

Методика розрахунку затримки температури теплоносія в централізованих системах тепlopостачання

Ілля Заєць, студент¹ (ORCID: 0009-0009-7516-4214).

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

АНОТАЦІЯ

У роботі виконано чисельне моделювання часових та температурних процесів у двотрубній тупиковій централізованій тепловій мережі з метою розробки методики розрахунку затримки температури теплоносія. Модель базується на дискретизації добового температурного графіка зовнішнього повітря та враховує технологічну затримку котельні й час транспортування теплоносія до кожного споживача.

Ключові слова: централізоване тепlopостачання, тепла мережа, температурний графік, енергоефективність.

1. ВСТУП

У сучасних централізованих системах тепlopостачання важливо підвищувати ефективність і надійність, зокрема забезпечувати швидку реакцію на зміну зовнішньої температури. Доставка теплоносія від котельні до споживачів супроводжується затримками, що залежать від довжини мережі, швидкості потоку та режимів регулювання, - це призводить до дисбалансу між попитом і подачею і знижує енергоефективність та комфорт [1,2].

У роботі запропоновано методику розрахунку цієї затримки на основі моделі зі сталим витратою й швидкістю руху, без урахування теплових втрат і з врахуванням залежності навантаження від зовнішньої температури

2. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Метою роботи є розробка методики розрахунку загальної затримки температурного сигналу в централізованих системах тепlopостачання — часу між зміною зовнішніх умов або командою в котельні й фактичним настанням відповідної зміни температури у споживача. Для цього формалізовано просторово-одновимірну кінематичну модель транспортування по двотрубній тупиковій мережі, виведено аналітичні вирази для часових затримок і температур, описано послідовний обчислювальний алгоритм для подачі й звороту та проведено аналіз чутливості до ключових параметрів (швидкість потоку, протяжність труб, технологічна затримка регулювання τ). Модель враховує дві інерції — технологічну (інерційність котельні) і фізичну (транспортування теплоносія); зовнішня температура задається періодично або як експериментальний часовий ряд, а реальна подача включає часову затримку τ . Обчислення виконуються кроковим дискретним методом із малим часовим кроком для адекватного відтворення динаміки, що дозволяє дослідити нагрів/охолодження, оцінити вплив параметрів і застосувати модель для оптимізації режимів і виявлення критичних ділянок мережі.

Вихідні параметри:

n – кількість споживачів

$l(1)$ – відстань від котельні до першого споживача (м)

$k(i)$ – відстань між споживачами i та $i+1$ м.

Q_i – проектна потужність споживача I

v — швидкість води в трубах (м/с).

$T_{\text{supply,design}}$ – проектна температура подавальної води (°C)

$T_{\text{return, design}}$ – проектна температура зворотної води (°C).

$T_{\text{out,min}} = -20^\circ\text{C}$ – мінімальна зовнішня температура.

$T_{\text{in door}} = 20^\circ\text{C}$ – внутрішня температура.

$C_p = 4,186$ кДж/кг·K – питома теплоємність води.

1. Основні обчислення

Загальна проектна потужність котельні N визначається як сума проектних потужностей усіх споживачів. Це початковий крок для визначення базової витрати теплоносія і встановлення режиму котельні [3,4].

$$N = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (1)$$

2. Витрата теплоносія

Витрата теплоносія визначається з теплової потужності та прийнятого перепаду температур між подачею і зворотним трубопроводом. [5,6,7,8,9]:

- Загальна витрата теплоносія (кв/с)

$$G = \frac{N}{C_p \cdot (T_{\text{supply,design}} - T_{\text{return,design}})} \quad (2)$$

- Витрата теплоносія для споживача I (кг/с)

$$G_i = \frac{Q_i}{C_p \cdot (T_{\text{supply,design}} - T_{\text{return,design}})} \quad (3)$$

3. Відстань до споживачів

- Відстань до першого споживача:

$$L(1) = l(1) \quad (4)$$

- Відстані до наступних споживачів ($i=2\dots n$):

$$L(i) = L(i-1) + k(i-1) \quad (5)$$

4. Зовнішня температура

Задається періодичною функцією (функція-імітатор).

Використовується косинусний закон:

$$T_{\text{out}}(t) = -5 + 5 \cdot \cos\left(\frac{2\pi(t - 50400)}{86400}\right) \quad (6)$$

де 86400 с – тривалість доби;

50400 с – зсув для врахування максимуму температури.

5. Температура подавальної води котельні.

Залежність температури подавальної води від зовнішньої температури задається лінійною або кривою, визначеною нормами проектування:

$$T_{\text{supply}}(T_{\text{out}}) = T_{\text{supply,design}} - \quad (7)$$

$$- \frac{T_{\text{supply,design}} - T_{\text{in,door}}}{T_{\text{in,door}} - T_{\text{out,min}}} \cdot (T_{\text{out}} - T_{\text{out,min}})$$

6. Теплова потреба споживачів

Теплова потреба споживача i залежно від зовнішньої температури (кВт):

$$Q_{\text{demand},i}(t) = Q_i \cdot \frac{T_{\text{in,door}} - T_{\text{out}}(t)}{T_{\text{in,door}} - T_{\text{out,min}}} \quad (8)$$

7. Температура зворотної води від споживачів.

Температура зворотної води від споживача i обчислюється як:

$$T_{\text{return},i}(t) = T_{\text{supply},i}(t) - \frac{Q_{\text{demand},i}(t)}{G_i \cdot c_p} \quad (9)$$

8. Температура зворотної води в котельні.

Температура зворотної води в котельні як середньозважене значення з урахуванням часу доставки:

$$T_{\text{return,boiler}}(t) = \frac{\sum_{j=1}^n G_j \cdot T_{\text{return},j}(t - t_{\text{travel},j})}{G} \quad (10)$$

Результати розрахунку.

Чисельне моделювання на базі запропонованої методики дає адекватні фізичні результати. Графік зміни температур для даної конкретної задачі наведено на рис. 1.

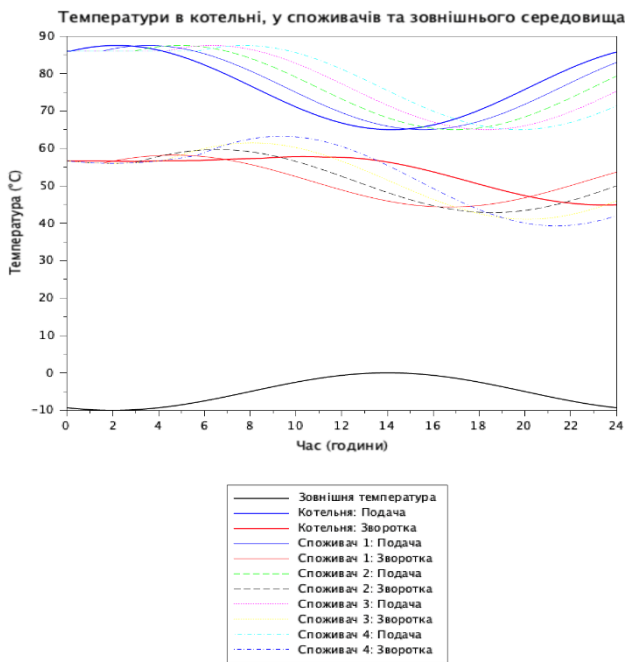


Рисунок 1. Графік зміни температур споживачів і джерела теплової енергії.

3. ВИСНОВОК

У роботі розроблено просторово-одновимірну чисельну модель двотрубної тупикової мережі з урахуванням технологічної та фізичної інерції (затримка регулювання котельні і час транспортування) та реалізовано її методом скінченних різниць з покроковою ітераційною схемою для подачі/звороту. Модель продемонструвала суттєвий вплив протяжності мережі, швидкості руху теплоносія і технологічної затримки на загальну затримку

температурного сигналу (в прикладі — $\approx 9,33$ год при 4 км і 1 м/с).

Отримані результати дозволяють виявляти критичні ділянки, оцінювати чутливість системи та застосовувати модель для оптимізації режимів роботи котельні; її можна розширити підрахунком теплових втрат, змінною витратою та калібруванням за польовими даними

Список літератури

- [1] Laakkonen, L., Korpela, T., Kaivosoja, J., Vilkkko, M., Majanne, Y., & Nurmoranta, M. (2017). Predictive supply temperature optimization of district heating networks using delay distributions. *Energy Procedia*, 116, 297-309. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.076>
- [2] Chen, Z., Wang, X., Hao, J., Fang, W., Du, X., & Hong, F. (2023). Various disturbances propagation analysis of district heating system based on the standardized thermal resistance method. *Energy Science & Engineering*, 11(12), 4611-4624. URL: <https://doi.org/10.1002/ese3.1603>
- [3] Skochko, V. I., Solonnikov, V. H., Pohosov, O. H., Haba, K. O., Kulinko, Y. O., & Kozlachyna, B. I. (2024). Minimization of Heat Losses in District Heating Networks by Optimizing their Configuration. *Problems of the Regional Energetics*, 3, 182-195. URL: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.3-63.15>
- [4] Кулінко, Є., Скочко, В., Погосов О., Тисленко, П., & Шебанова, М. (2024). Геометричне моделювання мереж системи теплопостачання на основі мінімізації тепловтрат. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*, 1(106), 278-300. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2024.106.278-300>
- [5] Zhao, J., & Shan, Y. (2019). An influencing parameters analysis of district heating network time delays based on the CFD method. *Energies*, 12(7), 1297. URL: <https://doi.org/10.3390/en12071297>
- [6] Meibodi, S. S., Rees, S., & Loveridge, F. (2024). Modeling district heating pipelines using a hybrid dynamic thermal network approach. *Energy*, 290, 130107. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.130107>
- [7] Quaggiotto, D., Vivian, J., & Zarrella, A. (2021). Management of a district heating network using model predictive control with and without thermal storage. *Optimization and Engineering*, 22(3), 1897-1919. URL: <https://doi.org/10.1007/s11081-021-09644-w>
- [8] Zimmerman, N., Kyprianidis, K., & Lindberg, C. F. (2019). Achieving lower district heating network temperatures using feed-forward MPC. *Materials*, 12(15), 2465. URL: <https://doi.org/10.3390/ma12152465>
- [9] Вороновський, Г. К. *Автоматизоване оперативне управління централізованим теплопостачанням в умовах не повної інформації* (Doctoral dissertation, Вороновський ГК).

ⁱ Робота виконана під керівництвом канд. техн. наук, доц. Олександра Погосова.