподіли випадкових величин. Гібридні підходи поєднують фізичне моделювання з методами машинного навчання, що дозволяє підвищити точність прогнозування в умовах неповної або зашумленої інформації.

Прогнозування коливань теплового попиту здійснюється на різних часових горизонтах: короткостроковому (години – доби), середньостроковому (тижні – місяці) та довгостроковому (роки – десятиліття). Короткострокові прогнози використовуються для оперативного управління режимами теплогенерації, середньострокові – для планування паливних ресурсів і ремонтних робіт, довгострокові – для стратегічного розвитку систем тепlopостачання та обґрунтування інвестиційних рішень.

Моделі теплового попиту використовують багатовимірні набори вхідних даних, що включають метеорологічні параметри, характеристики будівельного фонду, режими експлуатації, демографічні показники та поведінкові патерни споживачів. Теоретично важливим є врахування нелінійних взаємозв'язків між цими факторами, а також ефектів насичення й адаптації, коли реакція попиту на зміну температури з часом послаблюється.

Для прогнозування застосовуються методи аналізу часових рядів, регресійні та спектральні підходи, нейромережеві та ансамблеві моделі. Особливе місце займають адаптивні алгоритми, здатні оновлювати свої параметри в режимі реального часу з урахуванням нових даних. Такі методи дозволяють враховувати раптові зміни попиту, пов'язані з аномальними погодними умовами або змінами в поведінці споживачів.

Важливим теоретичним аспектом є оцінювання якості прогнозування теплового попиту, що здійснюється за допомогою статистичних показників похибки та інтервальних оцінок. Надійність прогнозів визначається здатністю моделі відтворювати не лише середні значення попиту, а й екстремальні коливання, які мають критичне значення для безпечної роботи систем тепlopостачання.

Результати моделювання та прогнозування теплового попиту є основою для оптимізації режимів роботи джерел тепла, управління тепловими акумуляторами та мінімізації витрат енергоресурсів. Теоретично обґрунтовується інтеграція прогнозних моделей у системи підтримки ухвалення

рішень, що дозволяє підвищити гнучкість, економічну ефективність і надійність теплопостачання в умовах змінного попиту.

Приклад математичної моделі, яка орієнтована на аналіз і прогнозування коливань теплового попиту будівель.

1. Фізична постановка задачі.

Будівля розглядається як термодинамічна система з зосередженими параметрами, у якій тепловий попит визначається балансом між тепловтратами через огорожувальні конструкції та внутрішніми теплоприбутками. Зміна внутрішньої температури відбувається з урахуванням теплової інерції конструкцій.

2. Диференціальне рівняння теплового балансу:

$$C_e \frac{dT_{\text{вн}}(t)}{dt} = Q_h(t) + Q_{\text{тп}}(t) + Q_s(t) - K[T_{\text{вн}}(t) - T_o(t)], \quad (8.1)$$

де C_e – ефективна теплоємність будівлі, Дж/°C;
 $Q_h(t)$ – потужність системи теплопостачання, Вт;
 $Q_{\text{тп}}(t)$ – внутрішні теплоприбутки (люди, обладнання), Вт;
 $Q_s(t)$ – сонячне випромінювання, Вт;
 K – загальний коефіцієнт теплопередачі будівлі, Вт/°C.
 $T_{\text{вн}}(t)$ – температура внутрішнього повітря, °C;
 $T_o(t)$ – температура зовнішнього повітря, °C.

3. Модель теплового попиту.

Тепловий попит визначається як необхідна теплова потужність для підтримання заданої температури:

$$Q_{\text{тп}}(t) = K \cdot [T_k - T_o(t)] - Q_{\text{тп}}(t) - Q_s(t) + C_e \frac{dT_{\text{вн}}(t)}{dt}, \quad (8.2)$$

де T_k – задана (комфортна) температура в приміщенні, °C.

4. Дискретна форма для чисельного моделювання.

Для практичних розрахунків модель записується у дискретному вигляді (крок Δt):

$$T_{\text{вн}}^{k+1} = T_{\text{вн}}^k + \frac{\Delta t}{C_e} \cdot [Q_h^k + Q_{\text{тп}}^k + Q_s^k - K \cdot (T_{\text{вн}}^k - T_o^k)]. \quad (8.3)$$

5. Розширення моделі.

