

УДК 620.9:697.34

к.т.н., доц. Олександр Погосов,

pohosov.oh@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2158-8897,

к.т.н., доц. Павло Пасічник,

pasichnyk.po@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8499-6949

Київський національний університет будівництва і архітектури

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.57.92-109>

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ У СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З УРАХУВАННЯМ ТРАНСПОРТНОГО ЗАПІЗНЕННЯ ТА ДОБОВИХ КОЛИВАНЬ НАВАНТАЖЕННЯ

Анотація. У роботі розглянуто підвищення енергоефективності систем централізованого теплопостачання (СЦТ) шляхом переходу від статичних температурних графіків до динамічного та прогнозного керування, що враховує транспортне запізнення теплоносія та добові коливання температури повітря. В основі роботи лежить математичне моделювання динаміки теплової мережі. Використано метод дискретного відстеження руху «порцій» теплоносія трубопроводами з урахуванням їхнього охолодження в умовах якісного регулювання відпуску теплової енергії. Реалізовано алгоритм прогнозування теплового навантаження, який базується на прогнозній зміні температури на джерелі з урахуванням часу надходження теплоносія до споживача. Удосконалено модель динамічних режимів СЦТ, яка, на відміну від наявних квазістаціонарних підходів, враховує вплив транспортного запізнення на виникнення явищ перегріву або недогріву при різких змінах погодних умов, що дозволяє точніше компенсувати інерційність системи та добові коливання зовнішньої температури. Розроблений алгоритм та результати чисельного моделювання доводять, що врахування транспортних запізнень у контурі керування дозволяє зменшити амплітуду коливань температури в приміщеннях споживачів та досягти економії енергоресурсів шляхом уникнення надлишкового відпуску теплоти.

Ключові слова: теплопостачання, централізовані системи, транспортне запізнення, температурний режим, енергоефективність, математичне моделювання, динаміка теплових мереж, прогнозне керування, теплове навантаження.

Вступ. Забезпечення енергетичної ефективності систем централізованого теплопостачання (СЦТ) є критичним завданням для сучасної енергетики, особливо в контексті зростання вартості первинних енергоресурсів та

необхідності декарбонізувати галузь. В Україні, де СЦТ займають значну частку в тепловому балансі міст, проблематика стає складнішою через значну протяжність мереж та їхнє фізичне зношення, а в останні роки в більшій мірі внаслідок регулярного умисного руйнування. Традиційні методи регулювання, що базуються на статичних температурних графіках (наприклад, затверджених для КП «Київтеплоенерго» [1]), часто не здатні забезпечити комфортні умови в споживачів у динамічних режимах, особливо при різких змінах температури зовнішнього повітря. Головною причиною цього є транспортне запізнення – час, необхідний для проходження теплоносія від джерела до споживача, який у протяжних мережах може вимірюватися годинами. Ігнорування цього фактору призводить до розбалансування системи, явищ перегріву або недогріву, та, як наслідок, до надлишкових витрат палива.

Формулювання цілей статті. Головною метою роботи є підвищення енергетичної ефективності та якості регулювання СЦТ шляхом розроблення та верифікування методу керування відпуском теплоти. Цей метод має базуватися на компенсуванні транспортного запізнення теплоносія, що дозволить мінімізувати розбіжність між генерованою тепловою потужністю та поточною потребою споживача в умовах нестационарних температурних режимів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі науково-практичні завдання:

1. Проаналізувати проблематику в умовах якісного регулювання теплових мереж (характерне регулювання для вітчизняних СЦТ). Специфікою вітчизняних систем теплопостачання є домінування центрального якісного регулювання, де керування тепловим навантаженням здійснюється зміною температури теплоносія $T_1=f(t_{зовн})$ за затвердженим температурним графіком (наприклад для м. Києва в 2026 році [1]) за умовно постійного гідравлічного режиму.

2. Систематизувати заходи щодо нівелювання наслідків незбіжності потужності. Необхідно систематизувати наявні підходи до компенсації інерційності СЦТ. Для цього потрібно проаналізувати методи прогнозного керування, які використовують прогнози погоди та моделі поведінки споживачів, для попереджувального змінення параметрів теплоносія, а також оцінити ефективності використання теплової акумуляції мережі як буфера для згладжування пікових навантажень.

3. Розробити математичну модель динаміки температурного поля в трубопроводах. Завдання полягає у створенні або адаптуванні алгоритму, який дозволяє з достатньою точністю моделювати поширення температурної хвилі вздовж трубопроводу з урахуванням незмінної масової витрати та теплових втрат.

4. Реалізувати алгоритм прогнозування теплового навантаження з урахуванням запізнення. Потрібно розробити методику розрахунку необхідної

температури на виході з джерела, яка базується не на поточній температурі зовнішнього повітря, а на прогнозованій температурі на момент надходження теплоносія до споживача. Це вимагає інтегрувати в модель точні прогнози теплового навантаження, які враховують не лише погодні фактори, а й добові профілі споживання.

5. Чисельно змодельовати та оцінити ефективність запропонованого підходу. На базі розробленого програмного коду необхідно провести серію чисельних експериментів для порівняння традиційного (статичного) та запропонованого (динамічного) методів регулювання. У результаті слід отримати графічні залежності, що демонструють зменшення амплітуди коливань температури у споживача та оцінити потенційну економію теплової енергії за рахунок усунення надлишкового теплопостачання.

Останні дослідження та публікації. Проблема підвищення ефективності СЦТ широко висвітлена у науковій літературі, де значна увага приділяється як екологічним аспектам, так і питанням моделювання та керування.

Сучасні дослідження активно розглядають перехід до четвертого покоління систем теплопостачання (4GDH) та залучення відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). У роботі [2] проведено порівняльний аналіз життєвого циклу (LCA) мереж централізованого опалення та теплових насосів, де показано переваги СЦТ в контексті споживання сонячної енергії та скидної теплоти. Схожі результати отримано в дослідженні [3], де за допомогою LCA-аналізу п'яти типів інфраструктури розподільних мереж доведено, що найбільший вплив на екологічний профіль життєвого циклу системи має саме транспортування теплоносія, що підкреслює важливість вибору матеріалів і технологій прокладання. В українському контексті в монографії [4] детально проаналізовано економічні аспекти оптимізування СЦТ, запропоновано моделі стабілізування тарифів та впровадження електротеплопостачання, проте недостатньо уваги приділено динамічному керуванню гідравлічними режимами в реальному часі.

Ключовим викликом для великих СЦТ є значна інерційність. У дисертаційній роботі [5] на прикладі норвезької системи показано, що оператори часто діють на основі досвіду, а не точних прогнозів, що призводить до неефективності. Автор пропонує використовувати модельне прогнозне керування, однак відзначає складність моделювання температури зворотного теплоносія. Аналогічні висновки зроблені в роботі [6] для шведської ТЕЦ, де впровадження модельного керування дозволило знизити температуру подачі, але виявило розбіжності між розрахунковим та реальним часом транспортного запізнення.

У статті [7] запропоновано використання адаптивних часових ієрархій для

прогнозування теплового навантаження, що дозволяє покращити точність прогнозів для оперативного керування. Однак, цей підхід фокусується на статистичних методах і не повною мірою враховує гідравлічну динаміку конкретної мережі.

Для точного врахування запізнень потрібні адекватні математичні моделі. У роботі [8] запропоновано метод дискретно-подієвого моделювання для динамічного аналізу теплових процесів у трубах, який дозволяє відстежувати фронти зміни температури. Цей метод є обчислювально ефективним порівняно з традиційними методами скінченних елементів. Водночас, у дослідженні [9] проаналізовано вплив теплоємності сталевих труб на термічні перехідні процеси і доведено, що нехтування теплоємністю стінки труби може призводити до значних похибок у динамічних розрахунках.

Квазі-динамічний підхід розглядається в статті [10], де запропоновано модель, що відстежує ретроспективні (історичні) температури джерела для визначення температури у споживача з урахуванням змінного запізнення. Автори демонструють, що такий підхід значно точніший за стаціонарні моделі. Схожа проблематика піднімається в роботі [11], де порівнюються вузловий метод, розроблений авторами з наявними комерційними продуктами для розрахунку теплових мереж, що підтверджує актуальність та значущість теми дослідження.

Значну кількість займають власне публікації про задачі оптимізування теплових мереж [12-14]. У роботі [15] запропоновано метод для оптимізування температури подачі з урахуванням розподілених затримок, що дозволяє мінімізувати сумарні витрати на теплові втрати та перекачування. Дослідження [16] пропонує використовувати градієнтний спуск для оптимізування параметрів кривих опалення, що є альтернативою традиційному ручному налаштуванню.

Незважаючи на значну кількість праць, існує потреба розроблення прикладних методик керування для українських реалій, які б поєднували фізичне моделювання транспорту теплоносія з урахуванням змінного запізнення та прогнозування погодних умов для нівелювання температурних відхилень у споживачів, що і є задачею даного дослідження.

Основна частина. На сьогодні система централізованого теплопостачання, характерна для великих міст України, де не було масової заміни теплових пунктів, є якісно керованою. При цьому перехід до погодозалежних індивідуальних теплових пунктів передбачає і перехід з якісної до кількісно-якісної схеми управління мережею. Але в реаліях, що склалися з механічними дросельними пристроями («шайбами») на вводах в ІТП маємо ситуацію, при якій система погодозалежного керування не може в повному обсязі регулювати

витрату теплоносія, а коригує виключно температурний графік споживача. Тому система теплопостачання залишається системою з якісним регулюванням.

У цьому контексті проблематика транспортного запізнення трансформується. Якщо в західних країнах (з характерним кількісним регулюванням) основна складність – це змінне запізнення через змінну швидкість потоку, то для українських реалій (якісне регулювання) ключовою проблемою стає невідповідність статичного графіка динамічним процесам (транспортне запізнення і акумулювання мережею). Аналіз показує, що такий статичний підхід має суттєві недоліки:

1. Часова невідповідність. Температурний графік є статичною залежністю. Враховуючи значну протяжність магістральних мереж, транспортне запізнення τ , с, створює ситуацію, коли теплоносій, параметри якого були задані за температурою повітря вночі, надходить до споживача вдень, коли потреба в теплоті вже змінилася (тут наводиться лише одна з усіх можливих ситуацій). Це призводить до систематичних перегрівів у перехідні періоди доби.

При центральному якісному регулюванні температура теплоносія на виході з джерела, $T_{1.source}$, °С, визначається поточною температурою зовнішнього повітря t_{out} , °С. Проте, навіть за умови відносно постійної витрати теплоносія ($G \approx const$), існує фіксоване транспортне запізнення $\tau = L / v$, с, де L – довжина траси, м, v – швидкість руху, м/с. Це призводить до того, що теплова хвиля, згенерована джерелом у момент часу t , с, на основі температури $t_{out}(t)$, °С, надходить до споживача у момент $t + \tau$, с. Якщо за час τ , с, температура зовнішнього повітря суттєво змінилася (наприклад, різке ранкове потепління або вечірнє похолодання), параметри теплоносія не відповідатимуть реальним потребам будівлі в момент надходження. Звісно в цьому твердженні знехтувано тепловою інерційністю будівлі, що є важливим фактором і в перспективі може дозволити знижувати розрахункові потужності джерел теплової енергії. Проте в даній статті ми умисно не торкаємося цієї теми для зменшення складності моделі.

Таким чином, система працює в режимі «постійного запізнення», тобто реагує на минулі погодні умови, а не на поточні чи майбутні для споживача.

2. Теплова деформація хвилі. При якісному регулюванні зміна потужності досягається зміною температури масивної кількості води та металу трубопроводів. Навіть стінки трубопроводів з їхньою високою теплоємністю формують значний вплив на інерційність системи [8]. Це при тому, що по суті централізована мережа є фактично акумулятором теплової енергії. Після спроби різко змінити температуру подавання (якісне регулювання) значна частина енергії витрачається на прогрівання (або охолодження) самого теплоносія (який вже є в трубопроводах) і власне трубопроводу. Температурна хвиля не лише

запізнюється на час τ , с, вона деформується («розмивається»). Споживач отримує зміну температури пізніше й повільніше, ніж це передбачено графіком, що робить систему ще менш гнучкою до різких змін погоди.

3. Розгалуженість мереж. Будь-які спроби прогнозного керування температурним графіком будуть ускладнюватися різною відстанню споживачів до джерела теплопостачання. Тому варто сформулювати поняття «центру потужності» для теплової мережі, відносно якого й проводити прогнозне регулювання.

Аналіз режимів роботи централізованих систем теплопостачання дозволяє виділити основну проблему регулювання: статична залежність температури теплоносія від температури зовнішнього повітря не враховує динаміку проходження теплоносія мережею.

На сьогодні, як було вже зазначено вище, базовим методом регулювання є центральне якісне регулювання за затвердженим температурним графіком. Як видно з прикладу графіку КП «Київтеплоенерго» на опалювальний сезон 2025/2026 рр. [1], температура в подавальному трубопроводі T_1 , °С, жорстко прив'язана до поточної середньодобової температури зовнішнього повітря t_{amb} , °С. Наприклад, при $t_{amb} = -5$ °С температура подавання має становити 79,0 °С, а при 0 °С знижуватися до 67,8 °С. Однак, цей підхід є реактивним: зміна параметра на джерелі відбувається «за фактом» зміни погоди, а споживач отримує цей параметр із часовою затримкою τ , с, коли погодні умови вже можуть змінитися.

Для вирішення проблеми незбіжності (дисбалансу) між генерованою та необхідною потужністю пропонується систематизація заходів компенсування, які поділяються на три рівні:

1. Рівень джерела енергії: прогнозне регулювання. Це найбільш ефективний захід для інерційних систем, яким є централізоване мережі теплопостачання. Суть методу полягає у переході від функції $T_1=f(t_{зовн})$ до функції:

$$T_1(t) = f(t_{amb,prog}(t+\tau)), \quad (1)$$

де t – поточний момент часу; τ – час, с, транспортування теплоносія до розрахункової точки мережі; $t_{amb,prog}$ – прогнозована температура зовнішнього повітря.

Такий підхід дозволяє доставляти споживачу теплоносії з параметрами, які будуть відповідати погодним умовам саме в момент його надходження до будівлі. Це нівелює ефекти перегріву або недогріву, викликані транспортним

запізненням.

2. Рівень мережі: використання акумуляційної здатності трубопроводів. Цей захід передбачає використання теплової інерції самих трубопроводів та теплоносія як енергетичного буфера. На рівні мережі цей захід може бути розділений на такі напрямки:

- активне акумулювання: свідоме підвищення температури теплоносія перед очікуваним різким похолоданням (навіть якщо поточна температура цього не вимагає), щоб заповнити мережу перегрітим теплоносієм;
- регулювання гідравлічними режимами: зміна витрати теплоносія G , кг/с, дозволяє варіювати величину транспортного запізнення τ , с. Збільшення швидкості циркуляції зменшує час запізнення, що робить систему більш чутливою до змін, але збільшує витрати електроенергії на транспортування (тут варто зауважити, що цей підхід характерний для систем з кількісним регулюванням).

3. Рівень споживача: локальне кількісне дорегулювання. Даний захід є коригувальним і реалізується на індивідуальних теплових пунктах (ІТП), які наразі в Україні широко впроваджуються [17]. Якщо температура теплоносія, що надійшла від джерела, вища за необхідну (через те, що джерело працювало на прогноз похолодання, яке не справдилося, або через запізнення реакції на потепління), автоматика ІТП обмежує відбирання теплоти шляхом прикриття регульовального клапана і, як наслідок, підвищення температури зворотної магістралі. Втім, цей захід ефективний лише проти перегріву будівлі. У випадку недогріву (коли теплоносій прийшов заохололим через затримання реакції на різке похолодання), локальна автоматика безсила, оскільки температура T_1 фізично обмежена доставленим теплоносієм.

Найбільш перспективним напрямком для дослідження є комбінація першого та другого заходів, а саме – розроблення алгоритму керування джерелом, який враховує фізичні запізнення на постачання теплоносія, а також акумулювальні властивості мережі, що реалізовано в даній роботі через математичне моделювання.

Для аналізу фактичної температури у вузлах споживання розроблено квазідинамічну модель, що базується на дискретному відстеженні елементарних об'ємів («порцій») теплоносія. На відміну від стаціонарних моделей, запропонований підхід дозволяє врахувати часовий розрив між виникненням завдання відносно фактичної температури на джерелі та необхідним навантаженням споживача.

Модель використовує ряд припущень:

1. Одновимірність потоку: розглядається одновимірний рух рідини, де температура $T(x, t)$ змінюється лише вздовж координати довжини трубопроводу

x , м, та часу t , с.

2. Нестисливість рідини: густина води ρ_w , кг/м³, приймається постійною, що спрощує гідравлічний розрахунок до системи алгебраїчних рівнянь Кірхгофа.

3. Еквівалентна інерційність: теплоємність сталеві труби та ізоляції враховуються через модифікацію теплоємності потоку (метод еквівалентної одноелементної моделі [5]), що дозволяє уникнути розв'язання системи двох пов'язаних диференціальних рівнянь (для води та стінки) без суттєвої втрати точності.

Класичне рівняння енергії для потоку рідини в трубі має вигляд [5]:

$$\rho_w c_{pw} \frac{\partial T_w}{\partial t} + \rho_w c_{pw} v_w \frac{\partial T_w}{\partial x} + q_{loss} = 0, \quad (2)$$

де v_w – фізична швидкість води, м/с; c_{pw} – масова теплоємність води; T_w – температура води в момент часу t , с, і на відстані x , м; q_{loss} – втрати теплоти на ділянці, Вт/м³.

Однак, таке рівняння не враховує акумулювання теплоти стінками труби, що є критичним для коректного моделювання перехідних процесів (особливо в умовах малих діаметрів розподільних мереж). Згідно з дослідженнями, вплив теплоємності труби можна врахувати, ввівши поняття еквівалентної термічної швидкості [5]:

$$\left(\rho_w c_{pw} + \rho_s c_{ps} \frac{A_s}{A_w} \right) \frac{\partial T_w}{\partial t} + \rho_w c_{pw} v_w \frac{\partial T_w}{\partial x} + q_{loss} = 0, \quad (3)$$

де ρ_s – густина сталі (стінки трубопроводу), кг/м³; c_{ps} – масова теплоємність сталі, кг/м³; A_s – площа поперечного перерізу стінки труби, м²; A_w – площа прохідного перерізу для води, м².

Звідси виводиться скоригована швидкість поширення температурної хвилі v_{th} , м/с, яка завжди менша за гідравлічну швидкість v_w , м/с [5]:

$$v_{th} = v_w \frac{\rho_w c_{pw}}{\rho_w c_{pw} + \rho_s c_{ps} \frac{A_s}{A_w}}. \quad (4)$$

Спрощене оцінювання транспортного запізнення з урахуванням швидкості

поширення температурної хвилі (замість фізичної швидкості води) виконується обчисленням положенням i -ої порції теплоносія:

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + v_{th}(t) \Delta t. \quad (5)$$

З праць [5, 8] відомо, що температура теплоносія, що надходить до споживача $T_{cons}(t)$, °С, є функцією температури джерела T_{source} , °С, яка була зафіксована в момент часу $(t - \tau)$, с, скоригованої на величину тепловтрат. Враховуючи коливання температури навколишнього середовища $T_{amb}(t)$, температура на виході ділянки розраховується за експоненціальною залежністю:

$$T_{out}(t) = T_{amb}(t) + (T_{in}(t - \tau) - T_{amb}(t)) \cdot e^{-\frac{kDL}{c_w m(t)}}, \quad (6)$$

де $T_{in}(t - \tau)$ – температура "історичної" порції води, що увійшла в трубу за час τ , с, до поточного моменту; $T_{amb}(t)$ – зовнішня температура, °С, у момент часу t , с; k – коефіцієнт теплопередачі стінки трубопроводу, Вт/(м²·К); $m(t)$ – масова витрата, кг/с, на ділянці.

Для практичної реалізації математичної моделі, розроблено наступний схемний алгоритм. Основна ідея алгоритму полягає у розрахунку необхідної температури теплоносія на джерелі $T_{1,source}$, °С, на основі прогнозованої теплової потреби споживача Q_{pred} , Вт, не в поточний момент часу t , с, а на момент прибуття теплоносія $t + \tau$, с. Крім того, необхідно враховувати втрати теплоти $Q_{loss}(t)$, Вт.

На першому етапі відбувається формування вхідних даних моделі: отримання чисельного прогнозу погоди: прогнозована температура зовнішнього повітря $T_{amb,prog}(t)$ і отримання поточних телеметричних даних з мережі (наприклад від наявної системи диспетчеризації): фактична температура подачі T_1 , °С, температура зворотної води T_2 , °С, та поточна масова витрата $G(t)$, кг/с (в умовах українських централізованих теплових мереж масову витрату можна вводити в алгоритм константним значенням і вимірювання не проводити).

Доцільно враховувати теплову інерційність і самих будівель (масивних огорожувальних конструкцій), для спрощення врахування якої прогнозована температура зовнішнього повітря повинна згладжуватися, наприклад через фільтр низьких частот [18-20]. Використання цього алгоритму згладжування даних потребує додаткового аналізування та проведення досліджень з наступним виявленням можливості застосування такого механізму для

коригування температурних прогнозних графіків СЦТ. Для умов вітчизняних СЦТ з якісним регулювання відпуску теплової енергії наступним етапом роботи алгоритму є визначення прогнозного навантаження згідно з фізичним рівнянням, Вт:

$$Q_{source}(t) = Q_{pred}(t + \tau) + Q_{loss}(t). \quad (7)$$

Загалом коригувальна уставка для джерела теплопостачання може бути визначена таким чином, °С:

$$T_{1,set}(t) = T_{2,pred}(t + \tau) + \frac{Q_{pred}(t + \tau)}{c_p G} + \Delta T_{loss}, \quad (8)$$

де $T_{2,pred}(t + \tau)$ – прогнозна температура зворотної води, °С, у момент часу $t + \tau$, с; ΔT_{loss} – втрати температури теплоносієм, °С, через тепловтрати.

У середовищі програмного забезпечення SciLAB 2026.0.0 був проведений чисельний експеримент, який наочно відображає явища запізнення в мережах. Для реалізації моделі використовували запропонований алгоритм, результати роботи моделі наведені на рис. 1.

На базі розробленого програмного коду було проведено чисельне моделювання роботи ділянки магістральної теплової мережі завдовжки 8 км (внутрішній діаметр 600 мм). Такі параметри характерні для віддалених районів споживання м. Києва. Було враховано еквівалентну теплоємність металеві стінки труби, що дозволило ідентифікувати не лише чисто гідравлічну швидкість теплоносія (1,0 м/с), але й термічну швидкість поширення температурної хвилі. Результати показали ефективний час запізнення для модельної ділянки близько 8640 с або 2,4 год. На отриманому графіку (рис. 1) показано три однотипних доби січневих температурних коливань зовнішнього повітря (орієнтовна амплітуда день-ніч на рівні 8,5 °С).

Графічні залежності показують наявність явища фазового зсуву та розбалансування потужностей при керуванні за температурним графіком [1]:

1. Виникнення недогріву: у години різкого нічного похолодання (найнижча точка T_{amb} , °С), ідеальна температура для споживача (зелена пунктирна лінія) повинна досягати максимуму. Проте фактична температура теплоносія у цей момент є значно нижчою, оскільки до споживача все ще надходить «вечірня», більш холодна порція води.

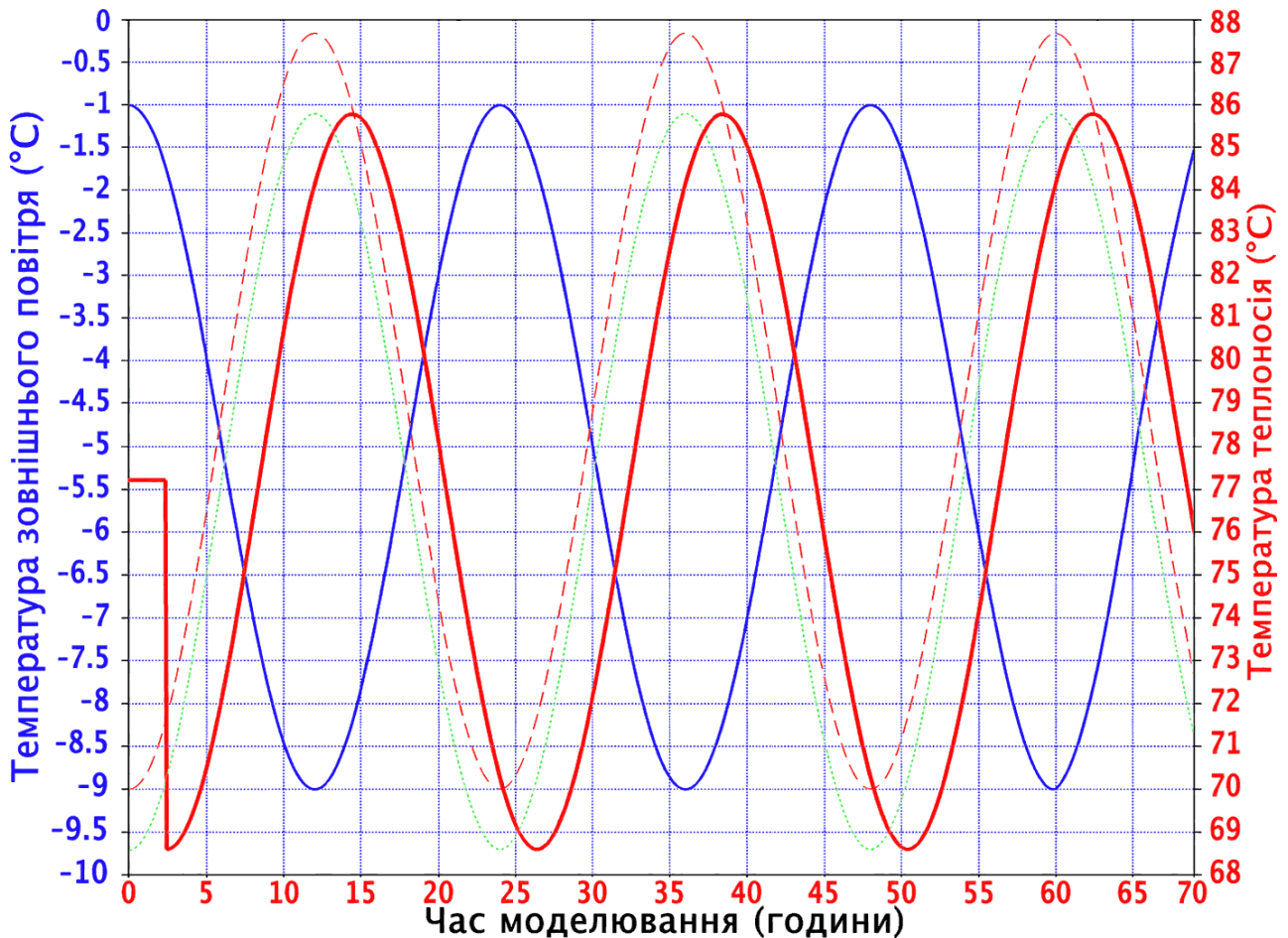


Рис. 1. Динаміка температурного режиму з урахуванням запізнення протягом трьох діб з однаковим графіком зміни зовнішньої температури для ділянки теплової мережі з умовним діаметром 600 мм і протяжністю 8 км при швидкості руху 1 м/с:

- добовий хід температури навколишнього середовища, який визначає керівний вплив на джерелі генерування;
- нормативна температура подавання T_1 , °C, за температурним графіком [1];
- фактична температура теплоносія, що надходить до індивідуального теплового пункту (ІТП) віддаленого споживача.
- необхідна температура теплоносія в результаті прогнозного керування.

2. Виникнення перегріву: з настанням світанку та різким потеплінням зовнішнього повітря (а також зростанні інсоляції особливо в перехідні періоди року), потреба в тепловій енергії знижується. Однак саме в цей момент до споживача доходить температурна хвиля, згенерована вночі на мінімумі амплітудної кривої температури. Фактична температура подачі суттєво перевищує необхідну.

Отримана різниця між кривими фактичної та ідеальної температури є математичним вираженням дисбалансу потужностей, спричинених транспортним запізненням. Цей чисельний експеримент беззаперечно доводить, що традиційне регулювання за статичним графіком для інерційних вітчизняних мереж є енергозатратним і потребує переходу до систем завчасного регулювання на основі прогнозу погоди та змінного часу транспортного запізнення. У розробленому програмному коді базову гідравлічну швидкість руху теплоносія v_w було прийнято на рівні 1,0 м/с. Ця величина відповідає типовим режимам течії у магістральних трубопроводах систем централізованого теплопостачання за умов номінального навантаження (якісне регулювання зі сталою витратою).

Водночас важливо зазначити, що відповідно до закладеної математичної моделі програма використовувала цю гідравлічну швидкість для розрахунку еквівалентної термічної швидкості v_{th} , м/с, поширення температурної хвилі. Через явище теплової інерції (поглинання частини енергії масивною сталеву стінкою труби і значним об'ємом теплоносія) фактична термічна швидкість (термін за [5]) є меншою за 1,0 м/с, що й формує реальне транспортне запізнення в системі.

Для наочного розуміння впливу інерційності системи на запізнення наводимо результати чисельного експерименту з довжиною мережі 8 км, швидкістю руху теплоносія 1 м/с (таблиця 1) при різних значеннях діаметра трубопроводу. Як видно з рис. 2, гідравлічне запізнення для всіх діаметрів при швидкості 1 м/с становить незмінні 2,22 години. Проте фактичне (термічне) запізнення має яскраво виражену нелінійну залежність від діаметра. У трубопроводах малих діаметрів ($D_u 50 \dots D_u 100$) співвідношення площі перерізу масивної сталеву стінки до прохідного перерізу води є найбільшим.

Відповідно, сталь поглинає значну частину теплової енергії фронту хвилі, знижуючи термічну швидкість поширення з 1,0 м/с до 0,73 м/с (рис. 3). Це призводить до того, що повне запізнення для труби $D_u 50$ перевищує гідравлічну майже на годину (3,03 год проти 2,22 год).

Зі збільшенням умовного проходу (від $D_u 300$ до $D_u 600$) питома частка металу відносно маси теплоносія зменшується, і термічна швидкість асимптотично наближається до гідравлічної, а додаткова інерційна похибка скорочується до 8-10 хвилин.

Це доводить, що при розробці систем керування тепловим навантаженням алгоритми прогнозування повинні бути адаптивними і враховувати не лише загальну довжину та швидкість циркуляції, але й конструктивні особливості (металоємність) конкретних магістралей».

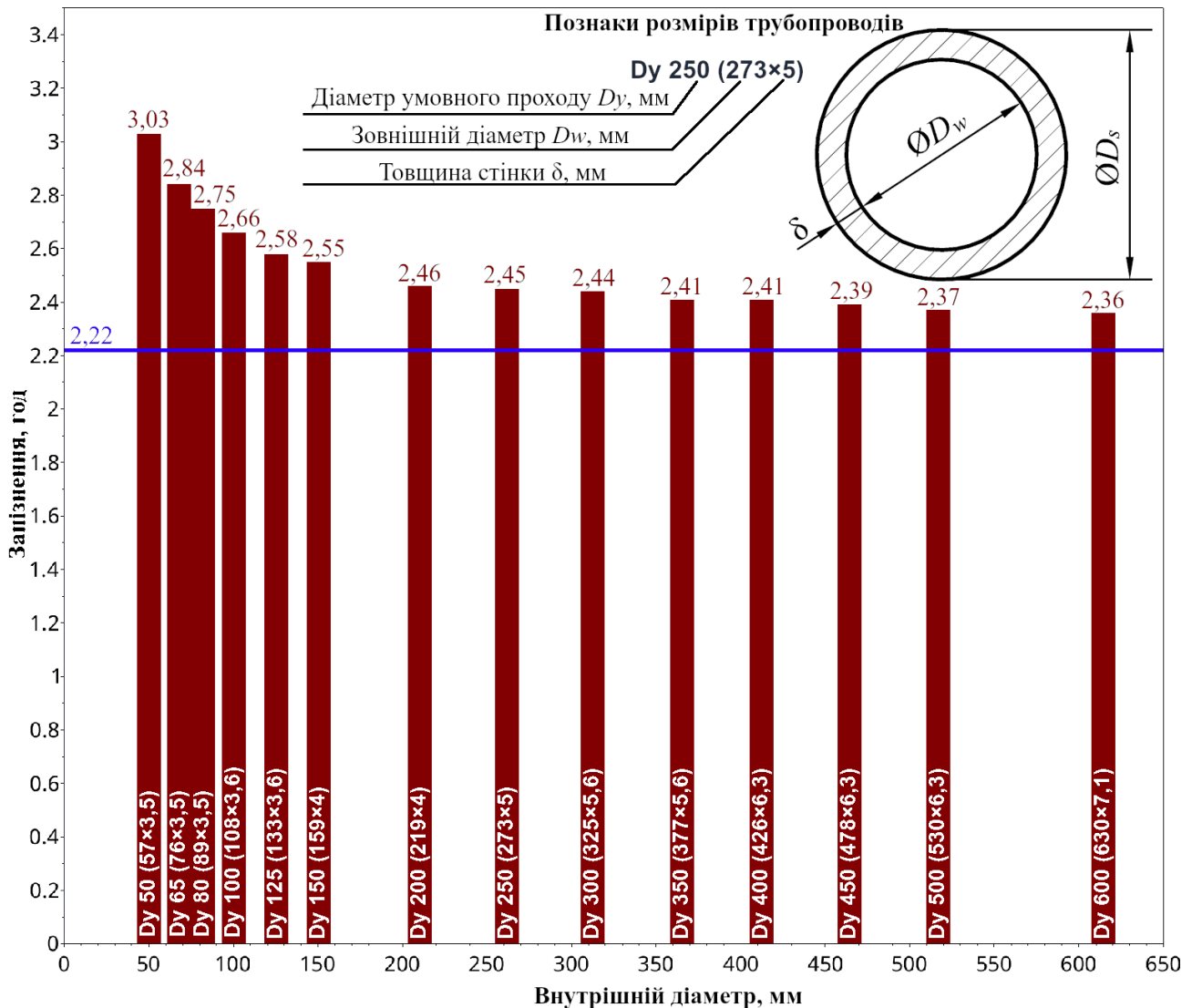


Рис. 2. Вплив діаметра трубопроводу на значення запізнення:
■ – повного (термічного); — – гідравлічного

Висновки. Наслідки, спричинені регулярними умисними пошкодженнями енергетичної інфраструктури, вказують на необхідність запровадження розосередженого генерування теплової енергії. При цьому запровадження децентралізованих мереж вірогідно призведе до погіршення локальних екологічних умов в містах. Через складність визначення теплових центрів СЦТ і складність коригування запізнь, спричинених значними протяжностями мереж, а також приєднанням споживачів у багатьох точках такої СЦТ, важливим кроком було б запровадження теплових просьюмерів (наприклад з тепловими насосами як джерел енергії), які б забезпечували приведення температурних режимів до оптимальних і дозволили б також знижувати розрахункові потужності центральних джерел теплової енергії. Важливим впливовим фактором саме для розподільчих частин мереж СЦТ є врахування термічної швидкості руху теплоносія [5], що підтверджується результатами даного чисельного моделювання.

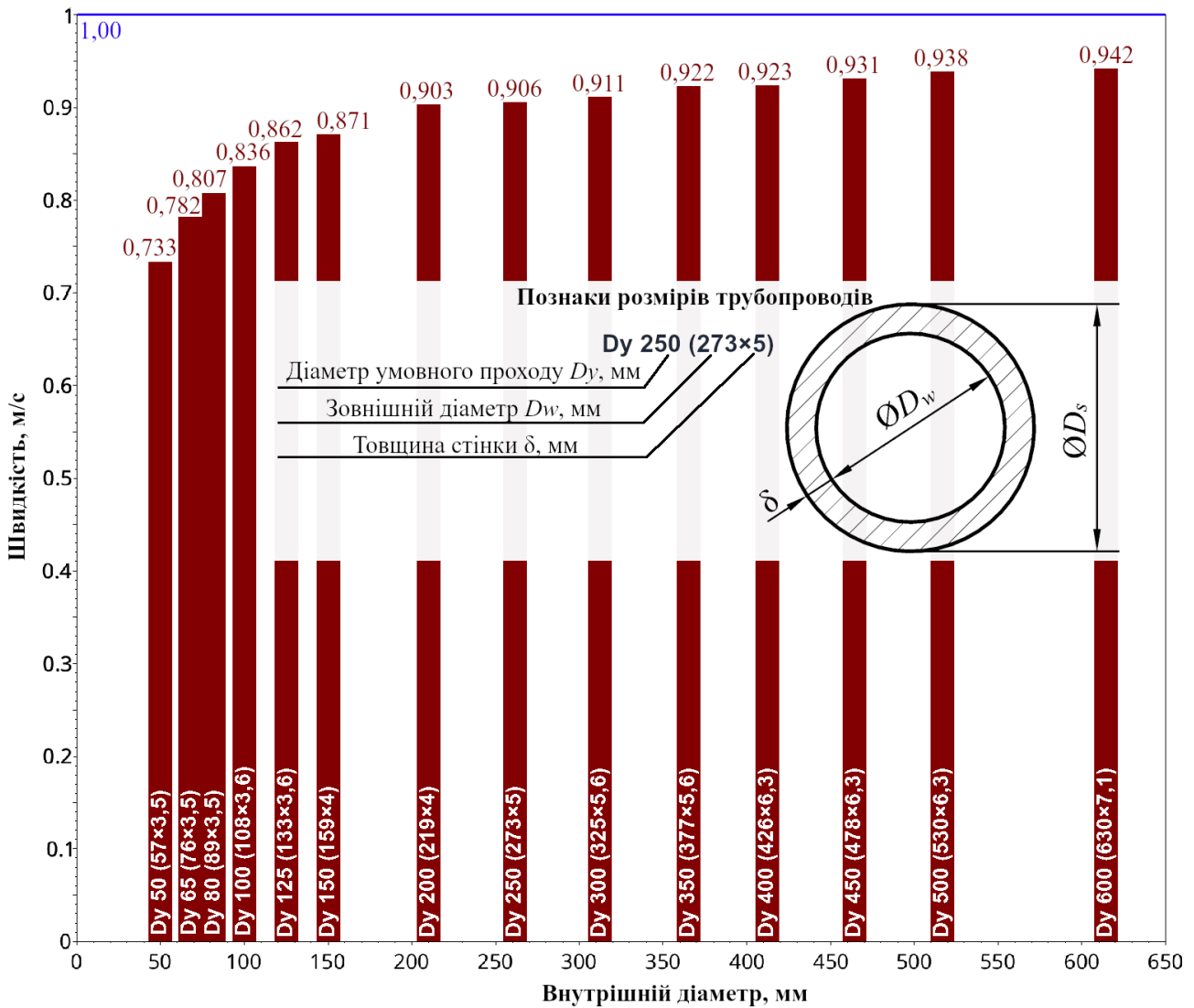


Рис. 3. Вплив діаметра трубопроводу на значення швидкості:
■ – термічної (розповсюдження хвилі); — – гідравлічної

Перспективи подальших досліджень. Потенційно значущим дослідженням є коригування наявних розрахункових температур зовнішнього середовища, що призведе до зменшення розрахункових потужностей джерел генерування, а також перегляд концепції врахування теплової інерційності сучасних будівель. Також потребує дослідження можливість застосування алгоритмів статистичного згладжування (наприклад фільтрів низьких частот) для прогнозного керування СЦТ з урахуванням інерційності будівель-споживачів.

References

1. Dlia naseleunia - TOV Yevro-Rekonstruktsiia - Zahalna Informatsiia. <https://tec4.kiev.ua/content/uploads/2025/12/Temperaturnyj-grafik-2025-2026.pdf>
2. Famiglietti, J., Gerevini, L., Spirito, G., Pozzi, M., Dénarié, A., Scoccia, R., & Motta, M. "Environmental Life Cycle Assessment scenarios for a district heating network. An Italian case study". *Energy Reports*, Vol. 7, Suppl. 4, 2021, pp. 368-379. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.094>.
3. Vauchez, M., Famiglietti, J., Autelitano, K., Colombert, M., Scoccia, R., & Motta, M. "Life Cycle Assessment of District Heating Infrastructures: A Comparison of Pipe Typologies in France". *Energies*, Vol. 16, Iss. 9, 2023, p. 3912. <https://doi.org/10.3390/en16093912>.
4. Havrys, O et al. Optyimizatsiia system teplopostachannia iz vykorystanniam ekonomiko-matematychnoho modeliuвання, NTU "KhPI", 2015. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/19168>
5. Rene, A.S., Foss B.A., Knudsen B.R. Model predictive control of district heating systems: Master's thesis, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, 2016 <https://nva.sikt.no/registration/0198ec57d5fb-21bb3d3f-1227-469b-9555-b1219f73866c>
6. Saarinen, L. Model-based control of district heating supply temperature: Doctoral dissertation, Luleå University of Technology, 2018, <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/993952>.
7. Bergsteinnsson, H. G., Møller, J. K., Nystrup, P., Pálsson, Ó. P., Guericke, D., & Madsen, H. (2021). "Heat load forecasting using adaptive temporal hierarchies". *Applied Energy*, Vol. 292, 2021, p. 116872. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116872>.
8. Xie, Z., Wang, H., Hua, P., & Lahdelma, R. "Discrete event simulation for dynamic thermal modelling of district heating pipe." *Energy*, Vol. 285, 2023, p. 129523. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129523>.
9. Capone, M., Guelpa, E., & Verda, V. "Numerical model for the analysis of thermal transients in district heating networks." *E3S Web of Conferences*, Vol. 197, 2020, p.01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019701004>.
10. Li, C., Prasad, S., Bai, Y., Turkeri, C., & Wang, J. "A quasi-dynamic model and comprehensive simulation study of district heating networks considering temperature delay." *Energy*, Vol. 314, 2025, p. 134855. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134855>.
11. Gabrielaitiene, I., Bøhm, B., Larsen, H. V., & Sundén, B. "Dynamic

- performance of district heating system in Madumvej, