

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ  
Факультет інженерних систем і екології  
Кафедра теплотехніки**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
ЗДОБУВАЧА СТУПЕНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ МАГІСТР**

на тему:

**Оптимізація параметрів ділянки теплової мережі з метою  
мінімізації викидів парникових газів при постачанні теплової  
енергії**

**Михайлишина Володимира Анатолійовича**

Київ 2025 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ  
Факультет інженерних систем і екології  
Кафедра теплотехніки**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Михайло КИРИЧЕНКО  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 року

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
ЗДОБУВАЧА СТУПЕНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ МАГІСТР**

**Оптимізація параметрів ділянки теплової мережі з метою  
мінімізації викидів парникових газів при постачанні теплової  
енергії**

Як здобувач вищої освіти КНУБА розумію і підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував незгодувану допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

**Здобувач Михайлишин Володимир  
Анатолійович**  
192 «Будівництво та цивільна  
інженерія»  
ОПП «Теплогазопостачання і  
вентиляція»  
Група ТВм-24-2  
Керівник: **Погосов О.Г.**  
доцент, кандидат технічних наук

Рецензент

---

*Ідентичність підтверджую*

Київ 2025 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет: інженерних систем і екології  
Випускова кафедра: теплогазопостачання і вентиляції  
Освітній вищої освіти: Магістр  
Спеціальність: 192 Будівництво та цивільна інженерія  
Освітня програма: Теплогазопостачання і вентиляція

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри теплотехніки

\_\_\_\_\_ Михайло КИРИЧЕНКО

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 року

**ЗАВДАННЯ  
ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
ЗДОБУВАЧА СТУПЕНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ МАГІСТР**

**Михайлишин Володимир Анатолійович**

1. Тема роботи «Оптимізація параметрів ділянки теплової мережі з метою мінімізації викидів парникових газів при постачанні теплової енергії», затверджена наказом ректора КНУБА № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_ року.
2. Керівник роботи Погосов Олександр Григорович, кандидат технічних наук, доцент.
3. Термін подання студентом роботи до захисту 20.12.2025 року
4. Зміст пояснювальної записки за розділами:
  - Р. 1. Екологічна оптимізація
  - Р. 2. Комп'ютерне моделювання цільової функції за допомогою програмного забезпечення SciLAB
  - Р. 3. Перевірка чисельного методу - методом математичного апарату
  - Р. 4. Оновлена математична модель теплової мереж
  - Р. 5. Оновлена математична модель теплової мережі з урахуванням нестационарності режимів
  - Р. 6. Моделювання та програмна реалізація розрахунку теплової мережі
5. Графічний матеріал за розділами:
  - Р.1. Л1. Схема енергетичних потоків.
  - Р.1. Л.2. Числова характеристика розподілення енергетичних потоків.
  - Р.1. Л.3. Числова характеристика виробництва теплової та електричної енергії.Прийняті значення питомих коефіцієнтів викидів парникових газів.

Р.1. Л.4. Фізична модель. Цільова функція з огляду на мінімізацію викидів парникових газів (початок).

Р.1. Л.5. Цільова функція. Цільова функція з огляду на мінімізацію викидів парникових газів (продовження).

Р.1. Л.6. Цільова функція з огляду на мінімізацію викидів парникових газів (закінчення).

Р.2. Л.7. Код у середовищі SciLAB (початок).

Р.2. Л.8. Код у середовищі SciLAB (кінець).

Р.2. Л.9. Тривимірний модель при 2000 кВт. Тривимірний модель при 500 кВт.

Р.6. Л.10. Код у середовищі SciLAB (початок).

Р.6. Л.11. Код у середовищі SciLAB (продовження).

Р.6. Л.12. Код у середовищі SciLAB (кінець). Схема теплової мережі.

#### 6. Консультанти розділів атестаційної випускної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірив	
		Дата	Підпис

#### 7. Календарний план виконання роботи:

Види робіт та їх зміст	Дата виконання
Розділ 1. Екологічна оптимізація	
Розділ 2. Комп'ютерне моделювання цільової функції за допомогою програмного забезпечення SciLAB	
Розділ 3. Перевірка чисельного методу - методом математичного апарату	
Розділ 4. Оновлена математична модель теплової мережі	
Розділ 5. Оновлена математична модель теплової мережі з урахуванням нестационарності режимів	
Розділ 6. Моделювання та програмна реалізація розрахунку теплової мережі	
Остаточне оформлення роботи	
Направлення роботи для перевірки на плагіат	
Направлення роботи на рецензування	

8. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Керівник \_\_\_\_\_ Погосов О.Г.  
(підпис)

Здобувач \_\_\_\_\_ Михайлишин В.А.  
(підпис)

<b>РЕЗЮМЕ (SUMMARY)</b> до кваліфікаційної роботи здобувача:		<i>Михайлишин Володимир Анатолійович</i> <i>Mykhailyshyn Volodymyr</i> (ПІБ здобувача українською та англійською)	
<i>ЗВО</i>	Київський національний університет будівництва і архітектури		
<i>Тема</i> (українською та англійською)	<i>Оптимізація параметрів ділянки теплової мережі з метою мінімізації викидів парникових газів при постачанні енергії</i> <i>Optimization of heating network parameters to minimize greenhouse gas emissions during energy supply</i>		
<i>Освітній ступінь</i>	Магістр		
<i>Факультет</i>	Інженерних систем та екології		
<i>Випускова кафедра</i>	Теплотехніки		
<i>Спеціальність</i>	192 «Цивільне будівництво та цивільна інженерія»		
<i>Освітня програма</i>	Теплогазопостачання і вентиляція		
<i>Керівник</i>	к.т.н., доц. Погосов Олександр Григорович		
<i>Обсяг роботи:</i>	<i>пояснювальна записка, стор.</i>	<i>розділів</i>	<i>креслень формату A1</i>
	113	6	12
<i>Розділ 1</i>	<i>Екологічна оптимізація</i>		
<i>Розділ 2</i>	<i>Комп'ютерне моделювання цільової функції за допомогою програмного забезпечення SciLAB</i>		
<i>Розділ 3</i>	<i>Перевірка чисельного методу - методом математичного апарату</i>		
<i>Розділ 4</i>	<i>Оновлена математична модель теплової мережі</i>		
<i>Розділ 5</i>	<i>Оновлена математична модель теплової мережі з урахуванням нестационарності режимів</i>		
<i>Розділ 6</i>	<i>Моделювання та програмна реалізація розрахунку теплової мережі</i>		
<i>Висновки по роботі:</i>	<i>Проведено дослідження по оптимізації параметрів ділянки теплової мережі з метою мінімізації викидів парникових газів при постачанні енергії</i>		
<i>Ключові слова:</i> <i>Keywords:</i>	<i>Централізовані системи теплопостачання, міжурядова група експертів зі зміни клімату, парникові гази.</i> <i>Centralized heat supply systems, Intergovernmental panel on climate change, greenhouse gases</i>		

Здобувач:/

/ Володимир МИХАЙЛИШИН

Керівник:/

/ Олександр ПОГОСОВ

“ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_

## Зміст

Перелік використаних позначень і скорочень.....	13
1. Екологічна оптимізація.....	13
1.1 Термін експлуатації централізованих систем теплопостачання.....	13
1.2 Методологія визначення викидів парникових газів.....	15
1.1.1. Методи згідно методології МГЕЗК .....	17
1.1.2. Коефіцієнти викидів парникових газів .....	20
1.3 Цільова функція з огляду на мінімізацію викидів парникових газів .....	27
2 Комп'ютерне моделювання цільової функції за допомогою програмного забезпечення SciLAB .....	37
2.1 Програмна реалізація моделі: код у середовищі SciLAB.....	37
2.2 Введення параметрів користувача. ....	41
2.3 Задання фізичних, матеріальних та екологічних констант. ....	42
2.4 Обчислення коефіцієнтів цільової функції. ....	44
2.5 Задання діапазонів параметрів і побудова сітки. ....	46
2.6 Обчислення цільової функції в усіх точках сітки. ....	46
2.7 Обчислення порогового значення технологічного обмеження. ....	47
2.8 Формування кольорової карти технологічних областей. ....	48
2.9 Побудова тривимірної поверхні $E(d, v)$ . ....	49
2.10 Пошук оптимуму в допустимій (червоній) області. ....	50
3 Перевірка чисельного методу - методом математичного апарату.....	53
3.1 Формулювання задачі.....	53
3.2 Аналітичний підхід до оптимізації. ....	54
3.3 Результати.....	58
3.4 Порівняння з чисельним методом.....	58

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.5	Зауваження .....	58
4	Оновлена математична модель теплової мережі. ....	61
4.1	Вступ .....	61
4.2	Представлення теплової мережі.....	61
4.3	Рівняння балансу .....	61
4.4	Функція втрат на ребрі.....	62
4.5	Втрати тепла через ізоляцію.....	62
4.6	Гідравлічні втрати.....	63
4.7	Функції для мінімізації.....	63
4.8	Обмеження .....	63
4.9	Формулювання задачі.....	64
4.10	Методи розв’язання.....	64
4.11	Висновок.....	65
5	Оновлена математична модель теплової мережі з урахуванням нестационарності режимів. ....	67
5.1	Вступ .....	67
5.2	Представлення теплової мережі.....	67
5.3	Рівняння балансу .....	68
5.4	Функції втрат на ребрі.....	68
5.5	Втрати тепла через ізоляцію.....	69
5.6	Гідравлічні втрати.....	70
5.7	Функціонал для мінімізації.....	70
5.8	Обмеження .....	70
5.9	Формулювання задачі.....	71
5.10	Методи розв’язання.....	72

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.11	Формулювання задачі .....	74
5.12	Використання обмеження.....	75
5.13	Знаходження екстремуму .....	76
5.14	Перевірка екстремуму .....	77
5.15	Формули для оптимальних значень.....	77
6	Моделювання та програмна реалізація розрахунку теплової мережі.....	80
6.1	Мета та завдання.....	80
6.2	Загальна характеристика теплової мережі .....	81
6.3	Вихідні дані для розрахунку.....	81
6.3.1	Фізичні властивості теплоносія .....	81
6.3.2	Температурні режими роботи .....	81
6.4	Алгоритм та програмна реалізація розрахунку теплової мережі .....	82
6.4.1	Загальна структура програмного алгоритму .....	82
6.4.2	Ініціалізація та задання констант .....	83
6.4.3	Температурні параметри та коефіцієнти запасу .....	83
6.4.4	Табличні дані теплових втрат трубопроводів .....	84
6.4.5	Реалізація функції визначення лінійних теплових втрат .....	84
6.4.6	Формування геометричної моделі теплової мережі .....	86
6.4.7	Розрахунок теплових навантажень вузлів .....	86
6.4.8	Підбір діаметрів трубопроводів.....	86
6.5	Тепловий розрахунок теплової мережі та його програмна реалізація.....	87
6.5.1	Розрахунок витрат теплоносія у трубопроводах .....	87
6.5.2	Реалізація функції визначення питомих теплових втрат .....	88
6.5.3	Розрахунок теплових втрат у подаючому трубопроводі.....	90
6.5.4	Розрахунок температур зворотного трубопроводу .....	90

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6.5.5	Урахування теплового навантаження у вузлах.....	91
6.5.6	Визначення сумарних теплових втрат і потужності джерела .....	91
6.5.7	Висновки до розділу .....	92
6.6	Формування добового профілю зовнішньої температури та погодинний тепловий розрахунок теплової мережі.....	92
6.6.1	Формування добового профілю температури зовнішнього повітря..	92
6.6.2	Організація погодинного розрахунку теплових втрат .....	93
6.6.3	Визначення погодозалежного теплового навантаження.....	93
6.6.4	Коригування температурного графіка подачі .....	94
6.6.5	Погодинний розрахунок витрат теплоносія .....	94
6.6.6	Розрахунок температур подаючого трубопроводу в добовому режимі	95
6.6.7	Розрахунок температур зворотного трубопроводу .....	95
6.6.8	Визначення погодинних теплових втрат .....	96
6.6.9	Підсумок.....	97
6.7	Візуалізація результатів та аналізів отриманих даних у середовищі SciLAB	97
6.7.1	Призначення візуалізації результатів розрахунку .....	97
6.7.2	Вивід числових результатів у консолі SciLAB .....	97
6.7.3	Вивід довжин ділянок трубопроводів .....	97
6.7.4	Вивід підібраних діаметрів труб.....	98
6.7.5	Вивід температур у вузлах теплової мережі .....	98
6.7.6	Вивід енергетичних показників системи.....	98
6.8	Побудова графічної схеми теплової мережі .....	99
6.8.1	Ініціалізація графічного вікна.....	99

6.8.2	Побудова геометричної схеми мережі .....	99
6.8.3	Нанесення інформації про вузли мережі .....	99
6.8.4	Нанесення параметрів трубопроводів .....	100
6.9	Масштабування та оптимізація відображення .....	100
6.10	Висновки.....	101
6.11	Загальний вигляд коду .....	101
Список використаних джерел .....		110

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1  
Екологічна оптимізація

Студент

Михайлишин В.А.

Керівник

Погосов О.Г

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						12
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Перелік використаних позначень і скорочень

ЦСТ – централізовані системи теплопостачання

МГЕЗК – міжурядова група експертів зі зміни клімату (англ. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)

ПГ – парникові гази

ЗЗЛГ - землекористування, змін у землекористуванні та лісового господарства (англ. Land use, land-use change and forestry, LULUCF)

ВВП – внутрішній валовий продукт

## 1. Екологічна оптимізація

### 1.1 Термін експлуатації централізованих систем теплопостачання

Основними напрямками розвитку систем теплопостачання є [1,2-5]:

- планування теплозабезпечення, розроблення та реалізація програм теплозабезпечення міст та інших населених пунктів України, строк дії яких становить 10 років на основі оптимального поєднання централізованих і автономних систем теплозабезпечення;
- впровадження когенераційних установок, зокрема на базі наявних опалювальних котелень;
- застосування альтернативних джерел енергії та відновлюваних джерел енергії, включаючи енергію сонця, вітру, біогазу, геотермальних вод, відходів виробництва;
- впровадження високоефективного теплоенергетичного обладнання та матеріалів у нових і діючих системах теплопостачання, зокрема, котлів із підвищеним коефіцієнтом корисної дії, утилізаторів тепла відхідних газів, компактних теплообмінних апаратів, уніфікованих блочних палинкових пристроїв з автоматикою, приладів диспетчерського контролю й управління технологічними процесами;
- зменшення втрат у процесі транспортування теплової енергії в магістральних і місцевих (розподільчих) теплових мережах шляхом застосування сучасних типів теплоізоляції;

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- збільшення строків експлуатації трубопроводів шляхами впровадження нових типів антикорозійних покриттів і засобів електрохімічного захисту, застосування неметалевих трубопроводів;
- запровадження превентивної діагностики (енергетичного обстеження) стану систем теплопостачання в процесі експлуатації.

У межах нашого контексту діяльності нас передусім цікавить, якими можуть бути строки експлуатації (нормативні та понаднормативні) централізованих систем теплопостачання у частині трубопровідної мережі. Це матиме вплив на реальну амортизацію викидів парникових газів від виробництва сталі та постачання обладнання на будівельний об'єкт.

Відповідно до Правил безпечної експлуатації технологічних трубопроводів [6] у проєктній документації або паспорті трубопроводу необхідно зазначати розрахунковий строк служби трубопроводу. Водночас паспорт трубопроводу має форму, регламентовану додатком 5 [6] форму та включає інформацію про максимальний строк використання трубопроводу.

Тлумачення експлуатації, як періоду функціонування обладнання від моменту введення його в дію і до виведення з експлуатації, протягом якого забезпечується та відновлюється його працездатність, наведено у [7]. За цим експлуатація поділяється на чотири оперативні стани: робота, резерв, ремонт, консервація.

З урахуванням вимог нормативних документів [1,6-7] можна дійти висновку, що розрахунковий строк (термін) експлуатації системи ЦТ має зазначатися у проєктній документації, а відомості про граничний строк експлуатації трубопроводів — у паспортах відповідних матеріалів.

Щодо проєктного терміну експлуатації, то відповідне визначення наведено в [8] і трактується як визначений проміжок часу, протягом якого будівля або споруда використовується за призначенням.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.2 Методологія визначення викидів парникових газів

Нижче наведено низку висновків, сформульованих в останньому, шостому, звіті з оцінки змін клімату МГЕЗК [9]. Ці висновки чітко свідчать про істотні зміни кліматичних параметрів і пов'язують це явище з діяльністю людини.

Людська діяльність, насамперед через викиди парникових газів, однозначно призвела до глобального потепління: у 2011–2020 роках глобальна середня температура поверхні Землі зросла на 1,1 °С порівняно з 1850–1900 роками. Глобальні викиди парникових газів і надалі збільшуються, при цьому їхній історичний та поточний внесок є нерівномірним і зумовлений нераціональним використанням енергії, землекористуванням і змінами у землекористуванні, способом життя, а також моделями споживання і виробництва в різних регіонах, між країнами та всередині них, а також між окремими особами і групами населення.

У 2011–2020 роках глобальна температура поверхні була на 1,09 °С вищою, ніж у 1850–1900 роках, причому підвищення було більш вираженим над суходолом (1,59 °С), ніж над океаном (0,88 °С). У перші два десятиліття ХХІ століття (2001–2020) глобальна температура поверхні перевищувала рівень 1850–1900 років на 0,99 °С. Починаючи з 1970 року, зростання глобальної температури поверхні відбувалося швидше, ніж у будь-який інший 50-річний період щонайменше за останні 2000 років.

Імовірний діапазон сумарного антропогенного підвищення глобальної приземної температури з 1850–1900 рр. до 2010–2019 рр. оцінюється від 0,8 °С до 1,3 °С, з найкращою оцінкою 1,07 °С. За цей період суміш парникових газів, імовірно, спричинила потепління в межах від 1,0°С до 2,0°С, тоді як інші антропогенні чинники (переважно аерозолі) зумовили охолодження від 0,0°С до 0,8°С, Водночас природні фактори (сонячна активність і вулканізм) змінили глобальну приземну температуру в діапазоні від -0,1°С до +0,1°С.

Зростання концентрацій суміші парникових газів приблизно з 1750 року безсумнівно спричинене викидами газів від людської діяльності протягом цього

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

періоду. Історичні чисті викиди CO<sub>2</sub> у 1850 – 2019 роках становили 2400 ± 240 Гт CO<sub>2</sub>, з яких понад половину (58%) зафіксовано у 1850 – 1989 роках, а близько 42% - між 1990 і 2019 роками. У 2019 році концентрація CO<sub>2</sub> в атмосфері перевищувала будь-які значення, відомі щонайменше за останні 2 мільйони років, тоді як концентрації метану і закису азоту були вищими, ніж будь-коли за останні щонайменше 800 000 років.

Глобальні чисті антропогенні викиди парникових газів у 2019 році оцінюються в 59 ± 6,6 Гт CO<sub>2</sub>-екв, що приблизно на 12% (6,5 ГтCO<sub>2</sub>-екв) вище, ніж у 2010 році, і на 54% (21 Гт CO<sub>2</sub>-екв) вище, ніж у 1990 році. Найбільша частка та зростання валових викидів парникових газів від спалювання викопного палива та промислових процесів, за якими йде метан, тоді як найбільше відносне зростання відбулося для фторованих газів, починаючи з досить низьких рівнів у 1990 році. Середньорічні викиди парникових газів у 2010-2019 роках були вищими, ніж у будь-якому попередньому десятилітті, тоді як темпи зростання між 2010 і 2019 роками (1,3% на рік) були нижчими, ніж між 2000 і 2009 роками (2,1% на рік). У 2019 році приблизно 79% світових викидів парникових газів припадало на енергетику, промисловість, транспорт і будівлі разом узяті, а 22% - на сільське, лісове господарство та інші види землекористування. Скорочення викидів у цих секторах через підвищення енергоефективності ВВП і зниження вуглецевої інтенсивності енергії було меншим за збільшення викидів, спричинене зростанням глобальної діяльності в промисловості, енергетиці, транспорті, сільському господарстві та будівництві

Історичні внески викидів CO<sub>2</sub> значно відрізняються між регіонами як за загальним обсягом, так і за часткою внеску в ЗЗЗЛГ та чистих викидів CO<sub>2</sub> від землекористування, змін у землекористуванні та лісового господарства.

У 2019 році близько 35% світового населення проживало в країнах із викидами понад 9 т CO<sub>2</sub>-екв на душу населення (без урахування ЗЗЗЛГ), а 41% - у країнах із викидами менше 3 т CO<sub>2</sub>-екв. на душу, при цьому значна частина населення останньої групи не мала доступу до сучасних енергетичних послуг. Найменш

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розвинені країни та малі острівні держави, що розвиваються, демонструють значно нижчі викиди на душу населення (1,7 т CO<sub>2</sub>-екв. та 4,6 т CO<sub>2</sub>-екв. відповідно), порівняно із середньосвітовим показником (6,9 т CO<sub>2</sub>-екв.), за винятком викидів від сектору ЗЗЗЛГ. На 10% домогосподарств з найвищими викидами на душу населення припадає 34-45% глобальних викидів парникових газів від домогосподарств на основі споживання, тоді як на 50% домогосподарств, що знаходяться в нижній частині списку лише 13-15%.

<i>Greenhouse gas</i>	<i>Chemical formula</i>	<i>Global warming potentials</i>
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	1
Methane	CH <sub>4</sub>	25
Nitrous oxide	N <sub>2</sub> O	298

*Рисунок 1.1. Приклади значень потенціалу глобального потепління*

Згідно [10], оцінку викидів можна здійснити за трьома підходами.

У першому підході представлено методику розрахунку, яка потребує мінімальної кількості даних і, відповідно, забезпечує найменш точну оцінку викидів. Якщо необхідно отримати більш точну оцінку, слід застосовувати другий або третій підхід, які вимагають значно більшого обсягу даних порівняно з першим методом.

#### 1.1.1. Методи згідно методології МГЕЗК

Перший метод [10] для оцінки викидів, передбачає наявність наступних даних:

- Дані про кількість спаленого палива відповідної категорії джерела;
- Коефіцієнт викидів парникових газів.

Та представлений наступним виразом:

$$Emissions_{GHG,fuel} = Fuel\ Consumption_{fuel} \cdot Emission\ Factor_{GHG,fuel}, \quad (1.1.1.1)$$

де  $Emissions_{GHG,fuel}$  – викиди парникових газів «GHG» від палива типу «fuel»;

$Fuel\ Consumption_{fuel}$  – кількість спожитого палива;

$Emission\ Factor_{GHG,fuel}$  – коефіцієнт викидів парникових газів.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримані значення за формулою (1.1.1.1) сумуємо, та знаходимо значення загальних викидів парникових газів «GHG» від палива типу «fuel» :

$$Emissions_{GHG} = \sum_{fuels} Emission_{GHG, fuel} \quad (1.1.1.2)$$

Другий метод [10] для оцінки викидів парникових газів на відміну від першого вимагає наступні дані:

- Дані про кількість спожитого палива відповідної категорії джерела;
- Коефіцієнт викидів парникових газів країни для якої проводиться оцінка.

Тобто коефіцієнт викидів парникових газів підбирається саме для країни, де проводиться оцінка. Для обраної країни він може збігатися з коефіцієнтом за замовчуванням або відрізнятись від нього. Використання значення, специфічного для країни, зменшує діапазон невизначеності та забезпечує більш точні результати порівняно з першим методом.

При застосуванні першого та другого методів оцінки викидів для розрахунків використовують середній коефіцієнт викидів для відповідних категорій джерел. Третій метод [10] дозволяє отримати більш точну оцінку парникових викидів, але потребує значно ширшого набору даних:

- Тип спожитого палива;
- Технологія спалювання;
- Умови експлуатації;
- Технологія управління;
- Якість обслуговування;
- Вік обладнання, що використовується.

У цьому підході враховується застосування коефіцієнтів викидів, визначених на основі статистичних даних про споживання палива, розподіленого за різними категоріями. Це показує, що змінні та параметри залежать від конкретної технології – тобто від будь-якого обладнання, процесу використання чи властивостей самого

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

палива, що можуть впливати на викиди. Цей метод представлено наступною формулою:

$$Emissions_{GHG,technology} = Fuel\ Consumption_{fuel,technology} \cdot Emission\ Factor_{GHG,fuel,technology} \quad (1.1.1.3)$$

Де  $Emissions_{GHG,technology}$  – викиди парникових газів «GHG» від палива типу «fuel» за певним видом технології;

$Fuel\ Consumption_{fuel,technology}$  – кількість спожитого палива за певним видом технології;

$Emission\ Factor_{GHG,fuel,technology}$  – коефіцієнт викидів парникових газів за певним видом технології.

За [10] якщо кількість спаленого палива невідома, її можна визначити за допомогою моделей:

$$Fuel\ Consumption_{fuel,technology} = Fuel\ Consumption_{fuel} \cdot Penetration_{technology} \quad (1.1.1.4)$$

де  $Penetration_{technology}$  – частка, яку займає технологія серед усіх джерел, може бути визначена на основі вихідних даних, наприклад, обсягу виробленої електроенергії. Це дозволяє коректно врахувати відмінності у використанні різних технологій.

Щоб розрахувати викиди парникових газів для категорій джерел, результат формули (1.1.1.3) необхідно підсумувати для всіх технологій:

$$Emissions_{GHG,fuel} = \sum Fuel\ Consumption_{fuel,technology} \cdot Emission\ Factor_{GHG,fuel,technology} \quad (1.1.1.5)$$

Тобто використання третього методу дозволяє отримати якісну оцінку викидів парникових газів «GHG» від палива типу «fuel».

Часто немає потреби застосовувати цей метод для оцінки викидів CO<sub>2</sub>, оскільки вони не залежать від способу спалювання. Проте інформація про викиди на рівні

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

окремих підприємств стає дедалі доступнішою та викликає зростаючий інтерес у контексті торгівлі квотами на викиди.

### 1.1.2. Коефіцієнти викидів парникових газів

В таблицях (Таблиця 1.1.2.1 - Таблиця 1.1.2.3) за [10] відображена тенденція зниження викидів парникових газів у період з 1990–2021 років. Ця тенденція пов'язана з низкою політичних та економічних чинників, відкриттям нових міжнародних ринків із високою конкуренцією, а також різними економічними та політичними заходами, спрямованими на підвищення ефективності в енергетичному секторі.

Таблиця 1.1.2.1 Викиди парникових газів пов'язаних з логістикою, т · 10<sup>6</sup> CO<sub>2</sub>-екв.

	1990	1995	2000	2005	2010	2012	2016	2017	2018	2019	2020	2021
E <sub>CO<sub>2</sub>.log</sub>	61.3	20.7	15.7	22.1	28.8	29.1	23.9	24.6	24.7	26.6	23.3	24.9
g	7	3	8	6	9	0	6	8	2	5	7	8

Таблиця 1.1.2.2. Викиди парникових газів пов'язаних з мануфактурою чавуну і сталі, т · 10<sup>6</sup> CO<sub>2</sub>-екв.

	1990	1995	2000	2005	2010	2012	2016	2017	2018	2019	2020	2021
E <sub>CO<sub>2</sub>.manu</sub>	55.3	15.3	25.1	24.5	13.4	13.9	10.3	9.94	10.1	10.6	11.0	11.3
f	5	9	9	9	2	2	7		9	0	6	8

Таблиця 1.1.2.3 Викиди парникових газів пов'язаних з генерацією електричної, теплової, та втрат енергії, т · 10<sup>6</sup> CO<sub>2</sub>-екв.

	1990	1995	2000	2005	2010	2012	2016	2017	2018	2019	2020	2021
E <sub>CO<sub>2</sub>.el.f.</sub>	255.5	187.7	108.0	111.5	111.7	123.0	94.5	86.8	93.5	87.8	82.1	80.9
.l.	2	7	7	8	5	7	0	3	7	3	0	4

Визначення величини викидів (кгCO<sub>2</sub>екв/т·км) від вантажних перевезень здійснимо шляхом перерахунку викидів при спалюванні дизельного пального, що становить 3172 кгCO<sub>2</sub>/т дизелю [11]. При витраті дизпалива на рівні 0,9-1,3 л/100 т·км [12] і густині дизпалива 820 кг/м<sup>3</sup> (0.82 т/м<sup>3</sup> або 0.00082 т/л) отримаємо

					Кваліфікаційна робота							Арк.
												20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								

значення  $3172 \cdot 0.00082 \cdot 0.01 = 0.026$  кг/т·км. Отримане значення співпадає з питомими показниками викидів, наведеними в [11] на рівні 280-300 г/км, що при середньому навантаженні вантажного транспорту близько 10 тон є еквівалентним 0.028-0.03 кг/т·км.

Викиди від виробництва сталі прийняті на рівні зазначених в [11] і складають від 1.6 [11, значення категорії 2C1 EF ID 22986] до 1.92 [13] тСО<sub>2</sub>екв/т виробленої сталі. Ці показники узгоджуються з відношенням обсягу викидів СО<sub>2</sub>екв (наведеному в національному антропогенному кадастрі [10] в категорії 1.А.2.а)  $11.38 \cdot 10^6$  тСО<sub>2</sub>екв за 2021 рік до оціночної загальної кількості виробленої сталі на рівні 626300 т [14], хоча дані стосуються 2022 року, що загалом не змінює порядок величин. Це відношення складає 1.82 тСО<sub>2</sub>екв/т, що корелює з даними [11, 13]. В подальших розрахунках прийнято саме значення 1820 кгСО<sub>2</sub>екв/т.

Викидам, пов'язаним із виробництвом електричної та теплової енергії, відповідають дані, отримані з [15] про обсяги випуску енергії. Так, наприклад, значення  $88910 \cdot 10^3$  Гкал отримано шляхом віднімання від загального відпуску електричної енергії  $91317 \cdot 10^3$  значень генерації теплової енергії на АЕС та категорії інше ( $1557 \cdot 10^3$  і  $850 \cdot 10^3$  відповідно).

Значення ж випуску електричної енергії прийнято як суму генерації ТЕС і ТЕЦ

Таблиця

1.1.2.4. Виготовлена та спожита тепла та електрична енергія за 2021 рік

	<i>Теплова ен., Гкал</i>	<i>Електроенерг., кВт·год</i>
FC	$88910 \cdot 10^3$	$40967 \cdot 10^6$

Розрахунок коефіцієнта емісій парникових газів пов'язаний зі спалюванням палива виконується за формулою:

$$EF_{CO_2.eq} = \frac{E_{CO_2.eq}}{FC} \quad (1.1.2.1)$$

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де,  $EF_{CO_2.eq}$  – коефіцієнт викидів парникових газів пов'язаний зі спалюванням палива.

$E_{CO_2.eq}$  – Питомі викиди парникових газів, т·CO<sub>2</sub> екв.

$FC$  – загальна кількість виготовленої та спожитої продукції за рік.

Оскільки для викидів від виробництва електричної, теплової енергії та втрат енергії в [10] наведено загальне значення, пропорційно розподілимо енергетичні потоки за Рисунок 1.1.2 та отримаємо дані для визначення коефіцієнта викидів парникових газів.

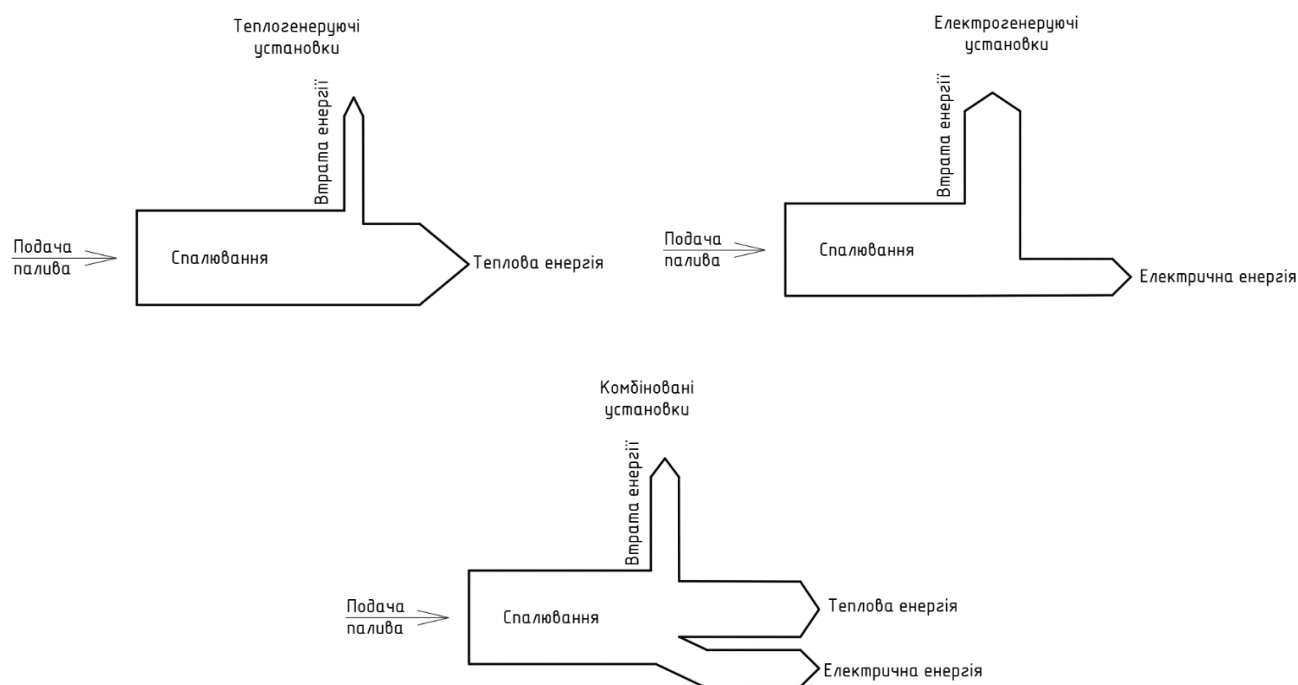


Рисунок 1.1.2.1 Схема енергетичних потоків

Відповідно до Рисунок 1.1.2.1 приймаємо, що:

$E_{CO_2.el.}$  – викиди парникових газів пов'язані з виробленням електричної енергії, тCO<sub>2</sub>-екв;

$E_{CO_2.f.}$  – викиди парникових газів пов'язані з виробленням теплової енергії, тCO<sub>2</sub>-екв;

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$E_{CO_2,el.f.l.}$  – загальні викиди парникових газів від сектора енергетики за [10], представляє собою суму викидів від спалювання для отримання електричної та теплової енергії.

Числові характеристики розподілу енергетичних потоків взято з [15], при цьому не враховуються відпуски енергії від АЕС та ГЕС, де фактично відсутні викиди від спалювання.

Таблиця 1.1.2.5 Числова характеристика розподілення енергетичних потоків

Характеристика енергетичних потоків	2021		
	кВт·год	Гкал	ТДж
$E_{ТЕС}$	$32348 \cdot 10^6$	-	$116,4 \cdot 10^3$
$E_{ТЕЦ}$	$9162 \cdot 10^6$	-	$33 \cdot 10^3$
$T_{ТЕС}$	-	$1258 \cdot 10^3$	$5,3 \cdot 10^3$
$T_{ТЕЦ}$	-	$26889 \cdot 10^3$	$112,6 \cdot 10^3$
$T_{КОТ}$	-	$53441 \cdot 10^3$	$223,7 \cdot 10^3$

За типовими прикладами ККД систем генерації теплової та електричної енергії [16] прийняті коефіцієнти корисної дії енергетичних установок.

Звертаємо увагу, що в цьому дослідженні оцінка ефективності циклу на ТЕЦ проводиться виключно для теплофікаційного режиму, що пояснює зазначене в табл. 1.1.2.6 ККД на рівні 85% та відсутність показника електричного ККД. Значення коефіцієнтів корисної дії енергетичних установок є загальновідомими [17-19] і прийняті консервативно

Таблиця 1.1.2.6. ККД, %

	$\eta_{ТЕС}$	$\eta_{ТЕЦ}$	$\eta_{КОТ}$
Теплова енергія	не застосовується	85	80
Електрична енергія	30	не застосовується	-

Оцінимо загальну кількість енергії, необхідної для генерації енергії (Таблиця 1.1.2.5). Компоненти первинної енергії від ТЕС при виробництві теплової енергії та від ТЕЦ при виробництві електричної енергії виключені, оскільки такі види енергії не є пріоритетними для відповідного циклу. Іншими словами, для комбінованих циклів ТЕС і ТЕЦ за розрахунковий прийнято саме основний вид виробленої енергії:

$$\Sigma(E_i; T_j) = \left( \frac{E_{\text{тес}}}{\eta_{\text{СНР}}} + \frac{T_{\text{тес}}}{\eta_{\text{СНР}}} + \frac{T_{\text{кот}}}{\eta_{\text{В}}} \right) \quad (1.1.2.2)$$

де  $\Sigma(E_i; T_j)$  – загальна сума розподілених теплових потоків у вигляді первинної енергії, ТДж;

$E_i$  – первинна енергія, яка відповідає відпуску електроенергії з ТЕС, ТДж;

$T_j$  – первина енергія, яка відповідає відпуску теплової енергії з ТЕЦ і котелень, ТДж.

Знайшовши суму розподілених енергетичних потоків визначаємо викиди парникових газів в залежності від виробництва електричної енергії.

$$E_{\text{CO}_2.\text{el.}} = \left( \frac{\Sigma E_i}{\Sigma(E_i; T_j)} \right) \cdot E_{\text{CO}_2.\text{el.f.l.}} \quad (1.1.2.3)$$

де  $E_{\text{CO}_2.\text{el.}}$  – викиди парникових газів від виробництва електричної енергії, тСО<sub>2.екв</sub>;

$E_{\text{CO}_2.\text{el.f.l.}}$  – загальні викиди при виробництві теплової та електричної енергії;

$\Sigma E_i$  – сумарний витрата первинної енергії при генерації електричної енергії (враховано тільки ТЕС), ТДж;

$\Sigma(E_i; T_j)$  – загальна сума розподілених теплових потоків, ТДж.

Наступна формула (1.1.2.4) представляє викиди парникових газів від виробництва теплової енергії:

$$E_{\text{CO}_2.\text{f.}} = \left( \frac{\Sigma T_i}{\Sigma(E_i; T_j)} \right) \cdot E_{\text{CO}_2.\text{el.f.l.}} \quad (1.1.2.4)$$

де  $E_{\text{CO}_2.\text{f.}}$  – викиди парникових газів від виробництва теплової енергії, тСО<sub>2.екв</sub>;

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\Sigma T_i$  – сумарна витрата первинної енергії при генерації теплової енергії (враховано ТЕЦ і котельні), ТДж;

$\Sigma(E_i; T_j)$  – загальна сума розподілених теплових потоків, ТДж.

Отриманий розподіл говорить про внески на рівні 47% і 53% відповідно при генерації електричної і теплової енергії в загальну величину викидів категорії 1.А.1.а [10].

Знайшовши кількість викидів при виробництві теплової та електричної енергії, знаходимо питомий коефіцієнт викидів парникових газів пов'язаний із виробництвом електричної енергії:

$$EF_{CO_2.eq.el.} = \frac{E_{CO_2.el.}}{\Sigma E_i} \quad (1.1.2.5)$$

де  $EF_{CO_2.eq.el.}$  – питомий коефіцієнт викидів парникових газів пов'язаний із виробленням електричної енергії,  $\frac{тCO_{2.екв}}{кВт \cdot год}$ ;

$E_{CO_2.el.}$  – викиди парникових газів від виробництва електричної енергії,  $тCO_{2.екв}$ ;

$\Sigma E_i$  – сумарний відпуск електричної енергії, ТДж;

Та пов'язаний із виробництвом теплової енергії:

$$EF_{CO_2.eq.f.} = \frac{E_{CO_2.f.}}{\Sigma T_i} \quad (1.1.2.6)$$

де  $EF_{CO_2.eq.f.}$  – питомий коефіцієнт викидів парникових газів пов'язаний із виробленням теплової енергії,  $\frac{тCO_{2.екв}}{Гкал}$ ;

$E_{CO_2.f.}$  – викиди парникових газів від виробництва теплової енергії,  $тCO_{2.екв}$ ;

$\Sigma T_i$  – сумарний відпуск теплової енергії, ТДж;

Нижче наведена зведена таблиця значень розрахункових коефіцієнтів викидів парникових газів для умов України (табл. 1.2.2.7.).

Таблиця

1.1.2.7. Прийняті значення питомих коефіцієнтів викидів парникових газів

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

-	Отримане значення коефіцієнту
Теплова енергія та теплові втрати, (кгСО <sub>2</sub> екв/Гкал) / (тСО <sub>2</sub> екв/ТДж)	482 / 115
Електроенергія, кг СО <sub>2</sub> екв/кВт·год - при виробництві тільки на ТЕС і ТЕЦ - національний перерахований показник (з урахуванням генерації АЕС, ГЕС, НВДЕ)	0,89 0,27
Мануфактура сталі, кг СО <sub>2</sub> екв/т	1820
Перевезення, кг СО <sub>2</sub> екв/тхкм	0,026

В Таблиця 1.1.2.8 отримані значення коефіцієнтів викидів парникових газів корелюють з відомими значеннями наведеними в джерелах.

Таблиця 1.1.2.8. Відомі значення коефіцієнтів викидів парникових газів при генерації теплової та електричної енергії

Коефіцієнт викидів тСО <sub>2</sub> екв при виробництві електричної енергії	Коефіцієнт викидів тСО <sub>2</sub> екв при виробництві теплової енергії	Джерело
420 г/кВт·год (загальне національне значення для споживання електричної енергії з мережі)	260 г/кВт·год, еквівалентно 72 тСО <sub>2</sub> екв/ТДж (вказано при роботі тільки газових опалювальних котлів)	[23]
0,298 т/МВт·год	-	[24]
279 г/кВт·год	-	[25]
0,43 т/МВт·год	-	[26]
-	70-110 т/ ТДж (в залежності від типу викопного палива безпосередньо на джерелі генерації)	[27]

					Кваліфікаційна робота	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

З огляду існуючих даних щодо викидів парникових газів при генерації теплової та електричної енергії, можемо зробити висновок про збіжність отриманих розрахункових значень.

Подані у формулах (1.2.2.4.)–(1.2.2.8.) залежності дають змогу розділити загальний обсяг викидів на внески від виробництва електричної та теплової енергії й таким чином отримати питомі коефіцієнти, необхідні для подальших розрахунків моделі. Використані енергетичні потоки (табл. 1.2.2.5) разом із прийнятими значеннями ККД установок (табл. 1.2.2.6) формують узгоджену схему розподілу втрат та перетворень енергії, що дозволяє виконати оцінку викидів з урахуванням реальних умов української енергосистеми (з урахуванням даних Національного антропогенного кадастру [10]).

Порівняння отриманих локальних питомих коефіцієнтів із довідковими значеннями МГЕЗК (табл. 1.2.2.7) виявило помітні розбіжності для теплової енергії та сектору мануфактури. Натомість показники для електроенергії знаходяться в межах відомих міжнародних діапазонів. Такий результат свідчить про те, що використання національних коефіцієнтів є обґрунтованим: вони точніше враховують фактичну структуру палива, особливості технологій та умов логістики, що важливо для подальших оптимізаційних розрахунків

### 1.3 Цільова функція з огляду на мінімізацію викидів парникових газів

Фізична модель представлена нижче (Рисунок 1.3.1). На прикладі даної моделі розглянемо функцію викидів парникових газів, які виникають при постачанні теплової енергії вхідної потужності на ділянку  $Q_1$ , кВт при роботі ділянки теплової мережі протягом певного проміжку часу (розглядається тривалість роботи впродовж 1 години).

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

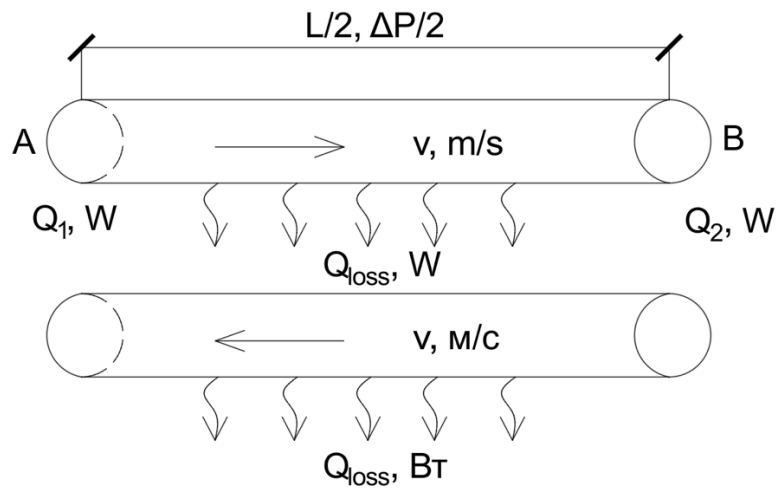


Рисунок 1.3.1 Фізична модель

$$E_{CO_2eq,DH} = E_{CO_2eq,pump} + E_{CO_2eq,heatloss} + E_{CO_2eq,fuel} + E_{CO_2eq,log} + E_{CO_2eq,manuf}, \quad (1.3.1)$$

де  $E_{CO_2eq,DH}$  – сумарні питомі викиди парникових газів, пов’язані з постачанням теплової енергії, кг CO<sub>2</sub>-екв.;

$E_{CO_2eq,pump}$  – викиди парникових газів, пов’язані з витратою електричної енергії на роботу двигуна мережевого насоса централізованої системи тепlopостачання, кг CO<sub>2</sub>-екв.;

$E_{CO_2eq,heatloss}$  – викиди парникових газів, пов’язані з втратою теплової енергії на ділянці в наслідок тепловіддачі від поверхні трубопроводу до навколишнього середовища, кг CO<sub>2</sub>-екв.;

$E_{CO_2eq,fuel}$  – викиди парникових газів, пов’язані з генерацією теплової енергії на джерелі централізованої системи тепlopостачання, кг CO<sub>2</sub>-екв.;

$E_{CO_2eq,log}$  – викиди парникових газів, пов’язані зі спалюванням палива транспортними засобами при доставці труб, кг CO<sub>2</sub>-екв.;

$E_{CO_2eq,manuf}$  – викиди парникових газів, пов’язані з первинними процесами виробництва сталі (в даному дослідженні не включені викиди від прокату), кг CO<sub>2</sub>-екв.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Викиди парникових газів, пов'язані з витратою електричної енергії на роботу двигуна насоса централізованої системи тепlopостачання можуть бути представлені наступним чином:

$$E_{CO_2eq,pump} = FC_{pump} \cdot EF_{CO_2eq,el.}, \quad (1.3.2)$$

де  $FC_{pump}$  – витрата електричної енергії на роботу двигуна насоса, кВт\*год;

$EF_{CO_2eq,el.}$  – коефіцієнт викидів парникових газів пов'язаний зі спалюванням палива для виробництва електричної енергії.

В дослідженні прийнято розрахунковий час роботи системи на рівні 1 години. При цьому витрата електричної енергії може бути розрахована згідно відомої залежності [20]:

$$FC_{pump} = \frac{G \cdot \Delta P}{\eta} \cdot \tau \cdot 10^{-3}, \quad (1.3.3)$$

де  $G$  – витрата теплоносія, м<sup>3</sup>/с;

$\Delta P$  – втрата тиску на розрахунковій ділянці, Па;

$\eta$  – ККД насоса (включно з ефективністю всіх його елементів), %;

$\tau$  – час роботи системи (припущенням є постійність витрати теплоносія протягом часу  $\tau$ , або ж робота системи в діапазоні з якісним регулюванням відпуску теплової енергії), год.

Витрата теплоносія може бути визначена згідно залежності:

$$G = S \cdot v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v, \quad (1.3.4)$$

де  $S$  – площа перерізу трубопроводу, м<sup>2</sup>;

$d$  – діаметр трубопроводу системи тепlopостачання на ділянці, м;

$v$  – швидкість руху теплоносія на ділянці, м/с.

Залежність для розрахунку втрат тиску для випадку ламінарної сталої течії як функції динамічного тиску можна отримати з рівнянь Нав'є-Стокса. Видозміна рівняння називається рівнянням Дарсі-Вейсбаха, яке було розроблене французьким інженером Генрі Дарсі (1803-1858) для трубопроводів. Пізніше, на основі тривалих

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

експериментів і дедукції, німецький інженер Юліус Вейсбах (1806-1871) підтвердив справедливість цього співвідношення для перехідних і турбулентних потоків і навіть для втрат в трубопроводній арматурі і клапанах. Використання формули (1.3.5) в даному дослідженні зумовлене фактом, що в досліджуваній ділянці труби очевидно не відбувається суттєвої зміни густини, оскільки розглядаються системи централізованого теплопостачання.

$$\Delta P = \zeta \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (1.3.5)$$

де  $\rho$  – густина теплоносія, кг/м<sup>3</sup>;

$\zeta$  – безрозмірний коефіцієнт втрат на тертя.

Враховуючи загально відомий вираз для визначення коефіцієнту втрат на тертя в залежності від коефіцієнту Дарсі, довжини ділянки і її діаметру [21,22] і формулу (1.3.4), отримаємо вираз для визначення витрати енергії насосом:

$$FC_{pump} = \frac{\lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v}{\eta} \cdot \tau \cdot 10^{-3} = \frac{\pi \cdot \lambda \cdot L \cdot \rho}{8 \cdot \eta} \cdot d \cdot v^3 \cdot \tau \cdot 10^{-3}, \quad (1.3.6)$$

де  $\lambda$  – безрозмірний коефіцієнт гідравлічного тертя (коефіцієнт Дарсі);

$d$  – діаметр трубопроводу, м;

$L$  – довжина ділянки трубопроводу, м.

Тоді викиди парникових газів можуть бути визначені наступним чином:

$$E_{CO_2eq,pump} = \frac{\pi \cdot \lambda \cdot L \cdot \rho}{8 \cdot \eta} \cdot d \cdot v^3 \cdot \tau \cdot 10^{-3} \cdot EF_{CO_2eq,el.prod}, \quad (1.3.7)$$

Визначення безрозмірний коефіцієнт гідравлічного тертя проводиться в цій роботі на підставі залежності Альтшуля в третій гідравлічній області.

$$\lambda = 0.11 \cdot \left( \frac{\Delta_E}{d} \right)^{0.25} \quad (1.3.8)$$

де  $\Delta_E$  – еквівалента абсолютна шорсткість (приймається на рівні 0.3 мм), мм.

Припущення щодо застосування формули Альтшуля базується на фактичних гідравлічних режимах теплових мереж, для яких характерні параметри роботи знаходяться на в зоні гідравлічно шорстких труб (при швидкостях руху теплоносія, які перевищують близько 1.1-1.2 м/с).

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Число Рейнольдса визначається класичною залежністю:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu},$$

де  $\nu$  – кінематична в'язкість теплоносія, приймається на рівні 0.413 (при температурі 70 °C), м<sup>2</sup>/с.

Таким чином залежність (1.3.7) варто замінити наступною:

$$E_{CO_2eq,pump} = \frac{0.11 \cdot \pi \cdot L \cdot \rho}{8 \cdot \eta} \cdot \tau \cdot 10^{-3} \cdot EF_{CO_2eq,el.prod} \cdot d \cdot v^3 \cdot \left(\frac{\Delta_E}{d}\right)^{0.25},$$

$$E_{CO_2eq,pump} = \frac{\pi \cdot L \cdot \rho}{72.7 \cdot \eta} \cdot \tau \cdot 10^{-3} \cdot EF_{CO_2eq,el.prod} \cdot v^3 \cdot (d^3 \cdot \Delta_E)^{0.25}, \quad (1.3.9)$$

$$E_{CO_2eq,pump} = \frac{\pi \cdot L \cdot \rho}{72.7 \cdot \eta} \Delta_E^{0.25} \cdot \tau \cdot 10^{-3} \cdot EF_{CO_2eq,el.prod} \cdot v^3 \cdot d^{0.75}.$$

Викиди парникових газів, пов'язані з втратою теплової енергії на ділянці в наслідок тепловіддачі від поверхні трубопроводу до навколишнього середовища, кг CO<sub>2</sub>-екв. Можуть бути розраховані наступним чином:

$$E_{CO_2eq,heatloss} = FC_{heatloss} \cdot EF_{CO_2eq,heatloss}, \quad (1.3.10)$$

де  $FC_{heatloss}$  – втрати теплової енергії, ТДж;

$EF_{CO_2eq,heatloss} = EF_{CO_2eq,fuel}$  – коефіцієнт викидів парниковий газів пов'язаних з втратами теплової енергії на ділянці, який рівний коефіцієнту викидів парникових газів, пов'язаний з генерацією теплової енергії на джерелі централізованої системи тепlopостачання, кг CO<sub>2</sub>-екв./ТДж.

Для фізичної моделі, поданої вище (Рисунок 1.3) формула (1.3.10) може бути трансформована наступним чином:

$$E_{CO_2eq,heatloss} = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{loss} \cdot EF_{CO_2eq,fuel} \cdot \tau, \quad (1.3.11)$$

де  $Q_{loss}$  – втрати теплової енергії через поверхню трубопроводу, кВт.

$EF_{CO_2eq,heatloss} = EF_{CO_2eq,fuel}$  – коефіцієнт викидів парниковий газів пов'язаних з втратами теплової енергії на ділянці, який рівний коефіцієнту викидів парникових газів, пов'язаний з генерацією теплової енергії на джерелі централізованої системи тепlopостачання, кг CO<sub>2</sub>-екв./ТДж.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З урахуванням втрат теплової енергії через поверхню трубопроводу згідно закону Ньютона-Ріхмана [23] із рівняння (1.3.11) отримаємо:

$$E_{CO_2eq,heatloss} = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha \cdot \pi \cdot d_{ins} \cdot L \cdot (t_{c.t.} - t_{зов}) \cdot 10^{-3} \cdot EF_{CO_2eq,fuel} \cdot \tau, \quad (1.3.12)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$t_{c.t.}$  – середня температура середовища, К;

$t_{зов}$  – зовнішня температура, К;

$d_{ins}$  – зовнішній діаметр теплової ізоляції, м.

Незручність залежності (1.3.12) пов'язана з невідомим значенням товщини теплової ізоляції та варіативними значеннями коефіцієнту тепловіддачі. В даній масштабованій задачі немає мети розраховувати оптимальну товщину теплової ізоляції, чому вже й так присвячена значна кількість праць [24-26]. Тому замість залежності (1.3.12) застосуємо підхід через нормативні втрати теплової енергії:

$$E_{CO_2eq,heatloss} = q_{spec} \cdot L \cdot EF_{CO_2eq,fuel} \cdot \tau, \quad (1.3.13)$$

де  $q_{spec}$  – нормативний питомий тепловий потік, Вт/м [27].

Для можливості представлення нормативного теплового потоку через діаметр трубопроводу, проаналізуємо Таблицю 3.1 Питомі показники густини теплового потоку через ізольовану поверхню трубопроводів при двотрубному підземному безканальному прокладанні та при прокладанні в непрохідних каналах з розрахунковою середньорічною температурою ґрунту +5 °С на глибині закладання трубопроводів [27] та отримаємо штучну наближену формулу для розрахунку нормативного теплового потоку:

$$q_{spec} = 348 \cdot d^{0.5}, \quad (1.3.14)$$

Тоді остаточною залежністю для визначення викидів буде такою:

$$E_{CO_2eq,heatloss} = 3,6 \cdot 10^{-9} \cdot 348 \cdot d^{0.5} \cdot L \cdot EF_{CO_2eq,fuel} \cdot \tau, \quad (1.3.15)$$

$$E_{CO_2eq,heatloss} = 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot d^{0.5} \cdot L \cdot EF_{CO_2eq,fuel} \cdot \tau, \quad (1.3.16)$$

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Викиди парникових газів, пов'язані з генерацією теплової енергії на джерелі централізованої системи тепlopостачання можуть бути розраховані згідно залежності [28]:

$$E_{CO_2eq,fuel} = FC_{fuel} \cdot EF_{CO_2eq,fuel}, \quad (1.3.17)$$

де  $FC_{fuel}$  – витрата палива, ТДж;

$EF_{CO_2eq,fuel}$  – коефіцієнт викидів парникових газів, пов'язаний з генерацією теплової енергії на джерелі централізованої системи тепlopостачання, кг CO<sub>2</sub>-екв./ТДж.

Для фізичної моделі, поданої вище (Рисунок 1.3.1) формула (1.3.17) може бути трансформована наступним чином:

$$E_{CO_2eq,fuel} = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot Q_1 \cdot \tau \cdot EF_{CO_2eq,fuel}, \quad (1.3.18)$$

де  $Q_1$  – вхідна теплова потужність системи, кВт;

$\tau$  – значення періоду роботи системи тепlopостачання, в даному дослідженні приймається рівним 1 год.

З урахуванням втрат теплової енергії на ділянці із залежності отримаємо:

$$E_{CO_2eq,fuel} = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot (Q_2 + 348 \cdot d^{0.5} \cdot L \cdot 10^{-3}) \cdot \tau \cdot EF_{CO_2eq,fuel}, \quad (1.3.19)$$

де  $Q_2$  – кінцева (вихідна) теплова потужність системи, кВт;

$d$  – діаметр трубопроводу, м;

Сумарні викиди парникових газів, пов'язані з доставкою матеріалів лінійних частин трубопроводів на ділянку будівництва можуть бути розраховані наступним чином:

$$E_{CO_2eq,log} = FC_{log} \cdot EF_{CO_2eq,log} \cdot \frac{\tau}{T}, \quad (1.3.20)$$

Для фізичної моделі, поданої на Рисунок 1.3.1 Фізична модель формула (1.3.20) може бути трансформована наступним чином:

$$E_{CO_2eq,log} = \pi \cdot \vartheta \cdot (d + \vartheta) \cdot L \cdot \rho_{steel} \cdot L_{LOG} \cdot EF_{CO_2eq,log} \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\tau}{T}, \quad (1.3.21)$$

де  $EF_{CO_2eq,log}$  – коефіцієнт викидів парникових газів пов'язаний з транспортуванням труб. кг CO<sub>2</sub>екв /км

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$L_{LOG}$  – довжина логістичних маршрутів, км;

$T$  – термін експлуатації теплових мереж централізованого теплопостачання, років.

$$E_{CO_2eq,manuf} = FC_{manuf} \cdot EF_{CO_2eq,manuf} \cdot \frac{\tau}{T}, \quad (1.3.22)$$

Для фізичної моделі, поданої вище (Рисунок 1.3) формула (1.3.22) може бути трансформована наступним чином:

$$E_{CO_2eq,manuf} = \pi \cdot \vartheta \cdot (d + \vartheta) \cdot L \cdot \rho_{steel} \cdot 10^{-3} \cdot EF_{CO_2eq,manuf} \cdot \frac{\tau}{T}, \quad (1.3.23)$$

де  $EF_{CO_2eq,manuf}$  – коефіцієнт викидів парникових газів пов'язаний з первинними процесами виробництва сталі, кг CO<sub>2</sub>екв/т;

$d$  – діаметр трубопроводу внутрішній (умовний), м;

$\vartheta$  – товщина стінки труби, м;

$l$  – довжина ділянки трубопроводу, м;

$\rho_{steel}$  – густина сталі, кг/м<sup>3</sup>.

Враховуючи залежності (1.3.1), (1.3.7), (1.3.12), (1.3.19), (1.3.21), (1.3.23) маємо зведену цільову функцію наступного вигляду:

$$\begin{aligned} E_{CO_2eq,DH} = & \frac{\pi \cdot L \cdot \rho}{72.7 \cdot \eta} \Delta_E^{0.25} \cdot \tau \cdot 10^{-3} \cdot EF_{CO_2eq,el,prod} \cdot v^3 \cdot d^{0.75} + 1.25 \cdot \\ & 10^{-6} \cdot d^{0.5} \cdot L \cdot EF_{CO_2eq,fuel} \cdot \tau + 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot (Q_2 + 348 \cdot d^{0.5} \cdot L \cdot 10^{-3}) \cdot \\ & \tau \cdot EF_{CO_2eq,fuel} + \pi \cdot \vartheta \cdot (d + \vartheta) \cdot L \cdot \rho_{steel} \cdot L_{LOG} \cdot EF_{CO_2eq,log} \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\tau}{T} + \\ & \pi \cdot \vartheta \cdot (d + \vartheta) \cdot L \cdot \rho_{steel} \cdot 10^{-3} \cdot EF_{CO_2eq,manuf} \cdot \frac{\tau}{T}, \end{aligned} \quad (1.3.24)$$

Приведемо залежність до функціонального вигляду:

$$\begin{aligned} E_{CO_2eq,DH}(d, v) = & \left( \frac{\pi \cdot L \cdot \rho}{72.7 \cdot \eta} \Delta_E^{0.25} \cdot \tau \cdot 10^{-3} \cdot EF_{CO_2eq,el,prod} \right) \cdot v^3 \cdot d^{0.75} + \\ & (1.25 \cdot 10^{-6} \cdot L \cdot EF_{CO_2eq,fuel} \cdot \tau) \cdot d^{0.5} + (3,6 \cdot 10^{-6} \cdot \tau \cdot EF_{CO_2eq,fuel}) \cdot \\ & (Q_2 + 348 \cdot d^{0.5} \cdot L \cdot 10^{-3}) + \left( \pi \cdot \vartheta \cdot L \cdot \rho_{steel} \cdot L_{LOG} \cdot EF_{CO_2eq,log} \cdot 10^{-3} \cdot \right. \\ & \left. \frac{\tau}{T} \right) \cdot (d + \vartheta) + \left( \pi \cdot \vartheta \cdot L \cdot \rho_{steel} \cdot 10^{-3} \cdot EF_{CO_2eq,manuf} \cdot \frac{\tau}{T} \right) \cdot (d + \vartheta), \end{aligned} \quad (1.3.25)$$

Для спрощення вигляду функції проведемо заміну:

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$K1 = \frac{\pi \cdot L \cdot \rho}{72.7 \cdot \eta} \Delta_E^{0.25} \cdot \tau \cdot 10^{-3} \cdot EF_{CO_2eq,el.prod} \quad (1.3.26)$$

$$K2 = 1.25 \cdot 10^{-6} \cdot L \cdot EF_{CO_2eq,fuel} \cdot \tau \quad (1.3.27)$$

$$K3 = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot \tau \cdot EF_{CO_2eq,fuel} \quad (1.3.28)$$

$$K4 = \pi \cdot \vartheta \cdot L \cdot \rho_{steel} \cdot L_{LOG} \cdot EF_{CO_2eq,log} \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\tau}{T} \quad (1.3.29)$$

$$K5 = \pi \cdot \vartheta \cdot L \cdot \rho_{steel} \cdot 10^{-3} \cdot EF_{CO_2eq,manuf} \cdot \frac{\tau}{T} \quad (1.3.30)$$

Спрощений вигляд має наступний вигляд:

$$E_{CO_2eq,DH} = K1 \cdot v^3 \cdot d^{0.75} + K2 \cdot d^{0.5} + K3 \cdot (Q_2 + 348 \cdot d^{0.5} \cdot L \cdot 10^{-3}) + K4 \cdot (d + \vartheta) + K5 \cdot (d + \vartheta) \quad (1.3.31)$$

$$E_{CO_2eq,DH} = K1 \cdot v^3 \cdot d^{0.75} + K2 \cdot d^{0.5} + K3 \cdot (Q_2 + 348 \cdot d^{0.5} \cdot L \cdot 10^{-3}) + (K4 + K5) \cdot (d + \vartheta) \quad (1.3.32)$$

Враховуючи, що потужність може бути визначена згідно залежності:

$$Q_2 = G \cdot c \cdot (T_2 - T_1), \quad (1.3.33)$$

$$Q_2 = G \cdot c \cdot (T_2 - T_1) = G_{vol} \cdot \rho \cdot c \cdot (T_2 - T_1) = \frac{\rho \cdot v \cdot \pi \cdot d^2}{4} \cdot c \cdot (T_2 - T_1), \quad (1.3.34)$$

де  $G$  – масова витрата теплоносія,  $\frac{кг}{с}$ ,

$c$  – теплоємність теплоносія,  $кДж/кг^{\circ}C$ ,

$T_2$  і  $T_1$  – температура в подавальному і зворотному трубопроводах,  $^{\circ}C$ ,

Обмеження цільової функції:

$$\begin{cases} d > 0, \\ v > 0, \\ d^2 \cdot v \geq \frac{4 \cdot Q_2}{\pi \cdot c \cdot (t_1 - t_2) \cdot \rho} \end{cases}, \quad (1.3.35)$$

де  $c$  – теплоємність теплоносія,  $кДж/кг^{\circ}C$ ;  $t_1$  і  $t_2$  – відповідно температура теплоносія в подавальному і зворотному трубопроводах теплової мережі.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Розділ 2

### Комп'ютерне моделювання цільової функції за допомогою програмного забезпечення SciLAB

Студент

Михайлишин В.А.

Керівник

Погосов О.Г

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 Комп'ютерне моделювання цільової функції за допомогою програмного забезпечення SciLAB

### 2.1 Програмна реалізація моделі: код у середовищі SciLAB.

Щоб дослідити залежність викидів парникових газів від параметрів трубопроводу та гідравлічних режимів, що є важливим для оцінки екологічної ефективності систем централізованого тепlopостачання, реалізуємо у середовищі SciLAB 2025.1.0, побудову тривимірного графіка, функції:

$$E_{CO_2eq,DH} = K1 \cdot v^3 \cdot d^{0.75} + K2 \cdot d^{0.5} + K3 \cdot (Q_2 + 348 \cdot d^{0.5} \cdot L \cdot 10^{-3}) \quad (1.3.32) \\ + (K4 + K5) \cdot (d + \vartheta)$$

Наведений нижче програмний код реалізує комплексну модель формування сумарних питомих викидів парникових газів у системах тепlopостачання централізованого типу. Він враховує як енергетичні втрати під час транспортування теплоносія, так і життєвий цикл трубопроводів (виробництво, логістика, експлуатація).

Загальний вигляд програмного коду:

```
// Введення параметрів користувачем
```

```
Q2 = input("Введіть потужність приєднаного абонента (Q2, кВт): ");
```

```
// Константи
```

```
lambda = 0.045 * 10^(-3); // теплопровідність утеплювача, кВт/м°C
```

```
tau = 1; // час, година
```

```
eta = 0.95; // ККД
```

```
rho = 1000; // густина теплоносія, кг/м³
```

```
rho_steel = 7800; // густина сталі, кг/м³
```

```
d_thickness = 0.005; // товщина стінки трубопроводу, м
```

```
EFelprod = 0.0003; // тCO2/кВт*год
```

```
EFfuel = 0.771 / (4.186 * 10^6 / 3600); // тCO2/кВт*год
```

```
EFlog = 3 * 10^(-3); // тCO2/км
```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

EFmanuf = 1.6; // mCO2/m

t9 = 40;

t8 = 0;

L = 1000;

T1 = 90;

T2 = 70;

alpha = 0.015;

T = 500000;

LLOG = 50;

// Розрахунок коефіцієнтів

K1 = ((%pi \* lambda \* L \* rho) / (8 \* eta)) \* 10<sup>(-3)</sup> \* EFelprod \* tau;

K2 = 7.2 \* 10<sup>(-6)</sup> \* alpha \* %pi \* L \* (t9 - t8) \* 10<sup>(-3)</sup> \* EFfuel \* tau;

K3 = 3.6 \* 10<sup>(-6)</sup> \* Q2 \* EFfuel \* tau;

K4 = LLOG \* EFlog \* tau / T;

K5 = (-%pi / 4) \* d\_thickness<sup>2</sup> \* L \* rho\_steel \* 10<sup>(-3)</sup> \* EFmanuf \* tau / T;

K6 = (%pi / 2) \* d\_thickness \* L \* rho\_steel \* 10<sup>(-3)</sup> \* EFmanuf \* tau / T;

// Діапазон діаметрів і швидкостей з меншим кроком

d\_vals = -0.5:0.0125:0.5; // м (від -0.5 до 0.5 з кроком 0.0125, 81 значення)

v\_vals = -10:0.125:10; // м/с (від -10 до 10 з кроком 0.125, 161 значення)

// Створюємо сітку

[DD, VV] = meshgrid(d\_vals, v\_vals);

// Перевірка розмірів сітки

disp("Розмір DD: "); disp(size(DD)); // 161x81

disp("Розмір VV: "); disp(size(VV)); // 161x81

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

// Створюємо матрицю значень функції E (векторизована форма)
E = K1 * DD .* VV.^3 + (K2 + K6) * DD + K3 + K4 + K5;
// Перевірка розміру E
disp("Розмір E: "); disp(size(E)); // 161x81

// Розрахунок порогового значення для умови
threshold = 4 * Q2 / (13444 * (T1 - T2));
disp("Threshold: "); disp(threshold);

// Створюємо матрицю кольорів розміром (length(v_vals)-1) x (length(d_vals)-1)
colors = ones(length(v_vals)-1, length(d_vals)-1); // Розмір 160x80
for i = 1:length(v_vals)-1
    for j = 1:length(d_vals)-1
        // Використовуємо середні значення між сусідніми точками сітки
        D_avg = (DD(i,j) + DD(i,j+1) + DD(i+1,j) + DD(i+1,j+1)) / 4;
        V_avg = (VV(i,j) + VV(i,j+1) + VV(i+1,j) + VV(i+1,j+1)) / 4;
        if D_avg >= 0 & V_avg >= 0
            if (D_avg^2) * V_avg > threshold
                colors(i,j) = 3; // Червоний колір для (D^2)*V > threshold
            else
                colors(i,j) = 2; // Зелений колір для D ≥ 0, V ≥ 0, але (D^2)*V ≤ threshold
            end
        else
            colors(i,j) = 1; // Білий колір для від'ємних D або V
        end
    end
end
end
end

```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

// Перевірка розміру colors
disp("Розмір colors: "); disp(size(colors)); // 160x80

// Побудова поверхні з використанням surf
clf(); // Очистити поточну
surf(d_vals, v_vals, E, colors);

// Налаштування колірної карти (1 - білий, 2 - зелений, 3 - червоний)
colormap([1, 1, 1; 0, 1, 0; 1, 0, 0]); // Білий, зелений, червоний

// Налаштування назв вісей і самого графіку
xlabel('Діаметр трубопроводу, d, м');
ylabel('Швидкість теплоносія, v, м/с');
zlabel('Викиди ПГ, т CO2екв');
title('Функція сумарних питомих викидів парникових газів при постачанні теплової енергії ЦТ');

// Знаходження мінімального E у червоній зоні з обмеженням  $D \geq 0$  і  $V \geq 0$ 
red_zone_mask = (DD.^2 .* VV > threshold) & (DD >= 0) & (VV >= 0); // Маска для червоної зони
E_red_zone = E(red_zone_mask); // Витягуємо E для червоної зони

if ~isempty(E_red_zone)
    [min_E, idx] = min(E_red_zone); // Знаходимо мінімальне E і його індекс
    D_min = DD(red_zone_mask)(idx); // Відповідне D
    V_min = VV(red_zone_mask)(idx); // Відповідне V

```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

*// Виведення результатів*

```
disp("Мінімальне E у червоній зоні: "); disp(min_E);
```

```
disp("Відповідне D: "); disp(D_min);
```

```
disp("Відповідне V: "); disp(V_min);
```

else

```
disp("Червона зона порожня! Жодна точка не відповідає умові  $(D^2) \cdot V >$   
threshold,  $D \geq 0$ ,  $V \geq 0$ .");
```

end

Для кожного фрагмента наводиться розгорнене пояснення фізичного змісту, причин використання певних формул та того, як ці обчислення впливають на кінцеву цільову функцію  $E(d, v)$ .

## 2.2 Введення параметрів користувача.

*// Введення параметрів користувачем*

```
Q2 = input("Введіть потужність приєднаного абонента (Q2, кВт): ");
```

Пояснення:

Цей фрагмент дозволяє моделі адаптуватися під реальні умови конкретного теплового навантаження.

Параметр  $Q_2$  (кВт) – це потужність, яку повинен отримувати споживач теплової енергії. Вона залежить від тепловтрат будівель, кліматичних умов, теплового навантаження в годину максимального споживання тощо.

Дані, що вводяться користувачем, інтегруються у подальші формули, визначаючи величину необхідного теплового потоку, а отже – умови циркуляції теплоносія.

Параметр  $Q_2$  безпосередньо впливає:

- На величину теплоносія;
- На технологічну умову  $(d^2) \cdot v > \text{threshold}$ ;
- На рівень викидів, пов'язаний із генеруванням теплової енергії.

Таким чином, введення  $Q_2$  робить модель універсальною та придатною для аналізу різних об'єктів теплоенергетики.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 2.3 Задання фізичних, матеріальних та екологічних констант.

// *Константи*

$\lambda = 0.045 * 10^{(-3)}$ ; // *теплопровідність утеплювача, кВт/м°C*

$\tau = 1$ ; // *час, година*

$\eta = 0.95$ ; // *ККД*

$\rho = 1000$ ; // *густина теплоносія, кг/м<sup>3</sup>*

$\rho_{\text{steel}} = 7800$ ; // *густина сталі, кг/м<sup>3</sup>*

$d_{\text{thickness}} = 0.005$ ; // *товщина стінки трубопроводу, м*

$E_{\text{Felprod}} = 0.0003$ ; // *тCO<sub>2</sub>/кВт\*год*

$E_{\text{Fuel}} = 0.771 / (4.186 * 10^6 / 3600)$ ; // *тCO<sub>2</sub>/кВт\*год*

$E_{\text{Flog}} = 3 * 10^{(-3)}$ ; // *тCO<sub>2</sub>/км*

$E_{\text{Fmanuf}} = 1.6$ ; // *тCO<sub>2</sub>/т*

$t_9 = 40$ ;

$t_8 = 0$ ;

$L = 1000$ ;

$T_1 = 90$ ;

$T_2 = 70$ ;

$\alpha = 0.015$ ;

$T = 500000$ ;

$LLOG = 50$ ;

Пояснення:

У цьому фрагменті закладено всі основні сталі параметри, що визначають умови теплообміну, властивості теплоносія, параметри матеріалів труб та екологічні характеристики процесів генерації і логістики.

Значення параметрів та їх ролі у моделі:

$E$  – сумарні питомі викиди парникових газів, пов'язані з постачанням теплової енергії, [т CO<sub>2</sub>-екв],

$d$  – умовний діаметр трубопроводу, [м],

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$v$  – швидкість теплоносія, [м/с].

Для написання коду програми та подальших розрахунків потрібно ввести вихідні дані та параметри, а саме:

$Q_2$  – потужність приєднаного абонента, [кВт],

$t_9$  – температура стінки трубопроводу, [°C],

$t_8$  – температура навколишнього середовища, [°C],

$L$  – довжина ділянки трубопроводу, [м],

$T_1, T_2$  – температури теплоносія в подаючому та зворотному трубопроводах, [°C],

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, [кВт/(м<sup>2</sup>·°C)],

$T$  – термін експлуатації системи, [год],

$L_{log}$  – довжина логістичних маршрутів, [км].

Окрім вихідних даних, для правильного рішення, в програмний код записуємо фізичні та емісійні коефіцієнти:

$\lambda=0.045 \cdot 10^{-3}$  кВт/(м·°C) – теплопровідність утеплювача, яка визначає, наскільки інтенсивно тепло витікає з трубопроводу в навколишнє середовище. Чим менше  $\lambda$ , тим краще ізоляція;

$\tau=1$  год – часовий інтервал, на який нормується обчислення енергії та викидів;

$\eta=0.95$  – ефективність теплового обладнання; через ККД враховується збільшення теплового навантаження на генерацію;

$\rho=1000$  кг/м<sup>3</sup> – густина води; використовується для розрахунку маси та енергії теплоносія, що рухається трубою;

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\rho_{steel} = 7800 \text{ кг/м}^3$  – густина сталі, необхідна для розрахунку викидів на виробництво труб;

$d_{thickness} = 0.005 \text{ м}$  – товщина сталеві стінки трубопроводу, яка визначає масу металу на одиницю довжини;

$EF_{elprod} = 0.0003 \text{ т CO}_2/\text{кВт}\cdot\text{год}$  – емісійний фактор виробництва електроенергії,

$EF_{fuel} = (4.186 \cdot 10^6 / 3600) \cdot 0.771 \text{ т CO}_2/\text{кВт}\cdot\text{год}$  – емісійний фактор спалювання палива,

$EF_{log} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ т CO}_2/\text{км}$  – емісійний фактор транспортування,

$EF_{manuf} = 1.6 \text{ т CO}_2/\text{т}$  – емісійний фактор виробництва сталі.

Це робить модель кліматично повною.

Усі ці параметри дозволяють зробити модель реалістичною і максимально наближеною до інженерних розрахунків тепломереж.

#### 2.4 Обчислення коефіцієнтів цільової функції.

Маючи вихідні дані, та основну функцію, можна переходити до визначення коефіцієнтів, котрі характеризують вплив різних сумарних складових на сумарні викиди:

$$K1 = \frac{\pi \cdot L \cdot \rho}{72.7 \cdot \eta} \Delta_E^{0.25} \cdot \tau \cdot 10^{-3} \cdot EF_{CO_2eq,el.prod} \quad (1.3.26)$$

$$K2 = 1.25 \cdot 10^{-6} \cdot L \cdot EF_{CO_2eq,fuel} \cdot \tau \quad (1.3.27)$$

$$K3 = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot \tau \cdot EF_{CO_2eq,fuel} \quad (1.3.28)$$

$$K4 = \pi \cdot \partial \cdot L \cdot \rho_{steel} \cdot L_{LOG} \cdot EF_{CO_2eq,log} \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\tau}{T} \quad (1.3.29)$$

$$K5 = \pi \cdot \partial \cdot L \cdot \rho_{steel} \cdot 10^{-3} \cdot EF_{CO_2eq,manuf} \cdot \frac{\tau}{T} \quad (1.3.30)$$

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фрагмент коду:

// Розрахунок коефіцієнтів

$$K1 = ((\pi * \lambda * L * \rho) / (8 * \eta)) * 10^{(-3)} * EF_{elprod} * \tau;$$

$$K2 = 7.2 * 10^{(-6)} * \alpha * \pi * L * (t9 - t8) * 10^{(-3)} * EF_{fuel} * \tau;$$

$$K3 = 3.6 * 10^{(-6)} * Q2 * EF_{fuel} * \tau;$$

$$K4 = L_{LOG} * EF_{log} * \tau / T;$$

$$K5 = (-\pi / 4) * d_{thickness}^2 * L * \rho_{steel} * 10^{(-3)} * EF_{manuf} * \tau / T;$$

$$K6 = (\pi / 2) * d_{thickness} * L * \rho_{steel} * 10^{(-3)} * EF_{manuf} * \tau / T;$$

У цьому блоці формується аналітичне представлення цільової функції, яка є складним поєднанням різних фізичних аспектів роботи теплової мережі. Кожен коефіцієнт відповідає певному компоненту викидів.

Детальна інтерпретація коефіцієнтів:

$K_1$  – втрати теплоти через теплопровідність і відповідні електричні викиди.

Цей коефіцієнт враховує:

- довжину (L);
- теплопровідність утеплювача ( $\lambda$ );
- втрати через неідеальний ККД ( $\eta$ );
- густину води ( $\rho$ );
- вплив необхідної електричної енергії на перекачку теплоносія.

$K_2$  – тепловтрати в ґрунт та пов'язані з ними викиди.

Залежить від температурного перепаду між теплоносієм і середовищем, та параметра теплообміну ( $\alpha$ ).

$K_3$  – викиди, пов'язані з подачею теплової потужності  $Q_2$ .

Чим більше навантаження абонента, тим більші викиди енергоустановки.

$K_4$  – логістичні (транспортні) викиди.

Враховує доставку матеріалів або обладнання (через  $L_{LOG}$ ).

$K_5$  та  $K_6$  – викиди виробництва сталевих труб.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це найбільш матеріаломісткі коефіцієнти, які враховують масу металу в трубі та її виготовлення

$K_5$  – відповідає масі сталі стінки труби;

$K_6$  – масі поверхневого шару металу.

2.5 Задання діапазонів параметрів і побудова сітки.

Фрагмент коду:

```
// Діапазон діаметрів і швидкостей з меншим кроком
```

```
d_vals = -0.5:0.0125:0.5; // м (від -0.5 до 0.5 з кроком 0.0125, 81 значення)
```

```
v_vals = -10:0.125:10; // м/с (від -10 до 10 з кроком 0.125, 161 значення)
```

```
// Створюємо сітку
```

```
[DD, VV] = meshgrid(d_vals, v_vals);
```

Модель аналізує дуже широкий спектр значень діаметра та швидкості. Це потрібно для:

- побудови повної карти поведінки цільової функції,
- можливості графічно відобразити область допустимих значень,
- пошуку мінімумів у складній нелінійній області.

Meshgrid створює дві великі матриці ( $161 \times 81$ ), у яких кожен елемент відповідає певній комбінації  $ddd$  та  $vvv$ . Це дозволяє обчислювати функцію  $E$  на всій області визначення без циклів.

Побудова розрахункової сітки графіка, виконується за діаметром трубопроводу, що має діапазон від  $-0,5$  м до  $0,5$  м з кроком  $0,0125$  м.

За швидкістю теплоносія, варіюється від  $-10$  м/с до  $10$  м/с з кроком  $0,0125$  м/с.

2.6 Обчислення цільової функції в усіх точках сітки.

Фрагмент коду:

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

*// Створюємо матрицю значень функції E (векторизована форма)*

$E = K1 * DD .* VV.^3 + (K2 + K6) * DD + K3 + K4 + K5;$

*// Перевірка розміру E*

`disp("Розмір E: "); disp(size(E)); // 161x81`

Тут формується повне поле значень викидів, яке залежить як від гідравлічних параметрів ( $v^3$ ), так і від геометрії ( $d$ ).

Фізичне значення компонентів:

### **Член $K1 * DD .* VV.^3$**

Це найбільш нелінійний та фізично «важкий» компонент моделі. Він враховує витрати енергії на перекачування теплоносія.

Опір руху пропорційний:

- діаметру ( $d$ ) (геометрія трубопроводу),
- кубу швидкості ( $v^3$ ) (гідравліка турбулентного режиму).

### **Лінійний член $(K2 + K6) * DD$**

Поєднує:

- втрати теплоти у ґрунт;
- масу сталевого матеріалу;
- виробничі викиди.

### **Постійна частина $K3 + K4 + K5$**

Це викиди, що не змінюються від  $d$  і  $v$ , але залежать від навантаження і матеріалів.

## **2.7 Обчислення порогового значення технологічного обмеження.**

Фрагмент коду:

*// Розрахунок порогового значення для умови*

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
threshold = 4 * Q2 / (13444 * (T1 - T2));
```

```
disp("Threshold: "); disp(threshold);
```

Створюється двовимірна сітка значень, котра обчислює значення функції.

Програма визначає поріг:

$$\text{Threshold} = \frac{4 \cdot Q}{13444 \cdot (T_1 - T_2)}$$

## 2.8 Формування кольорової карти технологічних областей.

В кодї за логіку формування кольорової карти технологічних областей відповідає наступний блок циклів:

```
// Створюємо матрицю кольорів розміром (length(v_vals)-1) x (length(d_vals)-1)
```

```
colors = ones(length(v_vals)-1, length(d_vals)-1); // Розмір 160x80
```

```
for i = 1:length(v_vals)-1
```

```
    for j = 1:length(d_vals)-1
```

```
        // Використовуємо середні значення між сусідніми точками сітки
```

```
        D_avg = (DD(i,j) + DD(i,j+1) + DD(i+1,j) + DD(i+1,j+1)) / 4;
```

```
        V_avg = (VV(i,j) + VV(i,j+1) + VV(i+1,j) + VV(i+1,j+1)) / 4;
```

```
        if D_avg >= 0 & V_avg >= 0
```

```
            if (D_avg^2) * V_avg > threshold
```

```
                colors(i,j) = 3; // Червоний колір для (D^2)*V > threshold
```

```
            else
```

```
                colors(i,j) = 2; // Зелений колір для D ≥ 0, V ≥ 0, але (D^2)*V ≤ threshold
```

```
            end
```

```
        else
```

```
            colors(i,j) = 1; // Білий колір для від'ємних D або V
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

// Перевірка розміру colors

```
disp("Розмір colors: "); disp(size(colors)); // 160x80
```

Цей цикл визначає, до якої області належить кожна комірка:

- Біла – фізично недопустимі значення, тобто від'ємні значення  $d$  або  $v$ ;
- Зелена – фізично допустимо, але технологічне обмеження не виконано,  $d \geq 0$ ,  $v \geq 0$ ,  $(d^2) \cdot v \leq \text{threshold}$ ;
- Червона – область, де теплова потужність може бути передана трубопроводом  $d \geq 0$ ,  $v \geq 0$ ,  $(d^2) \cdot v > \text{threshold}$  (тобто зона, що перевищує допустиме навантаження).

Використання середніх значень  $D_{avg}$ ,  $V_{avg}$  робить модель стабільною та забезпечує коректне згладжування кольорів, особливо на межах зон.

## 2.9 Побудова тривимірної поверхні $E(d, v)$ .

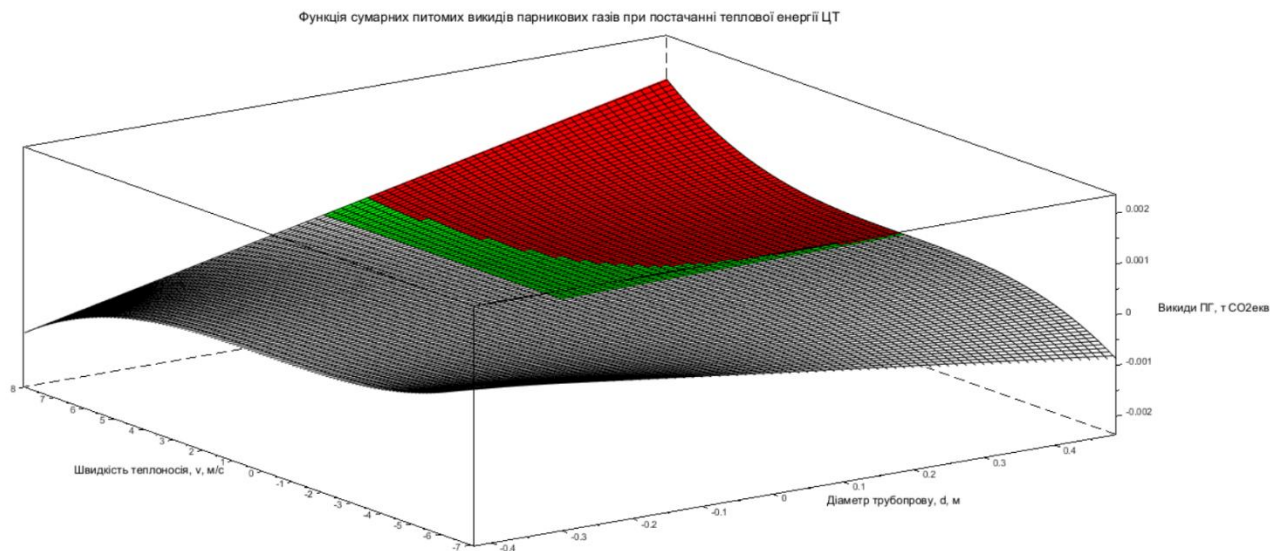


Рисунок 2.9.1 Тривимірна поверхня  $E(d, v)$

Фрагмент коду:

```
// Побудова поверхні з використанням surf
```

```
clf(); // Очистити поточну
```

```
surf(d_vals, v_vals, E, colors);
```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

*// Налаштування колірної карти (1 - білий, 2 - зелений, 3 - червоний)*

colormap([1, 1, 1; 0, 1, 0; 1, 0, 0]); *// Білий, зелений, червоний*

*// Налаштування назв вісей і самого графіку*

xlabel('Діаметр трубопроводу, d, м');

ylabel('Швидкість теплоносія, v, м/с');

zlabel('Викиди ПГ, т CO<sub>2</sub>екв');

title('Функція сумарних питомих викидів парникових газів при постачанні теплової енергії ЦТ');

Цей блок створює візуальне представлення енергетично-кліматичної моделі. Кольори накладаються на поверхню, дозволяючи:

- миттєво ідентифікувати допустиму область параметрів,
- порівнювати режими роботи,
- бачити структуру мінімумів

## 2.10 Пошук оптимуму в допустимій (червоній) області.

Фрагмент коду:

*// Налаштування назв вісей і самого графіку*

xlabel('Діаметр трубопроводу, d, м');

ylabel('Швидкість теплоносія, v, м/с');

zlabel('Викиди ПГ, т CO<sub>2</sub>екв');

title('Функція сумарних питомих викидів парникових газів при постачанні теплової енергії ЦТ');

*// Знаходження мінімального E у червоній зоні з обмеженням  $D \geq 0$  і  $V \geq 0$*

*red\_zone\_mask = (DD.^2 .\* VV > threshold) & (DD >= 0) & (VV >= 0); // Маска для червоної зони*

*E\_red\_zone = E(red\_zone\_mask); // Витягуємо E для червоної зони*

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
if ~isempty(E_red_zone)
```

```
    [min_E, idx] = min(E_red_zone); // Знаходимо мінімальне E і його індекс
```

```
    D_min = DD(red_zone_mask)(idx); // Відповідне D
```

```
    V_min = VV(red_zone_mask)(idx); // Відповідне V
```

Це завершальний етап – процедура оптимізації.

Алгоритм:

1. Формується логічна маска червоної зони.
2. Із неї вилучаються всі значення E.
3. Серед них знаходиться мінімум.
4. Визначаються відповідні значення D і V.

Таким чином програма визначає комбінацію геометричних і гідравлічних параметрів, яка мінімізує кліматичний вплив системи тепlopостачання.

Тобто, вкінці отримуємо вихідні результати:

- 3D графік залежності  $E(d,v)$  з кольоровим виділенням зон.
- Вивід мінімального значення E у червоній зоні з відповідними d та v.
- Таблиця значень коефіцієнтів  $K_1 \dots K_6$ , що дозволяє відтворити результати.

Тобто, за допомогою цієї програми ми маємо змогу оцінити екологічну ефективність систем тепlopостачання залежно від діаметра трубопроводу та швидкості теплоносія. Виконати параметричний аналіз впливу гідравлічних режимів на сумарні викиди ПГ. Визначити зону оптимальних режимів роботи мережі, при яких екологічне навантаження мінімізується.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### Розділ 3

Перевірка чисельного методу – методом математичного апарату

Студент

Михайлишин В.А.

Керівник

Погосов О.Г

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3 Перевірка чисельного методу - методом математичного апарату.

Для розв'язання задачі оптимізації цільової функції математичним апаратом використаємо аналітичний підхід, який базується на методах математичного аналізу, зокрема на знаходженні екстремумів функції з урахуванням обмежень. Цільова функція в даному кодї описує сумарні питомі викиди парникових газів (E) залежно від діаметра трубопроводу (d) і швидкості теплоносія (v). Ми використаємо методи оптимізації з урахуванням нелінійного обмеження.

#### 3.1 Формулювання задачі.

Цільова функція яку потрібно мінімізувати:

$$E_{CO_2eq,DH} = K1 \cdot d \cdot v^3 + (K2 + K6) \cdot d + K3 + K4 + K5 \quad (3.1.1)$$

Де

$$\frac{\pi \cdot \lambda \cdot L \cdot \rho}{8 \cdot \eta} \cdot 10^{-3} \cdot EF_{CO_2eq,el.prod} \cdot \tau = K1 \quad (3.1.2)$$

$$7,2 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha \cdot \pi \cdot L \cdot (t_{c.t.} - t_{зобв}) \cdot 10^{-3} \cdot EF_{CO_2eq,fuel} \cdot \tau = K2 \quad (3.1.3)$$

$$3,6 \cdot 10^{-6} \cdot Q_2 \cdot EF_{CO_2eq,fuel} \cdot \tau = K3 \quad (3.1.4)$$

$$LLOG \cdot EF_{CO_2eq,log} \cdot \frac{\tau}{T} = K4 \quad (3.1.5)$$

$$-\frac{\pi}{4} \cdot \partial^2 \cdot l \cdot \rho_{steel} \cdot 10^{-3} \cdot EF_{CO_2eq,manuf} \cdot \frac{\tau}{T} = K5 \quad (3.1.6)$$

$$\frac{\pi}{2} \cdot \partial \cdot l \cdot \rho_{steel} \cdot 10^{-3} \cdot EF_{CO_2eq,manuf} \cdot \frac{\tau}{T} = K6 \quad (3.1.7)$$

Обмеження:

$$d^2 v > \text{threshold}, \text{ де } \text{threshold} = \frac{4 \cdot Q}{13444 \cdot (T_1 - T_2)} \quad (3.1.8)$$

$$d \geq 0, v \geq 0 \quad (3.1.9)$$

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мета: знайти значення  $d$  і  $v$ , які мінімізують  $E(d, v)$  за умови виконання обмежень.

### 3.2 Аналітичний підхід до оптимізації.

Оскільки цільова функція  $E(d, v)$  є нелінійною, а обмеження включає нелінійну нерівність  $d^2 v > \text{threshold}$ , використаємо метод Лагранжа для умовного екстремуму, враховуючи, що обмеження може бути активним на межі (тобто  $d^2 v > \text{threshold}$ ).

Крок 1: Спрощення функції

Зауважимо, що  $K_3, K_4, K_5$  є константами і не залежать від змінних  $d$  і  $v$ . Тому цільова функція для оптимізації фактично має вигляд:

$$E(d, v) = K_1 d v^3 + (K_2 + K_6) d + \text{const} \quad (3.2.1)$$

де  $\text{const} = K_3 + K_4 + K_5$ . Константа не впливає на точку екстремуму, тому можемо зосередитись на:

$$f(d, v) = K_1 d v^3 + (K_2 + K_6) d \quad (3.2.2)$$

Крок 2. Обмеження

Обмеження  $d^2 v > \text{threshold}$  визначає область допустимих значень. Для спрощення аналітичного розв'язку припустимо, що оптимальна точка лежить на межі обмеження тобто:

$$d^2 v > \text{threshold} \quad (3.2.3)$$

Звідси:

$$v = \frac{\text{threshold}}{d^2} \quad (3.2.4)$$

Підставимо  $v$  у функцію  $f(d, v)$ :

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$f(d) = K_1 d \left( \frac{\text{threshold}}{d^2} \right)^3 + (K_2 + K_6)d = K_1 \frac{\text{threshold}^3}{d^5} + (K_2 + K_6)d \quad (3.2.5)$$

Тепер задача зводиться до одновимірної оптимізації:

Мінімізувати (3.2.5),  $d > 0$

Крок 3. Знаходження екстремуму

Знайдемо похідну  $f(d)$  за  $d$ :

$$f'(d) = -\frac{5K_1 \text{threshold}^3}{d^6} + (K_2 + K_6) \quad (3.2.6)$$

Прирівняємо похідну до нуля для знаходження критичної точки:

$$-\frac{5K_1 \text{threshold}^3}{d^6} + (K_2 + K_6) = 0 \quad (3.2.7)$$

$$\frac{5K_1 \text{threshold}^3}{d^6} = (K_2 + K_6) \quad (3.2.8)$$

$$d^6 = \frac{5K_1 \text{threshold}^3}{K_2 + K_6} \quad (3.2.9)$$

$$d = \left( \frac{5K_1 \text{threshold}^3}{K_2 + K_6} \right)^{1/6} \quad (3.2.10)$$

Знайдемо відповідне  $v$ :

$$v = \frac{\text{threshold}}{d^2} \quad (3.2.11)$$

Крок 4: Перевірка типу екстремуму

Обчислимо другу похідну, щоб перевірити, чи є знайдена точка мінімумом:

$$f''(d) = \frac{d}{dd} \left( -\frac{5K_1 \text{threshold}^3}{d^6} \right) = \frac{30K_1 \text{threshold}^3}{d^7} \quad (3.2.12)$$

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки  $K_1$ , threshold,  $d > 0$ , то  $f''(d) > 0$ , що вказує на локальний мінімум.

Крок 5. Обчислення числових значень

Підставимо значення констант із коду:

$$\lambda = 0,045 \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}),$$

$$L = 1000, [\text{м}],$$

$$\rho = 1000, \text{ кг}/\text{м}^3,$$

$$\eta = 0,95,$$

$$EF_{\text{elprod}} = 0,0003 \text{ тСО}_2/\text{кВт} \cdot \text{год},$$

$$\tau = 1 \text{ год},$$

$$\alpha = 0,015, [\text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})],$$

$$t_9 = 40, [^\circ\text{C}],$$

$$t_8 = 0, [^\circ\text{C}],$$

$$EF_{\text{fuel}} = 0,0006623 \text{ тСО}_2/\text{кВт} \cdot \text{год}$$

$$d_{\text{thickness}} = 0,005 \text{ м},$$

$$\rho_{\text{steel}} = 7800 \text{ кг}/\text{м}^3,$$

$$EF_{\text{log}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ тСО}_2/\text{км},$$

$$EF_{\text{manuf}} = 1,6 \text{ тСО}_2/\text{т},$$

$$T_1 = 90, T_2 = 70, [^\circ\text{C}],$$

$$T = 500000, [\text{год}],$$

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$L_{\log} = 50$ , [км],

$Q_2$  – введено користувачем, припустимо,  $Q_2 = 1000$  (як приклад)

Обчислимо коефіцієнти:

$$K1 = \frac{\pi \cdot 0,045 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 1000}{8 \cdot 0,95} \cdot 10^{-3} \cdot 0,0003 \cdot 1 \approx 1,862 \cdot 10^{-6} \quad (3.2.13)$$

$$K2 = 7,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,015 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot (40 - 0) \cdot 10^{-3} \cdot 0,0006623 \cdot 1 \approx 2,860 \cdot 10^{-6} \quad (3.2.14)$$

$$K6 = \frac{\pi}{2} \cdot 0,005 \cdot 1000 \cdot 7800 \cdot 10^{-3} \cdot 1,6 \cdot \frac{1}{500000} \approx 3,926 \cdot 10^{-5} \quad (3.2.15)$$

$$K2 + K6 \approx 2,860 \cdot 10^{-6} + 3,926 \cdot 10^{-5} \approx 4,212 \cdot 10^{-5} \quad (3.2.16)$$

$$\text{threshold} = \frac{4 \cdot 1000}{13444 \cdot (90 - 70)} \approx 0,01488 \quad (3.2.17)$$

Підставимо в рівняння для  $d$ :

$$d^6 = \frac{51,862 \cdot 10^{-6} \cdot (0,01488)^3}{4,212 \cdot 10^{-5}} \approx \frac{5 \cdot 1,862 \cdot 10^{-6} \cdot 3,296 \cdot 10^{-6}}{4,212 \cdot 10^{-5}} \approx 7,294 \cdot 10^{-7} \quad (3.2.18)$$

$$d = (7,294 \cdot 10^{-7})^{1/6} = 0,148 \text{ м} \quad (3.2.19)$$

$$v = \frac{0,01488}{0,148^2} \approx \frac{0,01488}{0,0219} \approx 0,679 \text{ м/с} \quad (3.2.20)$$

Крок 6: Перевірка обмежень

Перевіримо, чи виконується  $d^2v > \text{threshold}$ :

$$d^2v \approx 0,148^2 \cdot 0,679 \approx 0,0219 \cdot 0,679 \approx 0,01488 \quad (3.2.21)$$

Оскільки  $d^2v > \text{threshold}$ , точка лежить на межі обмеження, що відповідає умові  $d^2v \geq \text{threshold}$ . Також  $d \geq 0$ ,  $v \geq 0$ .

Крок 7: Обчислення  $E$

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підставимо  $d \approx 0,148, v \approx 0.679$  у функцію  $E$  (3.1.1):

Обчислимо  $K3, K4, K5$ ;

$$K3 = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 0,0006623 \cdot 1 = 2,384 \cdot 10^{-6} \quad (3.2.22)$$

$$K4 = 50 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{500000} = 3 \cdot 10^{-7} \quad (3.2.23)$$

$$K5 = -\frac{\pi}{4} \cdot 0,005^2 \cdot 1000 \cdot 7800 \cdot 10^{-3} \cdot 1,6 \cdot \frac{1}{500000} \approx -2,094 \cdot 10^{-6} \quad (3.2.24)$$

$$E = (1,862 \cdot 10^{-6} \cdot 0,148 \cdot 0,679^3) + (4,212 \cdot 10^{-5} \cdot 0,148) + 2,384 \cdot 10^{-6} + 3 \cdot 10^{-7} - 2,094 \cdot 10^{-6} \quad (3.2.25)$$

$$v \approx 0,679^3 \approx 0,313 \quad (3.2.26)$$

$$E = (1,862 \cdot 10^{-6} \cdot 0,148 \cdot 0,679^3) + (4,212 \cdot 10^{-5} \cdot 0,148) + (2,384 \cdot 10^{-6} + 3 \cdot 10^{-7} - 2,094 \cdot 10^{-6}) \approx 8,623 \cdot 10^{-8} + 6,234 \cdot 10^{-6} + 5,90 \cdot 10^{-7} \approx 6,91 \quad (3.2.27)$$

### 3.3 Результати

Оптимальні значення:

- Діаметр трубопроводу:  $d \approx 0.148$  м,
- Швидкість теплоносія  $v \approx 0.679$  v/c
- Мінімальні викиди  $E \approx 6,912 \cdot 10^{-6}$  тCO<sub>2</sub>екв.

Ці значення відповідають умові  $d^2v > \text{threshold}$  і забезпечують мінімум функції  $E$  в межах червоної зони.

### 3.4 Порівняння з чисельним методом

Чисельний метод у кодї використовує сітку значень  $d$  і  $v$ , обчислює  $E$  для кожної точки та шукає мінімум у червоній зоні ( $d^2v > \text{threshold}, d \geq 0, v \geq 0$ ). Аналітичний підхід точніший, оскільки не залежить від крокук сітки, і швидший, бо не вимагає перебору значень. Однак чисельний метод корисний для перевірки та візуалізації.

### 3.5 Зауваження

Якщо  $Q2$  змінюється, потрібно обчислити  $\text{threshold}$ ,  $K_3$  та повторити розрахунки.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналітичний розв'язок припускає, що оптимум лежить на межі  $d^2v > \text{threshold}$ , слід розглянути повну задачу з методом Лагранжа, враховуючи нерівність.

Для візуалізації можна використати той самий графік, що в коді, але з позначенням знайденої точки  $(d,v)$ .

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Розділ 4

### Оновлена математична модель теплової мережі

Студент

Михайлишин В.А.

Керівник

Погосов О.Г

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 4 Оновлена математична модель теплової мережі.

### 4.1 Вступ

Ця модель теплової мережі враховує два типи втрат енергії:

1. Втрати тепла через оболонку теплової ізоляції трубопроводів, які залежать від площі поверхні трубопроводу, тобто пропорційні діаметру труби.
2. Гідравлічні втрати, що виникають при перекачуванні теплоносія і залежать від швидкості руху рідини, яка, у свою чергу, обернено пропорційна діаметру труби. Модель також враховує:
  - Тупикові вузли (наприклад, кінцеві споживачі, такі як найвіддаленіший будинок), які не мають вихідних ребер.
  - Просьюмери – вузли, що можуть як споживати, так і віддавати теплову енергію (тобто  $d_v$  може бути додатним або від’ємним).

### 4.2 Представлення теплової мережі

Теплову мережу моделюємо як орієнтований граф  $G = (V, E)$ , де:

- $V$  – множина вузлів (джерела, споживачі, просьюмери, розгалуження, тупикові вузли).
- $E$  – множина ребер (трубопроводи).

Для кожного ребра  $e \in E$  визначено:

- $q_e$  – потік тепла через ребро  $e$  (у стаціонарному режимі, вимірюється, наприклад, у Вт).
- $d_e$  – діаметр труби ребра  $e$  (вважається фіксованим для спрощення, у метрах).
- $L_e(q_e)$  – загальна функція втрат на ребрі  $e$ .

### 4.3 Рівняння балансу

У кожному вузлі  $v \in V$  виконується закон збереження енергії:

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\sum_{e \in \delta^+(v)} q_e - \sum_{e \in \delta^-(v)} q_e = d_v \quad (4.3.1)$$

де:

- $\delta^+(v)$  – ребра, що входять у вузол  $v$ .
- $\delta^-(v)$  – ребра, що виходять із вузла  $v$ .
- $d_v$  – споживання (додатне) або виробництво (від'ємне) тепла у вузлі  $v$  (Вт).

Для тупикових вузлів, де  $\delta^-(v) = \emptyset$ , рівняння спрощується до:

$$\sum_{e \in \delta^+(v)} q_e = d_v \quad (4.3.2)$$

#### 4.4 Функція втрат на ребрі

Загальні втрати на ребрі  $e$  складаються з двох компонентів:

$$L_e(q_e) = L_{\text{тепло},e}(q_e) + \alpha \cdot L_{\text{гідр},e}(q_e) \quad (4.4.1)$$

де:

- $L_{\text{тепло},e}(q_e)$  – втрати тепла через ізоляцію.
- $L_{\text{гідр},e}(q_e)$  – гідравлічні втрати.
- $\alpha$  – коефіцієнт переведення гідравлічних втрат у теплові або енергетичні одиниці (наприклад Вт/Па).

#### 4.5 Втрати тепла через ізоляцію

Втрати тепла пропорційні діаметру труби  $d_e$ :

$$L_{\text{тепло},e}(q_e) = k_{\text{тепло},e} \cdot d_e \cdot q_e, \quad (4.5.1)$$

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $k_{\text{тепло},e}$  – коефіцієнт, що враховує властивості ізоляції, довжину труби та температуру ( $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{Вт}}$ ).

#### 4.6 Гідравлічні втрати

Гідравлічні втрати залежать від швидкості теплоносія,

$$v_e = \frac{q_e}{A_e}, \quad (4.6.1)$$

де  $A_e = \frac{4q_e}{\pi d_e^2}$  – площа поперечного перерізу труби. Тобто:

$$v_e = \frac{4q_e}{\pi d_e^2}, \quad (4.6.2)$$

Гідравлічні втрати моделюються як:

$$L_{\text{гідр},e}(q_e) = k_{\text{гідр},e} \cdot v_e^2 = k_{\text{гідр},e} \cdot \left(\frac{4q_e}{\pi d_e^2}\right)^2, \quad (4.6.3)$$

де  $k_{\text{гідр},e}$  – коефіцієнт, що враховує шорсткість, довжину труби та густину теплоносія.

#### 4.7 Функції для мінімізації

Загальні втрати, які потрібно мінімізувати:

$$S = \sum_{e \in E} L_e(q_e) = \sum_{e \in E} (k_{\text{тепло},e} \cdot d_e \cdot q_e + \alpha \cdot k_{\text{гідр},e} \cdot \left(\frac{4q_e}{\pi d_e^2}\right)^2), \quad (4.7.1)$$

#### 4.8 Обмеження

Оптимізаційна задача враховує:

- Рівняння балансу:

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\sum_{e \in \delta^+(v)} q_e - \sum_{e \in \delta^-(v)} q_e = d_v \quad \forall v \in V \quad (4.8.1)$$

- Обмеження на потоки:

$$0 \leq q_e \leq q_{e,\max} \quad \forall e \in E \quad (4.8.2)$$

де  $q_{e,\max}$  – максимальна пропускна здатність ребра.

#### 4.9 Формулювання задачі

Задача оптимізації:

$$\min S_{q_e} = \min_{q_e} \sum_{e \in E} (k_{\text{тепло},e} \cdot d_e \cdot q_e + \alpha \cdot k_{\text{гідр},e} \cdot (\frac{4q_e}{\pi d_e^2})^2) \quad (4.9.1)$$

за умов:

$$\begin{cases} \sum_{e \in \delta^+(v)} q_e - \sum_{e \in \delta^-(v)} q_e = d_v \quad \forall v \in V \\ 0 \leq q_e \leq q_{e,\max} \quad \forall e \in E \end{cases} \quad (4.9.2)$$

#### 4.10 Методи розв'язання

Функціонал  $S$  є нелінійним через квадратичну залежність у гідравлічних втратах.

Для розв'язання задачі можна використовувати:

- Методи нелінійного програмування (наприклад, метод послідовної квадратичної апроксимації або градієнтні методи).
- Чисельні методи для розв'язання систем нелінійних рівнянь.

Для нестационарних режимів можна розширити модель, ввівши залежність  $q_e(t)$  від часу та використавши методи варіаційного числення.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

#### 4.11 Висновок

Запропонована модель враховує теплові та гідравлічні втрати, а також особливості тупикових вузлів і просьюмерів. Вона придатна для оптимізації теплових мереж, зокрема для проектування нових систем або підвищення ефективності існуючих.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 5

Оновлена математична модель теплової мережі з урахуванням нестационарності режимів

Студент

Михайлишин В.А.

Керівник

Погосов О.Г

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 Оновлена математична модель теплової мережі з урахуванням нестационарності режимів.

### 5.1 Вступ

Ця модель теплової мережі враховує нестационарність режимів, зокрема зміну температури навколишнього середовища, яка впливає на втрати тепла через ізоляцію, а також зміну потужності джерел енергії та споживачів (включаючи просьюмерів). Модель включає два типи втрат:

1. Втрати тепал через оболонку теплової ізоляції трубопроводів, пропорційні діаметру труби та залежні від різниці температур між теплоносієм і навколишнім середовищем.
2. Гідравлічні втрати, що залежать від швидкості руху теплоносія, яка обернено прпорційна діаметру труби.

Додатково враховуються:

- Тупикові вузли (наприклад, кінцеві споживачі), які не мають вихідних ребер.
- Просьюмери – вузли, що можуть як споживати, так і віддавати теплову енергію.
- Нестационарність – залежність параметрів від часу чеерз зміну температури навколишнього середовища ( $T_{зовн}(t)$ ), потужності джерел ( $P_{джерело}(t)$ ), та споживачів ( $d_v(t)$ ).

### 5.2 Представлення теплової мережі

Теплову мережу моделюємо як орієнтований граф  $G = (V, E)$ , де:

- $V$  – множина вузлів (джерела, споживачі, просьюмери, розгалуження, тупикові вузли).
- $E$  – множина ребер (трубопроводи).

Для кожного ребра  $e \in E$  визначено:

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- $q_e(t)$  – потік тепла через ребро  $e$  у момент часу  $t$  (Вт).
- $d_e$  – діаметр труби ребра  $e$  (фіксований, м).
- $L_e(q_e(t), t)$  – функція втрат на ребрі  $e$ , залежна від часу.
- $T_e(t)$  – температура теплоносія в ребрі  $e$  (К).
- $T_{\text{зовн}}(t)$  – температура навколишнього середовища (К).

Для кожного вузла  $v \in V$ :

- $d_v(t)$  – споживання (додатне) або виробництво (від’ємне) тепла у момент часу  $t$  (Вт).

### 5.3 Рівняння балансу

У кожному вузлі  $v \in V$  виконує закон збереження енергії в кожен момент часу  $t$ :

$$\sum_{e \in \delta^+(v)} q_e(t) - \sum_{e \in \delta^-(v)} q_e(t) = d_v(t), \quad (5.3.1)$$

де:

- $\delta^+(v)$  – ребра, що входять у вузол  $v$ .
- $\delta^-(v)$  – ребра, що виходять із вузла  $v$ .

Для тупикових вузлів, де  $\delta^-(v) = \emptyset$ , рівняння спрощується до:

$$\sum_{e \in \delta^+(v)} q_e(t) = d_v(t), \quad (5.3.2)$$

Потужність джерел ( $P_{\text{джерело}}(t)$ ), враховується через  $d_v(t)$  для вузлів-джерел (від’ємне значення).

### 5.4 Функції втрат на ребрі

Загальні втрати на ребрі  $e$  складаються з двох компонентів:

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$L_e(q_e(t), t) = L_{\text{тепло},e}(q_e(t), t) + \alpha \cdot L_{\text{гідр},e}(q_e(t)), \quad (5.4.1)$$

де:

- $L_{\text{тепло},e}(q_e(t), t)$  – втрати тепла через ізоляцію, залежні від часу.
- $L_{\text{гідр},e}(q_e(t))$  – гідравлічні втрати.
- $\alpha$  – коефіцієнт переведення гідравлічних втрат у теплові або енергетичні одиниці (наприклад Вт/Па).

### 5.5 Втрати тепла через ізоляцію

Втрати тепла залежать від різниці температур між теплоносієм ( $T_e(t)$ ) і навколишнім середовищем ( $T_{\text{зовн}}(t)$ ) та пропорційні діаметру труби  $d_e$ :

$$L_{\text{тепло},e}(q_e(t), t) = k_{\text{тепло},e} \cdot d_e \cdot (T_e(t) - T_{\text{зовн}}(t)) \cdot q_e(t), \quad (5.5.1)$$

де  $k_{\text{тепло},e}$  – коефіцієнт, що враховує властивості ізоляції, довжину труби та температуру ( $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{Вт}}$ ).

$T_{\text{зовн}}(t)$  – задана функція часу (наприклад сезонні або добові коливання температури).

$T_e(t)$  – температура теплоносія, яка може залежати від  $q_e(t)$  через теплоємність теплоносія:

$$q_e(t) = c_p \cdot m_e(t) \cdot (T_e(t) - T_{\text{вх},e}) \quad (5.5.2)$$

Де  $c_p$  – питома теплоємність (ДЖ/(кг·К)),

$m_e(t)$  – масова витрата теплоносія (кг/с),

$T_{\text{вх},e}$  – вхідна температура в ребрі.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 5.6 Гідравлічні втрати

Гідравлічні втрати залежать від швидкості теплоносія ,

$$v_e(t) = \frac{q_e(t)}{A_e} \quad (5.6.1)$$

де  $A_e = \frac{\pi d_e^2}{4}$  – площа поперечного перерізу труби. Тобто:

$$v_e(t) = \frac{4q_e(t)}{\pi d_e^2} \quad (5.6.2)$$

Гідравлічні втрати моделюються як:

$$L_{\text{гидр},e}(q_e(t)) = k_{\text{гидр},e} \cdot v_e(t)^2 = k_{\text{гидр},e} \cdot \left(\frac{4q_e(t)}{\pi d_e^2}\right)^2, \quad (5.6.3)$$

де  $k_{\text{гидр},e}$  – коефіцієнт, що враховує шорсткість, довжину труби та густину теплоносія.

## 5.7 Функціонал для мінімізації

Загальні втрати в мережі за інтервал часу  $[0, T]$ :

$$\begin{aligned} &= \int_0^T \sum_{e \in E} L_e(q_e(t), t) dt \quad (5.7.1) \\ &= \int_0^T \sum_{e \in E} (k_{\text{тепло},e} \cdot d_e \cdot (T_e(t) - T_{\text{зовн}}(t)) \cdot q_e(t) + \alpha \cdot k_{\text{гидр},e} \\ &\quad \cdot \left(\frac{4q_e(t)}{\pi d_e^2}\right)^2) dt , \end{aligned}$$

## 5.8 Обмеження

Оптимізаційна задача враховує:

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Рівняння балансу:

$$\sum_{e \in \delta^+(v)} q_e(t) - \sum_{e \in \delta^-(v)} q_e(t) = d_v(t) \quad \forall v \in V, \forall t \in [0, T], \quad (5.8.1)$$

- Обмеження на потоки:

$$0 \leq q_e(t) \leq q_{e,\max}(t) \quad \forall e \in E, \forall t \in [0, T], \quad (5.8.2)$$

де  $q_{e,\max}(t)$  – максимальна пропускна здатність, яка може залежати від часу.

- Температурні обмеження:

$$T_{\min} \leq T_e(t) \leq T_{\max}, \quad (5.8.3)$$

де  $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$  – допустимі межі температури теплоносія.

## 5.9 Формулювання задачі

Задача оптимізації:

$$\min S_{q_e(t)} = \min_{q_e(t)} \int_0^T (k_{\text{тепло},e} \cdot d_e \cdot (T_e(t) - T_{\text{зовн}}(t)) \cdot q_e(t) + \alpha \cdot k_{\text{гідр},e} \cdot \left(\frac{4q_e(t)}{\pi d_e^2}\right)^2) dt, \quad (5.9.1)$$

за умов:

$$\begin{cases} \sum_{e \in \delta^+(v)} q_e(t) - \sum_{e \in \delta^-(v)} q_e(t) = d_v(t) & \forall v \in V, \forall t \in [0, T] \\ 0 \leq q_e(t) \leq q_{e,\max}(t) & \forall e \in E, \forall t \in [0, T] \\ T_{\min} \leq T_e(t) \leq T_{\max} & \forall e \in E, \forall t \in [0, T] \end{cases} \quad (5.9.2)$$

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 5.10 Методи розв'язання

Функціонал  $S$  є нелінійним і залежить від часу, що потребує використання варіаційних методів або чисельних підходів:

- Варіаційні методи: Застосування рівнянь Ейлера-Лагранжа для функціоналу  $S$ , враховуючи обмеження.
- Чисельні методи: Дискретизація часу (наприклад, метод скінчених різниць) і розв'язання задачі за допомогою нелінійного програмування (методи градієнтного спуску, послідовної квадратичної апроксимації).
- Моделювання: Використання програмного забезпечення (наприклад, MATLAB, Python з бібліотеками SciPy або COMSOL) для чисельного розв'язання.

Цільова функція для оптимізації має вигляд:

$$E(d, v) = K_1 d v^3 + (K_2 + K_6) d + K_3 + K_4 + K_5 \quad (5.10.1)$$

де  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$  – коефіцієнти, обчислені на основі заданих констант (їх значення наведено в коді та є фіксованим, за винятком  $K_3$ , який залежить від  $Q_2$ , але цей термін є адитивною константою й не впливає на точку мінімуму).

Обмеження:

$$d \geq 0, v \geq 0, d2v \geq \theta \quad (5.10.2)$$

де  $\theta = \frac{4Q_2}{13444(T_1 - T_2)}$  – порогове значення, що забезпечує достатній потік теплоносія для передачі потужності  $Q_2$ .

Щоб знайти мінімум математично, спочатку обчислюємо часткові похідні:

$$\frac{\partial E}{\partial d} = K_1 v^3 + (K_2 + K_6), \quad (5.10.3)$$

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{\partial E}{\partial v} = 3K_1dv^2 \quad (5.10.4)$$

Оскільки всі константи додатні,  $K_1 > 0$  і  $K_2 + K_6 > 0$ , то  $\frac{\partial E}{\partial d} > 0$  для  $v \geq 0$ . Це означає, що для фіксованого  $v$  функція  $E$  монотонно зростає за  $d$  лежить на нижній межі обмеження  $d^2v \geq \theta$ , тобто  $d = \sqrt{\frac{\theta}{v}}$  (за умови  $v > 0$ ).

Підставляємо це в (5.10.1):

$$\begin{aligned} E(v) &= K_1 \sqrt{\frac{\theta}{v}} v^3 + (K_2 + K_6) \sqrt{\frac{\theta}{v}} + K_3 + K_4 + K_5 \\ &= K_1 \sqrt{\theta} v^{\frac{5}{2}} + (K_2 + K_6) \sqrt{\theta} v^{-\frac{1}{2}} + const. \end{aligned} \quad (5.10.5)$$

Позначаємо  $A = K_1 \sqrt{\theta}$ ,  $B = (K_2 + K_6) \sqrt{\theta}$ , тоді:

$$f(v) = Av^{\frac{5}{2}} + Bv^{-\frac{1}{2}} + const. \quad (5.10.6)$$

Щоб знайти мінімум, беремо похідну:

$$f'(v) = \frac{5}{2}Av^{\frac{3}{2}} - \frac{1}{2}Bv^{-\frac{3}{2}} = 0. \quad (5.10.7)$$

Розв'язуємо:

$$\frac{5}{2}Av^{\frac{3}{2}} = \frac{1}{2}Bv^{-\frac{3}{2}} \quad (5.10.8)$$

$$5Av^{\frac{3}{2}} = B \quad (5.10.9)$$

$$v^3 = \frac{B}{5A} \quad (5.10.10)$$

$$v = \left(\frac{B}{5A}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{K_2 + K_6}{5K_1}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.10.11)$$

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(Зверніть увагу:  $v$  не залежить від  $\theta$  та  $Q_2$ , оскільки  $\sqrt{\theta}$  скорочується.)

Друга похідна

$$f''(v) = \frac{15}{4} Av^{\frac{1}{2}} + \frac{3}{4} Bv^{-\frac{5}{2}} > 0 \quad (5.10.12)$$

для  $v > 0$ , тому це точка мінімуму.

Тоді оптимальний діаметр:

$$d = \sqrt{\frac{\theta}{v}} \quad (5.10.13)$$

Для розв'язання задачі оптимізації цільової функції

$$E_{CO_2eq,DH} = K1 \cdot d \cdot v^3 + (K2 + K6) \cdot d + K3 + K4 + K5 \quad (5.10.14)$$

З обмеженнями

$$\begin{aligned} d &> 0, \\ v &> 0, \\ d^2 \cdot v &\geq \frac{4 \cdot Q_2}{\pi \cdot c \cdot (t_1 - t_2) \cdot 10^3} \end{aligned} \quad (5.10.15)$$

Використаємо аналітичний підхід, припускаючи, що оптимальна точка лежить на межі нелінійного обмеження, тобто  $d^2 \cdot v \geq \frac{4 \cdot Q_2}{\pi \cdot c \cdot (t_1 - t_2) \cdot 10^3}$ .

Це припущення обгрунтоване, оскільки функція є монотонною в області допустимих значень, і мінімум часто досягається на межі.

## 5.11 Формулювання задачі

Цільова функція:

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E(d, v) = K_1 d v^3 + (K_2 + K_6) d + K_3 + K_4 + K_5 \quad (5.11.1)$$

Обмеження:

$$d^2 \cdot v \geq \frac{4 \cdot Q_2^2}{\pi \cdot c \cdot (t_1 - t_2)}, \quad d > 0, v > 0 \quad (5.11.2)$$

Оскільки  $K_3, K_4, K_5$  є константами і не залежать від  $d$  та  $v$ , вони не впливають на точку екстремуму. Тому оптимізуємо спрощену функцію:

$$f(d, v) = K_1 d v^3 + (K_2 + K_6) d \quad (5.11.3)$$

## 5.12 Використання обмеження

На межі обмеження:

$$d^2 \cdot v = \frac{4 \cdot Q_2^2}{\pi \cdot c \cdot (t_1 - t_2)} \quad (5.12.1)$$

Виразимо  $v$  через  $d$ :

$$v = \frac{4 \cdot Q_2^2}{\pi \cdot c \cdot (t_1 - t_2) \cdot d^2} \quad (5.12.2)$$

Підставимо  $v$  у функцію  $f(d, v)$ :

$$\begin{aligned} f(d) &= K_1 d \left( \frac{4 \cdot Q_2^2}{\pi \cdot c \cdot (t_1 - t_2) \cdot d^2} \right)^3 + (K_2 + K_6) d & (5.12.3) \\ &= K_1 d \frac{64 \cdot Q_2^6}{\pi^3 \cdot c^3 \cdot (t_1 - t_2)^3 \cdot d^6} + (K_2 + K_6) d \\ &= \frac{K_1 \cdot 64 \cdot Q_2^6}{\pi^3 \cdot c^3 \cdot (t_1 - t_2)^3 \cdot d^5} + (K_2 + K_6) d \end{aligned}$$

Позначимо константу:

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$fA = \frac{K_1 \cdot 64 \cdot Q_2^6}{\pi^3 \cdot c^3 \cdot (t_1 - t_2)^3} \quad (5.12.4)$$

Тоді:

$$f(d) = \frac{A}{d^5} + (K_2 + K_6)d \quad (5.12.5)$$

### 5.13 Знаходження екстремуму

Знайдемо похідну  $f(d)$  за  $d$ :

$$f'(d) = -\frac{5A}{d^6} + (K_2 + K_6) \quad (5.13.1)$$

Прирівняємо похідну до нуля:

$$-\frac{5A}{d^6} + (K_2 + K_6) = 0 \quad (5.13.2)$$

$$\frac{5A}{d^6} = (K_2 + K_6) \quad (5.13.3)$$

$$d^6 = \frac{5A}{K_2 + K_6} \quad (5.13.4)$$

Підставимо  $A$ :

$$d^6 = \frac{5 \cdot K_1 \cdot 64 \cdot Q_2^6}{\pi^3 \cdot c^3 \cdot (t_1 - t_2)^3 \cdot (K_2 + K_6)} \quad (5.13.5)$$

$$d = \left( \frac{320 \cdot K_1 \cdot Q_2^6}{\pi^3 \cdot c^3 \cdot (t_1 - t_2)^3 \cdot (K_2 + K_6)} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (5.13.6)$$

Знайдемо  $v$ :

$$v = \frac{4 \cdot Q_2^2}{\pi \cdot c \cdot (t_1 - t_2) \cdot d^2} \quad (5.13.7)$$

Підставимо  $d^2$ :

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$d^2 = \left( \frac{320 \cdot K_1 \cdot Q_2^6}{\pi^3 \cdot c^3 \cdot (t_1 - t_2)^3 \cdot (K_2 + K_6)} \right)^{\frac{2}{6}} \quad (5.13.8)$$

$$= \left( \frac{320 \cdot K_1 \cdot Q_2^6}{\pi^3 \cdot c^3 \cdot (t_1 - t_2)^3 \cdot (K_2 + K_6)} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$v = \frac{4 \cdot Q_2^2}{\pi \cdot c \cdot (t_1 - t_2)} \cdot \left( \frac{\pi^3 \cdot c^3 \cdot (t_1 - t_2)^3 \cdot (K_2 + K_6)}{320 \cdot K_1 \cdot Q_2^6} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.13.9)$$

Спростимо:

$$v = \frac{4 \cdot Q_2^2}{\pi \cdot c \cdot (t_1 - t_2)} \cdot \frac{\pi \cdot (t_1 - t_2) \cdot (K_2 + K_6)^{\frac{1}{3}}}{(320 \cdot K_1)^{\frac{1}{3}} \cdot Q_2^2} \quad (5.13.10)$$

$$= \frac{4 \cdot \pi \cdot (t_1 - t_2) \cdot (K_2 + K_6)^{\frac{1}{3}}}{\pi \cdot c \cdot (t_1 - t_2) \cdot (320 \cdot K_1)^{\frac{1}{3}}} = \frac{4 \cdot (K_2 + K_6)^{\frac{1}{3}}}{c \cdot (320 \cdot K_1)^{\frac{1}{3}}}$$

#### 5.14 Перевірка екстремуму

Друга похідна:

$$vf''(d) = \frac{d}{dd} \cdot \left( -\frac{5A}{d^6} \right) = \frac{30A}{d^7} \quad (5.14.1)$$

Оскільки  $A > 0$ ,  $d > 0$ , то  $f''(d) > 0$ , що підтверджує, що знайдена точка є локальним мінімумом.

#### 5.15 Формули для оптимальних значень

Остаточні формули для оптимальних  $d$  і  $v$ :

$$d = \left( \frac{320 \cdot K_1 \cdot Q_2^6}{\pi^3 \cdot c^3 \cdot (t_1 - t_2)^3 \cdot (K_2 + K_6)} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (5.15.1)$$

$$v = \frac{4}{c} \cdot \left( \frac{K_2 + K_6}{320 \cdot K_1} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.15.2)$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Blank area for the qualification work content.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

## Розділ 6

### Моделювання та програмна реалізація розрахунку теплової мережі

Студент

Михайлишин В.А.

Керівник

Погосов О.Г

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 6 Моделювання та програмна реалізація розрахунку теплової мережі

### 6.1 Мета та завдання

Централізовані системи тепlopостачання є важливою складовою інженерної інфраструктури населених пунктів. Від ефективності їх роботи залежить надійність тепlopостачання споживачів, економічність використання паливно-енергетичних ресурсів та рівень теплових втрат у мережах.

Особливе значення має етап розрахунку теплових мереж, на якому визначаються діаметри трубопроводів, витрати теплоносія, температурні режими та втрати теплової енергії під час транспортування. Виконання таких розрахунків вручну є трудомістким та схильним до помилок, тому доцільним є використання спеціалізованих програмних засобів.

У даній роботі теплогідравлічний розрахунок теплової мережі реалізовано з використанням програмного середовища SciLAB, яке дозволяє автоматизувати обчислення, виконувати інтерполяцію табличних даних та наочно візуалізувати результати.

Метою даної роботи є розробка програмного алгоритму для розрахунку параметрів теплової мережі та аналізу її роботи в номінальному і добовому режимах.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- задати геометричну схему теплової мережі;
- визначити теплові навантаження споживачів;
- розрахувати витрати теплоносія в трубопроводах;
- підібрати діаметри труб за умовою допустимої швидкості руху теплоносія;
- визначити теплові втрати у подаючому та зворотному трубопроводах;
- розрахувати температури теплоносія у вузлах мережі;
- визначити необхідну встановлену потужність джерела тепла;
- виконати добовий розрахунок теплових втрат;

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- побудувати графічну схему теплової мережі.

## 6.2 Загальна характеристика теплової мережі

Розглянута тепла мережа являє собою розгалужену систему трубопроводів, що з'єднує джерело тепла з групою споживачів. Мережа складається з 12 вузлів, з яких перший є джерелом теплової енергії, а решта – споживачами з різними тепловими навантаженнями.

Теплова енергія передається за допомогою води, яка циркулює у подаючому та зворотному трубопроводах. Теплова схема розраховується для двох режимів:

- номінального (максимального) навантаження;
- змінного добового режиму.

## 6.3 Вихідні дані для розрахунку

### 6.3.1 Фізичні властивості теплоносія

У якості теплоносія прийнята вода. Для розрахунків використовуються такі фізичні параметри:

- питома теплоємність

$$c = 4187 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)},$$

- густина

$$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$$

Дані значення відповідають воді в діапазоні температур, характерних для теплових мереж.

### 6.3.2 Температурні режими роботи

У програмі задані наступні температурні параметри:

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- температура ґрунту  $t_g = 5^\circ\text{C}$ ;
- температура внутрішнього повітря приміщень  $t_{\text{int}} = 18^\circ\text{C}$ ;
- розрахункова зовнішня температура  $t_{\text{des}} = -22^\circ\text{C}$ ;
- температура подачі у номінальному режимі  $t_p = 95^\circ\text{C}$ ;
- температура зворотної лінії  $t_z = 70^\circ\text{C}$ .

Перепад температур у тепловій мережі становить:

$$\Delta T = t_p - t_z = 25^\circ\text{C} \quad (6.3.1)$$

## 6.4 Алгоритм та програмна реалізація розрахунку теплової мережі

### 6.4.1 Загальна структура програмного алгоритму

Розрахунок параметрів теплової мережі реалізовано у вигляді послідовного алгоритму, що поєднує гідравлічні та теплотехнічні залежності та дозволяє визначити експлуатаційні характеристики мережі в різних режимах роботи. Алгоритм реалізований у програмному середовищі SciLAB, що забезпечує можливість виконання чисельних обчислень, роботи з масивами даних, інтерполяції табличних значень та графічної візуалізації результатів.

Програмний код умовно поділяється на такі логічні блоки:

- ініціалізація змінних і вихідних даних;
- задання фізичних і температурних параметрів;
- формування геометричної моделі мережі;
- підбір діаметрів трубопроводів;
- розрахунок витрат теплоносія;
- визначення теплових втрат у трубопроводах;
- розрахунок температур подачі та зворотної лінії;
- аналіз добового режиму роботи;
- візуалізація результатів.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Такий поділ дозволяє забезпечити модульність програми та спростити подальшу модифікацію алгоритму.

#### 6.4.2 Ініціалізація та задання констант

На початковому етапі виконуються команди очищення робочого середовища:

```
// Очистка
```

```
clear;
```

```
clc;
```

Ці команди видаляють усі змінні з пам'яті та очищають консоль, що гарантує коректність виконання розрахунків без впливу попередніх даних.

Далі задаються фізичні параметри теплоносія:

```
// Константи
```

```
c = 4187; // Дж/(кг·К)
```

```
rho = 1000; // кг/м3
```

де  $c$  – питома теплоємність води,  $\rho$  – густина води. Вказані значення прийняті сталими, що є допустимим для інженерних розрахунків теплових мереж.

Максимально допустима швидкість руху теплоносія в трубопроводах задається рівною 3 м/с:

```
v_max = 3; // м/с
```

Дане обмеження забезпечує допустимі гідравлічні втрати та зменшення шуму в трубопроводах.

#### 6.4.3 Температурні параметри та коефіцієнти запасу

У коді задано коефіцієнт запасу теплових втрат:

```
beta = 1.15;
```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Він враховує додаткові втрати тепла, пов'язані з нерівномірністю теплоізоляції, старінням матеріалів та відхиленнями від ідеальних умов експлуатації.

Температурні параметри роботи мережі визначаються наступними значеннями:

- температура ґрунту;
- температура внутрішнього повітря;
- розрахункова зовнішня температура;
- температура подачі та зворотної лінії у номінальному режимі.

Ці параметри формують базовий температурний графік теплової мережі.

#### 6.4.4 Табличні дані теплових втрат трубопроводів

У програмі використано табличні значення питомих теплових втрат трубопроводів для різних номінальних діаметрів та температурних напорів. Дані представлені у вигляді векторів:

// Таблиця 3.1 з Методики (Вт/м)

Dn\_tab = [25,50,65,80,100,150,200,250,300,350,400,450,500,600,700,800,900,1000]';

q52\_5 = [52,65,75,80,88,109,131,154,173,191,209,230,251,286,316,354,387,426]';

q65 = [60,75,86,93,102,124,151,174,195,212,235,259,282,321,355,396,433,475]';

q75 = [67,84,95,102,111,136,165,190,212,234,254,280,303,345,379,423,463,506]';

Використання табличних даних дозволяє наблизити розрахунок до реальних експлуатаційних характеристик трубопроводів та теплоізоляції, що відповідає вимогам нормативних методик.

#### 6.4.5 Реалізація функції визначення лінійних теплових втрат

Ключовим елементом програмного коду є функція:

// Функція для q (Вт/м) з інтерполяцією за  $\Delta = t_{sr} - t_g$

function q=get\_q(Dn, Delta)

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

if Delta <= 52.5 then
    q_tab = q52_5 * (Delta / 52.5);
elseif Delta <= 65 then
    q_tab = q52_5 + (q65 - q52_5) * (Delta - 52.5) / (65 - 52.5);
elseif Delta <= 75 then
    q_tab = q65 + (q75 - q65) * (Delta - 65) / (75 - 65);
else
    q_tab = q75 * (Delta / 75);
end
inds = find(Dn_tab == Dn);
if ~isempty(inds) then
    q = q_tab(inds(1));
else
    q = interp1(Dn_tab, q_tab, Dn, "linear");
end
q = beta * q;
endfunction

```

Дана функція визначає питомі теплові втрати трубопроводу залежно від:

- номінального діаметра труби;
- температурного напору між теплоносієм та ґрунтом.

У межах функції реалізована лінійна інтерполяція між табличними значеннями теплових втрат для різних температурних рівнів. Це дозволяє врахувати зміну втрат тепла при зміні температури теплоносія вздовж трубопроводу.

Отримане значення питомих втрат додатково множиться на коефіцієнт запасу  $\beta$ , що забезпечує підвищену надійність результатів.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

#### 6.4.6 Формування геометричної моделі теплової мережі

Геометрія теплової мережі задається у вигляді координат вузлів:

// Фіксовані дані мережі

$N = 12;$

$x = [0,0,200,500,500,800,1000,1000,1000,800,600,400]';$

$y = [0,400,400,400,600,600,600,400,200,200,200,200]';$

Кожен вузол відповідає окремому елементу теплової мережі – джерелу тепла або споживачу. З'єднання між вузлами формують трубопроводи подаючої та зворотної ліній.

На основі координат вузлів визначаються довжини ділянок трубопроводів за допомогою евклідової метрики.

#### 6.4.7 Розрахунок теплових навантажень вузлів

Теплові навантаження споживачів задаються у вигляді вектора:

$Q\_base = [0,0,5000,0,0,1000,0,1000,0,2000,1000,1000]'; // кВт$

де кожен елемент відповідає тепловому навантаженню конкретного вузла у номінальному режимі. Нульове значення для першого вузла означає відсутність споживання тепла у джерелі.

#### 6.4.8 Підбір діаметрів трубопроводів

Підбір діаметрів труб виконується за умовою допустимої швидкості теплоносія. Для кожної ділянки визначається максимальна витрата теплоносія, що відповідає сумарному навантаженню всіх споживачів.

Розрахунок включає:

- визначення масової витрати теплоносія;

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- перехід до об'ємної витрати;
- визначення площі поперечного перерізу труби;
- розрахунок еквівалентного діаметра.

Отриманий діаметр округлюється до найближчого більшого стандартного номінального значення.

Фрагмент коду має наступний вигляд:

```
// Розрахунок Dn для ділянок (мм)
Dn = zeros(N-1,1);
for i=1:N-1
    sum_Q_down = sum(Q_base(i+1:N));
    G_max = sum_Q_down * 1000 / (c * DeltaT_base); // кг/с
    V = G_max / rho; // м³/с
    A = V / v_max; // м²
    d = sqrt(4 * A / %pi) * 1000; // мм
    // Найближчий більший Dn
    inds = find(Dn_tab >= d);
    if ~isempty(inds) then
        ind = inds(1);
    else
        ind = length(Dn_tab);
    end
    Dn(i) = Dn_tab(ind);
end
```

## 6.5 Тепловий розрахунок теплової мережі та його програмна реалізація

### 6.5.1 Розрахунок витрат теплоносія у трубопроводах

Витрати теплоносія в тепловій мережі визначаються на основі теплового балансу між тепловою потужністю споживачів та кількістю теплоти, що переноситься

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потокм водн. У програмному кодї масова витрата теплоносїя визначається за класичною залежнїстю:

$$G = \frac{Q}{c \cdot \Delta T}$$

де Q – теплова потужнїсть;

c – питома теплоємнїсть водн;

$\Delta T$  – температурний перепад мїж подаючим і зворотним трубопроводами.

Дана залежнїсть реалїзована в кодї наступним фрагментом:

```
G_max(i) = sum_Q_down * 1000 / (c * DeltaT_max);
```

Тут sum\_Q\_down – сумарне теплове навантаження споживачїв, розташованих нижче за течїєю вїд поточної дїлянки. Множення на 1000 використовується для переходу вїд кВт до Вт.

Розрахунок виконується у зворотному напрямку – вїд кїнцевих вузлїв до джерела тепла:

```
for i = N-1:-1:1
```

```
    sum_Q_down = sum(Q_max(i+1:N));
```

```
    G_max(i) = sum_Q_down * 1000 / (c * DeltaT_max);
```

```
end
```

Такий пїдхїд дозволяє коректно врахувати всї теплові навантаження, що формують витрату теплоносїя у кожнїй дїлянкї трубопроводу.

### 6.5.2 Реалїзацїя функцїї визначення питомих теплових втрат

Питомї теплові втрати трубопроводїв визначаються за табличними даними, наведеними у нормативнїй методицї. У програмї цї данї заданї у виглядї векторїв:

```
Dn_tab = [25,50,65,80,100,150,200,250,300,350,400,450,500,600,700,800,900,1000]';
```

```
q52_5 = [52,65,75,80,88,109,131,154,173,191,209,230,251,286,316,354,387,426]';
```

```
q65 = [60,75,86,93,102,124,151,174,195,212,235,259,282,321,355,396,433,475]';
```

					Квалїфїкацїйна робота	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Пїдпис	Дата		

$q_{75} = [67,84,95,102,111,136,165,190,212,234,254,280,303,345,379,423,463,506]'$ ;

Оскільки температура теплоносія змінюється вздовж трубопроводу, виникає необхідність інтерполяції теплових втрат. Для цього реалізовано функцію `get_q`:

```
function q=get_q(Dn, Delta)
```

У межах функції здійснюється інтерполяція між табличними значеннями залежно від температурного напору  $\Delta = t_{sr} - t_g$ :

```
function q=get_q(Dn, Delta)
```

```
    if Delta <= 52.5 then
```

```
        q_tab = q52_5 * (Delta / 52.5);
```

```
    elseif Delta <= 65 then
```

```
        q_tab = q52_5 + (q65 - q52_5) * (Delta - 52.5) / (65 - 52.5);
```

```
    elseif Delta <= 75 then
```

```
        q_tab = q65 + (q75 - q65) * (Delta - 65) / (75 - 65);
```

```
    else
```

```
        q_tab = q75 * (Delta / 75);
```

```
    end
```

Далі виконується вибір або інтерполяція значення теплових втрат за діаметром трубопроводу:

```
    inds = find(Dn_tab == Dn);
```

```
    if ~isempty(inds) then
```

```
        q = q_tab(inds(1));
```

```
    else
```

```
        q = interp1(Dn_tab, q_tab, Dn, "linear");
```

```
    end
```

Отримане значення множиться на коефіцієнт запасу:

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$q = \beta * q;$$

### 6.5.3 Розрахунок теплових втрат у подаючому трубопроводі

Розрахунок температур подачі реалізується послідовно від джерела тепла до кінцевого вузла. Початкова температура подачі задається:

$$t_{p\_max\_arr}(1) = t_{p\_max};$$

Для кожної ділянки обчислюються питомі втрати тепла:

$$t_{sr} = t_{p\_max\_arr}(i);$$

$$\Delta = t_{sr} - t_g;$$

$$q_{p\_vec\_max}(i) = \text{get\_q}(Dn(i), \Delta);$$

Повні теплові втрати на ділянці визначаються як:

$$Q_{loss\_p} = q_{p\_vec\_max}(i) * l(i); // Bm$$

Зниження температури теплоносія внаслідок теплових втрат обчислюється за формулою:

$$\Delta T_p = Q_{loss\_p} / (G_{max}(i) * c);$$

$$t_{p\_max\_arr}(i+1) = t_{p\_max\_arr}(i) - \Delta T_p;$$

Таким чином, температура теплоносія зменшується вздовж подаючого трубопроводу з урахуванням реальних втрат тепла.

### 6.5.4 Розрахунок температур зворотного трубопроводу

Розрахунок температур зворотної лінії виконується у напрямку від кінцевого вузла до джерела тепла. Початкова температура визначається як:

$$t_{z\_max\_arr}(N) = t_{p\_max\_arr}(N) - \Delta T_{max};$$

Для кожної ділянки зворотного трубопроводу визначаються теплові втрати:

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

t_sr = t_z_max_arr(i+1);
Delta = t_sr - t_g;
q_z_vec_max(i) = get_q(Dn(i), Delta);
Q_loss_z = q_z_vec_max(i) * l(i); // Вт

```

Зниження температури теплоносія обчислюється аналогічно подаючому трубопроводу:

```

DeltaT_z = Q_loss_z / (G_max(i) * c);
t_z_after_pipe = t_z_max_arr(i+1) - DeltaT_z;

```

#### 6.5.5 Урахування теплового навантаження у вузлах

У вузлах зі споживанням тепла здійснюється змішування потоків з різними температурами. Це реалізовано наступним кодом:

```

if Q_base(i) > 0 then
    G_cons = Q_max(i) * 1000 / (c * DeltaT_max);
    t_z_cons = t_p_max_arr(i) - DeltaT_max;
    t_z_max_arr(i) = (G_max(i) * t_z_after_pipe + G_cons * t_z_cons) / (G_max(i) +
G_cons);
else
    t_z_max_arr(i) = t_z_after_pipe;
end

```

Даний фрагмент реалізує рівняння теплового балансу при змішуванні потоків у вузлі.

#### 6.5.6 Визначення сумарних теплових втрат і потужності джерела

Сумарні теплові втрати мережі визначаються як:

```

Q_loss_max = sum(q_p_vec_max .* l + q_z_vec_max .* l) / 1000; // кВт

```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Необхідна потужність джерела тепла визначається з урахуванням втрат:

$$Q_{\text{boiler}} = \text{sum}(Q_{\text{base}}(2:N)) + Q_{\text{loss\_max}};$$

### 6.5.7 Висновки до розділу

Реалізований у середовищі Scilab алгоритм теплового розрахунку дозволяє комплексно оцінити температурний режим теплової мережі, визначити теплові втрати у трубопроводах та обґрунтувати встановлену потужність джерела тепла. Повна прив'язка математичних залежностей до програмного коду забезпечує прозорість алгоритму та можливість його подальшої модифікації.

## 6.6 Формування добового профілю зовнішньої температури та погодинний тепловий розрахунок теплової мережі

### 6.6.1 Формування добового профілю температури зовнішнього повітря

Для моделювання змінного режиму роботи теплової мережі необхідно задати добовий профіль температури зовнішнього повітря. У даній роботі такий профіль сформовано у вигляді аналічної апроксимації, що відповідає середньостатистичному січневому температурному режиму для міста Київ.

У програмному коді добовий часовий інтервал задається вектором годин:

*// Добовий профіль  $t_{\text{out}}$  січня (Київ)*

$$h = 1:24;$$

Кожен елемент вектора  $h$  відповідає окремій годині доби. Температура зовнішнього повітря для кожної години визначається за допомогою гармонічної функції:

$$t_{\text{out}} = -3.2 + 1.5 * \sin(2 * \pi * (h-14)/24) + 1.5 * \cos(2 * \pi * (h-7)/24);$$

У даному виразі:

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- значення -3.2 відповідає середньодобовій температурі зовнішнього повітря у січні;
- синусна складова моделює нічне зниження температури;
- косинусна складова враховує денне підвищення температури;
- зсув фаз (h-14, h-7) дозволяє наблизити моменти мінімальних та максимальних температур до реальних добових значень.

Таким чином формується масив  $t_{out}(h)$ , який використовується як вхідний параметр для погодинного теплового розрахунку.

### 6.6.2 Організація погодинного розрахунку теплових втрат

Для накопичення результатів погодинного розрахунку теплових втрат створюється вектор:

```
Q_loss_hourly = zeros(24,1); // кВт
```

Кожен елемент цього вектора відповідає втратам теплової потужності у відповідну годину доби. Основний розрахунок виконується у циклі:

```
for hh = 1:24
```

де змінна  $hh$  визначає номер поточної години.

### 6.6.3 Визначення погодозалежного теплового навантаження

На кожному кроці циклу розраховується коефіцієнт теплового навантаження залежно від температури зовнішнього повітря:

```
load_factor = (t_int - t_out(hh)) / (t_int - t_des);
```

Ця формула реалізує класичну лінійну залежність теплового навантаження від різниці температур між внутрішнім і зовнішнім повітрям. Отриманий коефіцієнт використовується для масштабування номінальних теплових навантажень:

```
Q = Q_base * load_factor;
```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, у кожен годину доби формується новий розподіл теплових навантажень у вузлах мережі.

#### 6.6.4 Коригування температурного графіка подачі

Зміна теплового навантаження супроводжується коригуванням температури подачі теплоносія. У кодї реалізовано погодозалежне регулювання температури подачі:

$$t_{p\_h} = t_{z\_base} + (t_{p\_base} - t_{z\_base}) * load\_factor^{0.5};$$

$$t_{z\_h} = t_{z\_base};$$

$$\Delta T_h = t_{p\_h} - t_{z\_h};$$

Тут температура подачі зменшується пропорційно квадратному кореню з коефіцієнта навантаження, що відповідає практиці експлуатації теплових мереж і дозволяє уникнути надмірного зниження температури теплоносія.

#### 6.6.5 Погодинний розрахунок витрат теплоносія

Витрати теплоносія перераховуються для кожної години з урахуванням поточного температурного перепаду:

*// Витрати G (кВт/с)*

G = zeros(N-1,1);

for i = N-1:-1:1

sum\_Q\_down = sum(Q(i+1:N));

G(i) = sum\_Q\_down \* 1000 / (c \* DeltaT\_h); *// Q в Вт*

end

Розрахунок виконується від кінцевих вузлів до джерела тепла, що дозволяє врахувати всі споживчі навантаження при формуванні витрат у кожній ділянці трубопроводу.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 6.6.6 Розрахунок температур подаючого трубопроводу в добовому режимі

Температура подачі вздовж мережі визначається послідовно для кожної ділянки трубопроводу:

```
// t_p вздовж подачі (від 1 до N)
t_p_temp = t_p_h;
q_p_vec = zeros(N-1,1);
for i = 1:N-1
    t_sr = t_p_temp; // Для q
    Delta = t_sr - t_g;
    q_p_vec(i) = get_q(Dn(i), Delta);
    Q_loss_p = q_p_vec(i) * l(i); // Вт
    DeltaT_p = Q_loss_p / (G(i) * c);
    t_p_temp = t_p_temp - DeltaT_p;
end
```

У цьому блоці:

- визначаються питомі теплові втрати;
- обчислюється зниження температури теплоносія;
- формується температура подачі на наступному вузлі.

### 6.6.7 Розрахунок температур зворотного трубопроводу

Початкова температура зворотної лінії визначається як:

```
// t_z від кінця (від N до 1)
t_z_temp = t_p_temp - DeltaT_h;
```

Подальший розрахунок виконується у зворотному напрямку:

```
q_z_vec = zeros(N-1,1);
```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

for i = N-1:-1:1
    t_sr = t_z_temp;
    Delta = t_sr - t_g;
    q_z_vec(i) = get_q(Dn(i), Delta);
    Q_loss_z = q_z_vec(i) * l(i); // Вт
    DeltaT_z = Q_loss_z / (G(i) * c);
    t_z_after_pipe = t_z_temp - DeltaT_z;

```

У вузлах зі споживанням тепла виконується змішування потоків:

```

if Q(i) > 0 then
    G_cons = Q(i) * 1000 / (c * DeltaT_h);
    t_z_cons = (t_p_h - DeltaT_p * i) - DeltaT_h; // Наближення для t_p в i
    t_z_temp = (G(i) * t_z_after_pipe + G_cons * t_z_cons) / (G(i) + G_cons);
else
    t_z_temp = t_z_after_pipe;
end
end
end

```

Цей підхід дозволяє врахувати локальний відбір теплової енергії у кожному вузлі мережі.

#### 6.6.8 Визначення погодинних теплових втрат

Сумарні теплові втрати у кожену годину визначаються за формулою:

```

// Втрати потужності (кВт)
Q_loss_hourly(hh) = sum(q_p_vec .* l + q_z_vec .* l) / 1000;
end

```

Отриманий масив `Q_loss_hourly` використовується для визначення середньодобових теплових втрат та подальшого енергетичного аналізу теплової мережі.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						96
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 6.6.9 Підсумок

Розглянутий фрагмент коду реалізує повноцінний погодинний тепловий розрахунок теплової мережі з урахуванням змін зовнішньої температури, теплових навантажень та температурного графіка теплоносія. Повна прив'язка математичних залежностей до програмної реалізації забезпечує прозорість алгоритму та дозволяє використовувати його для інженерного аналізу режимів роботи системи тепlopостачання.

## 6.7 Візуалізація результатів та аналізів отриманих даних у середовищі SciLAB

### 6.7.1 Призначення візуалізації результатів розрахунку

Візуалізація результатів теплотехнічного розрахунку є важливим етапом аналізу роботи теплової мережі, оскільки дозволяє наочно оцінити:

- просторову конфігурацію теплової мережі;
- розподіл теплових навантажень між вузлами;
- зміну температур теплоносія уздовж мережі;
- відповідність підібраних діаметрів труб експлуатаційним вимогам.

У даній роботі візуалізація реалізована за допомогою стандартних графічних засобів програмного середовища SciLAB, що забезпечує наочність та інформативність подання результатів.

### 6.7.2 Вивід числових результатів у консолі SciLAB

На першому етапі результати розрахунку виводяться у текстовому вигляді за допомогою функції `disp`. Це дозволяє перевірити коректність обчислень та виконати попередній аналіз.

### 6.7.3 Вивід довжин ділянок трубопроводів

```
disp("Відстані між вузлами (м):");
```

```
disp(l);
```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						97
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вектор 1 містить довжини всіх ділянок трубопроводів, розраховані на основі координат вузлів. Отримані значення використовуються при визначенні теплових втрат та формуванні графічної схеми мережі.

#### 6.7.4 Вивід підібраних діаметрів труб

```
disp("Розрахункові діаметри Dn (мм):");  
disp(Dn);
```

Даний фрагмент дозволяє проаналізувати відповідність підібраних діаметрів реальному розподілу теплових навантажень. Збільшення діаметрів у напрямку до джерела тепла відповідає фізичній суті процесу транспортування теплоносія.

#### 6.7.5 Вивід температур у вузлах теплової мережі

```
disp("Температури в вузлах для номінального режиму (°C):");  
for i=1:N  
    disp("Вузол " + string(i) + ": t_p = " + string(t_p_max_arr(i)) + ", t_z = " +  
string(t_z_max_arr(i)));  
end
```

Даний блок коду забезпечує вивід температур подаючого та зворотного трубопроводів у кожному вузлі мережі. Отримані значення дозволяють перевірити:

- відсутність надмірного зниження температури подачі;
- коректність формування температур зворотної лінії;
- дотримання заданого температурного графіка.

#### 6.7.6 Вивід енергетичних показників системи

```
disp("Фактична кількість втрат теплової енергії (середня добова, кВт·год): " +  
string(mean(Q_loss_hourly) * 24));
```

```
disp("Встановлена потужність котельні (основного джерела з урахуванням втрат,  
кВт): " + string(Q_boiler));
```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						98
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дані показники є узагальнюючими характеристиками енергоефективності теплової мережі та використовуються для техніко-економічного аналізу.

## 6.8 Побудова графічної схеми теплової мережі

Для наочного відображення структури теплової мережі використано двовимірну графічну модель.

### 6.8.1 Ініціалізація графічного вікна

```
scf();
```

```
a = gca();
```

```
a.auto_scale = "off";
```

Дані команди створюють нове графічне вікно та вимикають автоматичне масштабування, що дозволяє вручну задати межі відображення.

### 6.8.2 Побудова геометричної схеми мережі

```
plot(x, y, "b-o", "thickness", 2);
```

```
xtitle("Схема теплової мережі");
```

Координати вузлів з'єднуються ламаною лінією, що відповідає фактичному трасуванню трубопроводів. Маркери вузлів дозволяють легко ідентифікувати розташування джерела тепла та споживачів.

### 6.8.3 Нанесення інформації про вузли мережі

```
for i=1:N
```

```
    xstring(x(i), y(i) + 20, "Вузол " + string(i) + ": Q=" + string(Q_base(i)) + " кВт; " +  
    string(round(t_p_max_arr(i))) + "/" + string(round(t_z_max_arr(i))) + " °C");
```

```
end
```

Біля кожного вузла виводиться інформація про:

- теплове навантаження споживача;
- температуру подачі та зворотної лінії у номінальному режимі.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						99
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це дозволяє виконати візуальний аналіз розподілу температур та навантажень по мережі.

#### 6.8.4 Нанесення параметрів трубопроводів

for i=1:N-1

mid\_x = (x(i) + x(i+1))/2;

mid\_y = (y(i) + y(i+1))/2;

xstring(mid\_x, mid\_y - 20, "l=" + string(round(l(i))) + " м, Dn=" + string(Dn(i)) + " мм");

end

Для кожної ділянки трубопроводу виводяться:

- довжина ділянки;
- номінальний діаметр труби.

Це дозволяє швидко оцінити коректність підбору діаметрів у відповідності до довжин та навантажень.

#### 6.9 Масштабування та оптимізація відображення

Для підвищення наочності зображення межі графіка розширюються на 20% від фактичного діапазону координат:

x\_min = min(x);

y\_min = min(y);

x\_max = max(x);

y\_max = max(y);

range\_x = x\_max - x\_min;

range\_y = y\_max - y\_min;

xmin\_exp = x\_min - 0.1 \* range\_x;

ymin\_exp = y\_min - 0.1 \* range\_y;

xmax\_exp = x\_max + 0.1 \* range\_x;

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						100
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
ymax_exp = y_max + 0.1 * range_y;
```

```
replot([xmin_exp, ymin_exp, xmax_exp, ymax_exp]);
```

Даний підхід дозволяє уникнути накладання текстових підписів та забезпечити зручність аналізу графічної інформації.

## 6.10 Висновки

На основі числових та графічних результатів можна зробити такі узагальнені висновки:

- підібрані діаметри труб забезпечують допустимі швидкості руху теплоносія;
- температури подачі та зворотної лінії змінюються плавно вздовж мережі;
- теплові втрати зростають у напрямку до джерела тепла, що відповідає фізичній моделі процесу;
- добові теплові втрати значною мірою залежать від режиму погодного регулювання.

У даному розділі виконано вивід та візуалізацію результатів теплотехнічного розрахунку теплової мережі з використанням графічних засобів середовища SciLAB. Представлення результатів у графічному та табличному вигляді дозволяє ефективно аналізувати роботу системи теплопостачання та підтверджує коректність розробленого алгоритму.

## 6.11 Загальний вигляд коду

```
// Очистка
```

```
clear;
```

```
clc;
```

```
// Константи
```

```
c = 4187; // Дж/(кг·К)
```

```
rho = 1000; // кг/м3
```

```
v_max = 3; // м/с
```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						101
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

beta = 1.15;
t_g = 5; // °C
t_int = 18; // °C
t_des = -22; // °C
t_p_base = 95; // °C
t_z_base = 70; // °C
DeltaT_base = t_p_base - t_z_base;

// Таблиця 3.1 з Методики (Вт/м)
Dn_tab = [25,50,65,80,100,150,200,250,300,350,400,450,500,600,700,800,900,1000]';
q52_5 = [52,65,75,80,88,109,131,154,173,191,209,230,251,286,316,354,387,426]';
q65 = [60,75,86,93,102,124,151,174,195,212,235,259,282,321,355,396,433,475]';
q75 = [67,84,95,102,111,136,165,190,212,234,254,280,303,345,379,423,463,506]';

// Функція для q (Вт/м) з інтерполяцією за Delta = t_sr - t_g
function q=get_q(Dn, Delta)
    if Delta <= 52.5 then
        q_tab = q52_5 * (Delta / 52.5);
    elseif Delta <= 65 then
        q_tab = q52_5 + (q65 - q52_5) * (Delta - 52.5) / (65 - 52.5);
    elseif Delta <= 75 then
        q_tab = q65 + (q75 - q65) * (Delta - 65) / (75 - 65);
    else
        q_tab = q75 * (Delta / 75);
    end
    inds = find(Dn_tab == Dn);
    if ~isempty(inds) then
        q = q_tab(inds(1));
    else
        q = interp1(Dn_tab, q_tab, Dn, "linear");
    end
end

```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						102
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

end
q = beta * q;
endfunction

// Фіксовані дані мережі
N = 12;
x = [0,0,200,500,500,800,1000,1000,1000,800,600,400]';
y = [0,400,400,400,600,600,600,400,200,200,200,200]';
Q_base = [0,0,5000,0,0,1000,0,1000,0,2000,1000,1000]'; // кВт

// Розрахунок відстаней (м)
l = zeros(N-1,1);
for i=1:N-1
    l(i) = sqrt((x(i+1)-x(i))^2 + (y(i+1)-y(i))^2);
end

// Розрахунок Dn для ділянок (мм)
Dn = zeros(N-1,1);
for i=1:N-1
    sum_Q_down = sum(Q_base(i+1:N));
    G_max = sum_Q_down * 1000 / (c * DeltaT_base); // кг/с
    V = G_max / rho; // м³/с
    A = V / v_max; // м²
    d = sqrt(4 * A / %pi) * 1000; // мм
    // Найближчий більший Dn
    inds = find(Dn_tab >= d);
    if ~isempty(inds) then
        ind = inds(1);
    else
        ind = length(Dn_tab);
    end
end

```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						103
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

end
Dn(i) = Dn_tab(ind);
end

// Розрахунок максимальних втрат для потужності котельні (номінальний режим)
load_factor_max = 1;
Q_max = Q_base * load_factor_max;
t_p_max = 95; // Фіксована номінальна температура подачі в джерелі
t_z_max = t_z_base;
DeltaT_max = t_p_max - t_z_max; // Фіксований перепад 25 °C

G_max = zeros(N-1,1);
for i = N-1:-1:1
    sum_Q_down = sum(Q_max(i+1:N));
    G_max(i) = sum_Q_down * 1000 / (c * DeltaT_max);
end

t_p_max_arr = zeros(N,1);
t_p_max_arr(1) = t_p_max;
q_p_vec_max = zeros(N-1,1);
for i = 1:N-1
    t_sr = t_p_max_arr(i);
    Delta = t_sr - t_g;
    q_p_vec_max(i) = get_q(Dn(i), Delta);
    Q_loss_p = q_p_vec_max(i) * l(i); // Вт
    DeltaT_p = Q_loss_p / (G_max(i) * c);
    t_p_max_arr(i+1) = t_p_max_arr(i) - DeltaT_p;
end

```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		104

```

t_z_max_arr = zeros(N,1);
t_z_max_arr(N) = t_p_max_arr(N) - DeltaT_max;

q_z_vec_max = zeros(N-1,1);
for i = N-1:-1:1
    t_sr = t_z_max_arr(i+1);
    Delta = t_sr - t_g;
    q_z_vec_max(i) = get_q(Dn(i), Delta);
    Q_loss_z = q_z_vec_max(i) * l(i); // Bm
    DeltaT_z = Q_loss_z / (G_max(i) * c);
    t_z_after_pipe = t_z_max_arr(i+1) - DeltaT_z;
    if Q_base(i) > 0 then
        G_cons = Q_max(i) * 1000 / (c * DeltaT_max);
        t_z_cons = t_p_max_arr(i) - DeltaT_max;
        t_z_max_arr(i) = (G_max(i) * t_z_after_pipe + G_cons * t_z_cons) / (G_max(i) +
G_cons);
    else

        t_z_max_arr(i) = t_z_after_pipe;
    end
end

Q_loss_max = sum(q_p_vec_max .* l + q_z_vec_max .* l) / 1000; // кВт
Q_boiler = sum(Q_base(2:N)) + Q_loss_max;

// Добовий профіль t_out січня (Київ)
h = 1:24;
t_out = -3.2 + 1.5 * sin(2*%pi*(h-14)/24) + 1.5 * cos(2*%pi*(h-7)/24);

```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		105

*// Розрахунок за години (для добових втрат, температура подачі варіюється, але вивід температур - номінальні)*

`Q_loss_hourly = zeros(24,1); // кВт`

`for hh = 1:24`

`load_factor = (t_int - t_out(hh)) / (t_int - t_des);`

`Q = Q_base * load_factor;`

`t_p_h = t_z_base + (t_p_base - t_z_base) * load_factor^0.5;`

`t_z_h = t_z_base;`

`DeltaT_h = t_p_h - t_z_h;`

*// Витрати G (кг/с)*

`G = zeros(N-1,1);`

`for i = N-1:-1:1`

`sum_Q_down = sum(Q(i+1:N));`

`G(i) = sum_Q_down * 1000 / (c * DeltaT_h); // Q в Вт`

`end`

*// t\_p вздовж подачі (від 1 до N)*

`t_p_temp = t_p_h;`

`q_p_vec = zeros(N-1,1);`

`for i = 1:N-1`

`t_sr = t_p_temp; // Для q`

`Delta = t_sr - t_g;`

`q_p_vec(i) = get_q(Dn(i), Delta);`

`Q_loss_p = q_p_vec(i) * l(i); // Вт`

`DeltaT_p = Q_loss_p / (G(i) * c);`

`t_p_temp = t_p_temp - DeltaT_p;`

`end`

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						106
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
// t_z від кінця (від N до 1)
```

```
t_z_temp = t_p_temp - DeltaT_h;
```

```
q_z_vec = zeros(N-1,1);
```

```
for i = N-1:-1:1
```

```
    t_sr = t_z_temp;
```

```
    Delta = t_sr - t_g;
```

```
    q_z_vec(i) = get_q(Dn(i), Delta);
```

```
    Q_loss_z = q_z_vec(i) * l(i); // Вт
```

```
    DeltaT_z = Q_loss_z / (G(i) * c);
```

```
    t_z_after_pipe = t_z_temp - DeltaT_z;
```

```
    if Q(i) > 0 then
```

```
        G_cons = Q(i) * 1000 / (c * DeltaT_h);
```

```
        t_z_cons = (t_p_h - DeltaT_p * i) - DeltaT_h; // Наближення для t_p в i
```

```
        t_z_temp = (G(i) * t_z_after_pipe + G_cons * t_z_cons) / (G(i) + G_cons);
```

```
    else
```

```
        t_z_temp = t_z_after_pipe;
```

```
    end
```

```
end
```

```
// Втрати потужності (кВт)
```

```
Q_loss_hourly(hh) = sum(q_p_vec .* l + q_z_vec .* l) / 1000;
```

```
end
```

```
// Вивід
```

```
disp("Відстані між вузлами (м):");
```

```
disp(l);
```

```
disp("Розрахункові діаметри Dn (мм):");
```

```
disp(Dn);
```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						107
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

disp("Температури в вузлах для номінального режиму (°C):");
for i=1:N
    disp("Вузол " + string(i) + ": t_p = " + string(t_p_max_arr(i)) + ", t_z = " +
string(t_z_max_arr(i)));
end

disp("Фактична кількість втрат теплової енергії (середня доба, кВт·год): " +
string(mean(Q_loss_hourly) * 24));

disp("Встановлена потужність котельні (основного джерела з урахуванням втрат,
кВт): " + string(Q_boiler));

// Схема з збільшеною сіткою на 20%
scf();
a = gca();
a.auto_scale = "off";
plot(x, y, "b-o", "thickness", 2);
xtitle("Схема теплової мережі");
for i=1:N
    xstring(x(i), y(i) + 20, "Вузол " + string(i) + ": Q=" + string(Q_base(i)) + " кВт; " +
string(round(t_p_max_arr(i))) + "/" + string(round(t_z_max_arr(i))) + " °C");
end
for i=1:N-1
    mid_x = (x(i) + x(i+1))/2;
    mid_y = (y(i) + y(i+1))/2;
    xstring(mid_x, mid_y - 20, "l=" + string(round(l(i))) + " м, Dn=" + string(Dn(i)) + "
мм");
end
x_min = min(x);

```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						108
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

y_min = min(y);
x_max = max(x);
y_max = max(y);
range_x = x_max - x_min;
range_y = y_max - y_min;
xmin_exp = x_min - 0.1 * range_x;
ymin_exp = y_min - 0.1 * range_y;
xmax_exp = x_max + 0.1 * range_x;
ymax_exp = y_max + 0.1 * range_y;
replot([xmin_exp, ymin_exp, xmax_exp, ymax_exp]);

```

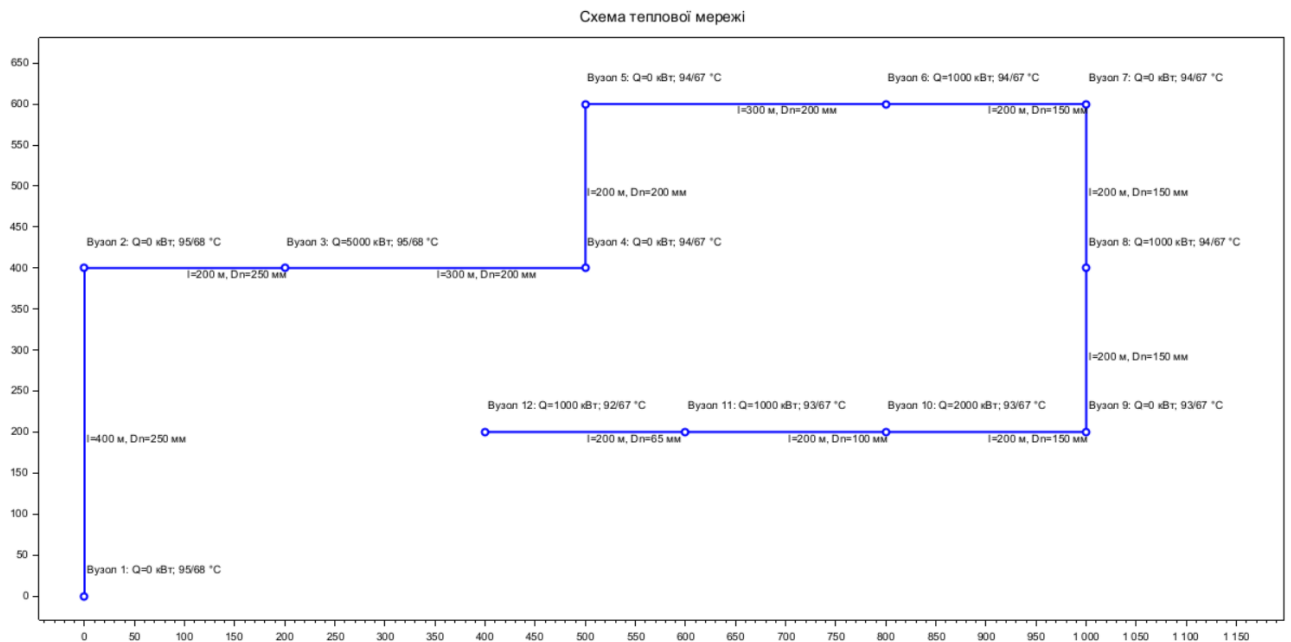


Рисунок 6.1 Схема теплової мережі

## Список використаних джерел

1. Про теплопостачання: Закон України від 30.06.2024 № 3764-IX : станом на 14 травня, 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15#Text> (дата звернення: 14.05.2025).
2. Погосов, О., Барановська, С., Дорошенко, А., & Барилюк, Д. (2025). ДІЯ, ЯК ФІЗИЧНА ВЕЛИЧИНА. ЛАПЛАСІАНИ І ДІЯ ДЛЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ. *Матеріали конференції МЦНД*, (15.08. 2025; Харків, Україна), 280-288.
3. Malkin, E., & Pogosov, O. (2015). Оцінка вторинних енергоресурсів та напрямки підвищення енергоефективності при реконструкції систем паропостачання промислових підприємств. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, (18), 106-112.
4. Skochko, V., Solonnikov, V., Pohosov, O., Naba, K., & Koziachyna, B. (2024). Minimization of Heat Losses in District Heating Networks by Optimizing their Configuration. *Проблеми регіональної енергетики*, (3 (63)), 182-195.
5. Погосов, О., Скочко, В., Кулінко, Є., & Тетерук, Д. (2024). Оптимізація теплових мереж методом зменшення витрати первинної енергії.
6. Про затвердження Правил охорони праці та безпечної експлуатації технологічних трубопроводів: Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України № 755 від 24.10.2014. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1438-14#n15> (дата звернення: 14.05.2025).
7. Про затвердження Правил технічної експлуатації теплових установок і мереж: Наказ Міністерства палива та енергетики України № 71 від 14.02.2007. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0197-07#Text> (дата звернення: 14.05.2025).
8. ДБН В 1-2-6:2021 Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість. Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. 36 с.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						110
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
10. Ukraine's Greenhouse Gas Inventory 1990-2022. Annual National Inventory Report for Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Paris Agreement. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. Kyiv. 2024. Available at: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Ukraine\\_NIR\\_2024.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Ukraine_NIR_2024.pdf).
11. EFDB - Main Page. IPCC - Task Force on National Greenhouse Gas Inventories. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php> (date of access: 13.05.2025).
12. Про затвердження Норм витрат палива і мастильних матеріалів на автомобільному транспорті: Наказ Міністерства транспорту України №43 від 10.02.1998. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0043361-98#n12>
13. World Steel Association. (n.d.). *Amount of CO<sub>2</sub> emitted per tonne of steel produced*. World Steel Association. URL: <https://worldsteel.org/about-steel/facts/steelfacts/climate-action/amount-of-co2-emitted-per-tonne-of-steel-produced/>
14. Результати діяльності вітчизняної металургійної галузі за 2023 рік. Профспілка металургів і гірників України. URL: <http://pmguinfo.dp.ua/ukraina/7284-rezultati-diyalnosti-vitchiznyanoji-metalurgijnoji-galuzi-za-2023-rik> (дата звернення: 12.05.2025).
15. Державна служба статистики України. Державна служба статистики України. URL: <https://ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 12.05.2025).
16. Famiglietti J, Gerevini L, Spirito G, Pozzi M, Dénarié A, Scoccia R, et al. Environmental Life Cycle Assessment scenarios for district heating network. An Italian case study. 17th Int Symp Dist Heat Cool Nottingham Trent Univ 6–9 Sept 2021, Nottingham, United Kingdom 2021;7:368–79. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.094>.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						111
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

17. Cleveland, C. (2025, November 21). *Power plant efficiency since 1900*. Visualizing Energy. URL: <https://visualizingenergy.org/power-plant-efficiency-since-1900/>
18. Raufi, I. Thermal efficiency of coal-fired power plants: From theoretical to practical assessments. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.019>
19. Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water. (2013, September 1). *HVAC factsheet – Boiler efficiency* (PDF). Commonwealth of Australia. URL: <https://www.energy.gov.au/sites/default/files/hvac-factsheet-boiler-efficiency.pdf>
20. Vogelesang, H. (2008). An introduction to energy consumption in pumps. *World Pumps*, 2008(496), 28–31. URL: [https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(07\)70434-0](https://doi.org/10.1016/S0262-1762(07)70434-0)
21. Константинов Ю. М., Гіжа О. О. Технічна механіка рідини і газу: Підручник. – К.: Вища школа, 2002. – 277с.: іл. – ISBN 966-642-093-7.
22. Kulichenko V. R. *Hydraulics, hydraulic machines, and hydraulic drives: Textbook*. – Kyiv: Inkos, Center for Educational Literature, 2006. – 616 p. – ISBN 966-8347-38-2.
23. Scala Graduum Caloris. Calorum Descriptiones & Figna. (1700). *Philosophical Transactions (1683-1775)*, 22, 824–829. URL: <http://www.jstor.org/stable/102813>.
24. Petrosyan, A. (2019). Determination of optimal thermal insulation layer thickness of outer structures of buildings according to the load of heating and cooling system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 698. 022058. 10.1088/1757-899X/698/2/022058.
25. Başoğul, Yusuf & Demircan, Cihan & Keçebaş, Ali. (2016). Determination of optimum insulation thickness for environmental impact reduction of pipe insulation. *Applied Thermal Engineering*. 101. 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.010.
26. Hua Yin, Huafang Guo, Zhenrong Lin, Weiqiang Xiao & Zhentao Duan (2018). Determining optimum insulation thickness by thermoeconomic analysis for a pipeline system in a subway central cooling system. *Applied Thermal Engineering*, Volume 136, Pages 454-461, ISSN 1359-4311, URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.02.078>.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						112
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

27. Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг 20.09.2022 № 1188.

URL:[https://zakononline.ua/documents/show/509055\\_699176](https://zakononline.ua/documents/show/509055_699176)

28. IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. Available at: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						113
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		