5.1. Урахування інфільтрації повітря:

$$k_{\text{inf}} = \rho \cdot c \cdot n \cdot V, \quad (8.4)$$

де ρ – густина повітря, кг/м³;
 c – питома теплоємність повітря, Дж/(кг · °C);
 n – кратність повітрообміну;
 V – об'єм будівлі або приміщення, м³.

$$Q_{inf}(t) = k_{inf} \cdot [T_{вн}(t) - T_o(t)] . \quad (8.5)$$

5.2. Багатозонна модель (RC-модель).

Для складних будівель застосовується система рівнянь:

$$C \frac{dT}{dt} + KT = Q(t) , \quad (8.6)$$

де T – вектор температур зон і конструкцій.

8.3 Гнучкі та адаптивні технічні рішення в системах тепlopостачання

Гнучкість систем тепlopостачання визначається їх здатністю швидко змінювати теплову потужність, температурні параметри та схеми роботи у відповідь на коливання попиту, метеорологічні умови та експлуатаційні обмеження. Адаптивність полягає у здатності системи довготривало пристосовуватися до структурних змін — кліматичних, технологічних або соціально-економічних — без втрати надійності та ефективності. Ці властивості є ключовими для сучасних теплових систем, що функціонують в умовах невизначеності.

Одним із ключових технічних підходів є модульна побудова теплогенеруючих потужностей. Замість одного великого джерела тепла використовуються кілька агрегатів меншої потужності, які можуть вмикатися та вимикатися залежно від поточного теплового навантаження. Такий підхід зменшує втрати при роботі на часткових навантаженнях, підвищує надійність і спрощує адаптацію системи до змінного попиту.

Технічним засобом підвищення адаптивності є впровадження систем акумулювання теплової енергії. Теплові акумулятори дозволяють відокремити процес виробництва тепла від процесу його споживання, що особливо важливо при нерівномірному добовому або сезонному попиті. Вони забезпечують зменшення пікових навантажень на джерела тепла та підвищують стабільність роботи теплових мереж.

Гнучкі системи тепlopостачання відходять від жорстко фіксованих температурних графіків. Застосовуються змінні або плаваючі графіки подачі, які адаптуються до реальних погодних умов і теплового попиту. Це дозволяє

зменшити теплові втрати в мережах і покращити узгодження між джерелами тепла та споживачами.

Адаптивність підвищується шляхом поєднання централізованих і локальних джерел тепла. Гібридні системи можуть включати центральні котельні, індивідуальні теплові пункти, теплові насоси та відновлювані джерела енергії. Така структура дозволяє перерозподіляти теплові потоки та знижувати навантаження на основні елементи системи.

До гнучких технічних рішень належать регульовальні та запірні пристрої з високою швидкодією, частотно-регульовані приводи насосів, автоматизовані теплові пункти та балансувальні системи. Вони забезпечують оперативну зміну витрат теплоносія та температурних параметрів без порушення гідравлічної стабільності мережі.

Сучасні адаптивні рішення передбачають інтеграцію систем теплопостачання з електроенергетикою та газопостачанням. Такі інтегровані системи здатні перерозподіляти навантаження між різними енергетичними носіями, що підвищує загальну енергетичну гнучкість і стійкість інфраструктури.

Запровадження гнучких і адаптивних технічних рішень супроводжується необхідністю вирішення задач оптимального керування, забезпечення сумісності обладнання та оцінювання довгострокових ефектів від адаптації. Для аспірантів перспективними є дослідження ефективності модульних систем, теплового акумулювання та гібридних схем теплопостачання в умовах змінного попиту й кліматичної невизначеності.

Завдання до практичного заняття 8

Варіант 1.

Аналіз гнучкості теплогенеруючих джерел.

Для котельні потужністю 10 МВт, що складається з 4 модулів по 2,5 МВт, визначити можливість роботи при зниженні теплового попиту на 30 % від номінального. Розрахувати, які модулі потрібно відключити, щоб підтримати температуру подачі $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ для споживачів. Підготуйте пропозиції щодо підвищення гнучкості системи, наприклад, шляхом установки додаткового модульного котла 1,5 МВт.

Варіант 2.

Оцінка ефективності теплових акумуляторів.

Для теплової мережі міста з річним тепловим навантаженням 50 ГВт·год

та піковим навантаженням 15 МВт розрахуйте необхідну ємність теплового акумулятора, щоб зменшити пікове навантаження на 20 %. Використайте середню температуру теплоносія в мережі $T = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$, теплоємність води $c = 4,18\text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$, об'єм акумулятора визначити в м^3 . Порівняйте енергетичні втрати системи з акумулятором та без нього.

Варіант 3.

Проектування змінного температурного графіка.

На основі історичних даних температур зовнішнього повітря для січня ($T_o = -5...+3\text{ }^{\circ}\text{C}$) складіть погодозалежний графік подачі теплоносія для будівельного комплексу. Температура подачі T змінюється між 70 і 95 $^{\circ}\text{C}$ відповідно до середньодобової температури. Розрахуйте економію теплової енергії за добу у порівнянні з фіксованим графіком $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Варіант 4.

Моделювання впливу децентралізованих джерел тепла.

Розробіть схему гібридної системи тепlopостачання для житлового кварталу з тепловим навантаженням 8 МВт: централізована котельня 5 МВт + 3 локальні теплові насоси по 1 МВт. Моделюйте роботу мережі при добовому коливанні попиту від 4 МВт до 8 МВт і температурі зовнішнього повітря від $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оцініть, наскільки включення локальних джерел підвищує надійність і дозволяє знизити витрати палива на 15 %.

Варіант 5.

Аналіз технічних засобів швидкого регулювання.

Для теплової мережі з довжиною магістральних труб 10 км і середньою витратою теплоносія 100 т/год, оцініть роботу автоматизованих теплових пунктів і насосів при різкому збільшенні теплового попиту на 30% протягом 1 години. Розрахуйте необхідну швидкість спрацювання клапанів і насосів, щоб підтримати температуру подачі $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ у вузлах споживання без перевищення допустимих гідравлічних втрат 0,5 бар.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Теми рефератів до ЗМ 1: МЕТОДИ АНАЛІЗУ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА ЇХНІХ КОМПОНЕНТІВ

1. Системний підхід до аналізу систем теплопостачання як складних техніко-енергетичних об'єктів.
2. Класифікація та порівняльний аналіз сучасних методів аналізу систем теплопостачання.
3. Застосування термодинамічного аналізу для оцінки ефективності елементів систем теплопостачання.
4. Ексергетичний аналіз як інструмент виявлення втрат та резервів підвищення ефективності теплопостачальних систем.
5. Порівняння енергетичного та ексергетичного підходів в аналізі систем централізованого теплопостачання.
6. Гідравлічний аналіз теплових мереж: методи розрахунку та проблеми практичної реалізації.
7. Теплогідравлічне моделювання теплових мереж з урахуванням змінних режимів навантаження.
8. Методи математичного моделювання елементів і систем теплопостачання: огляд підходів та моделей.
9. Оптимізація систем теплопостачання з використанням математичних методів та чисельних алгоритмів.
10. Інтеграція методів аналізу та оптимізації в задачах модернізації систем теплопостачання.

Теми рефератів до ЗМ 2: НОВІТНІ РІШЕННЯ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

1. Концепція систем теплопостачання четвертого покоління (4GDH): принципи, переваги та обмеження впровадження.
2. Системи теплопостачання п'ятого покоління (5GDH) як елемент декарбонізованих енергетичних систем.
3. Інтеграція відновлюваних джерел енергії в сучасні системи теплопостачання: технічні та системні рішення.
4. Роль теплових насосів у трансформації систем централізованого та децентралізованого теплопостачання.

5. Гібридні системи теплопостачання на основі поєднання ВДЕ та традиційних джерел енергії.

6. Системи акумулювання теплової енергії як ключовий елемент підвищення гнучкості теплопостачання.

7. Коротко- та довгострокове акумулювання тепла в системах теплопостачання: технології та сфери застосування.

8. Цифровізація систем теплопостачання: використання цифрових двійників та інтелектуальних систем управління.

9. Інтелектуальні алгоритми управління теплопостачанням з використанням великих даних та машинного навчання.

10. Інтеграція систем теплопостачання в мультиенергетичні та секторно-зв'язані енергетичні системи (sector coupling).

Теми рефератів до ЗМ 3: НАПРЯМКИ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

1. Сучасні підходи до модернізації та реконструкції існуючих систем централізованого теплопостачання.

2. Технічні та організаційні рішення зі зниження теплових втрат у теплових мережах.

3. Оптимізація режимів роботи систем теплопостачання з урахуванням змінного теплового навантаження.

4. Методи підвищення енергоефективності теплогенеруючих установок у системах теплопостачання.

5. Екологічна безпека систем теплопостачання: шляхи зниження викидів та негативного впливу на довкілля.

6. Адаптація систем теплопостачання до змін клімату та сезонних коливань попиту на теплову енергію.

7. Використання автоматизованих та інтелектуальних систем управління для удосконалення теплопостачання.

8. Економічна ефективність заходів з модернізації та оптимізації систем теплопостачання.

9. Організаційні та нормативні аспекти реформування систем теплопостачання в умовах енергетичного переходу.

10. Комплексний підхід до удосконалення систем теплопостачання на основі поєднання технічних, екологічних та економічних критеріїв.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ РЕФЕРАТІВ

Обсяг реферату складає від 10 до 15 сторінок аркушу формату А4 (210 мм × 297 мм).

Текст реферату необхідно набирати за допомогою Microsoft Word (або аналогічного текстового редактора) застосовуючи шрифт Times New Roman кеглем 14 пт, міжрядковий інтервал 1,5. Колір шрифту в основному тексті має бути чорним, тоді як для особливих позначень чи акцентів дозволяється використання різних накреслень (напівжирне, курсив).

Верстка має відповідати таким розмірам полів: ліве поле – не менше ніж 20 мм, верхнє та нижнє – не менше ніж 20 мм, праве – не менше ніж 20 мм. Абзацний відступ рекомендується встановлювати у межах 1–1,27 см, щоб зберігати зручність читання й уніфікований вигляд сторінок.

Реферат повинен мати титульний аркуш (дод. А) та список використаних джерел.

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. 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.

10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.

17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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%20%91tenders/find%20%91funding/eu%20%91funding%20%91programmes/investeu_en, free (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.

24. 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 (date of the application: 30.12.2025). – Header from the screen.

25. 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: 30.12.2025). – Header from the screen.

26. 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.

27. 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.

28. 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.

29. 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.

30. 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.

31. 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.

32. 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.

33. 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.

34. 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.

35. 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.

36. 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.

37. 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).

38. 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.

39. 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.

40. 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.

41. 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.

42. Про теплопостачання : Закон України від 2 червня 2005 р. // Відомості Верховної Ради. – 2005, № 28, ст. 373.
43. Про комерційний облік теплової енергії та водопостачання : Закон України від 22 червня 2017 р. // Відомості Верховної Ради. – 2017, № 34, ст. 370.
44. 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.
45. 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.
46. Арсеньєв В. М. 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.
47. 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.
48. 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.

ДОДАТОК А

Форма титульного аркуша

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут підготовки кадрів вищої кваліфікації

Кафедра Теплогазопостачання і вентиляції

РЕФЕРАТ

з освітнього компонента «Спеціальні наукові питання теплопостачання»

На тему: _____

Виконав: здобувач освіти _____
курсу, групи _____
спеціальності _____
(шифр і назва)

освітня програма _____
(назва)

Керівник _____
(прізвище та ініціали)

Національна шкала _____

Кількість балів: _____

Оцінка: ECTS _____

Члени комісії : _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

(підпис) (прізвище та ініціали)

(підпис) (прізвище та ініціали)

202__

Методичні рекомендації

до проведення практичних занять та організації самостійної роботи
з навчальної дисципліни

«СПЕЦІАЛЬНІ НАУКОВІ ПИТАННЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ»

*(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»)*

Укладач **ГВОЗДЕЦЬКИЙ** Олександр Вадимович

Відповідальний за випуск *Ю. І. Чайка*

Редактор *О. В. Михаленко*

Комп'ютерне верстання *О. В. Гвоздецький, І. В. Волосожарова*

План 2026, поз. 52М

Підп. до друку 27.03.2026. Формат 60 × 84/16.
Ум. друк. арк. 5,7.

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.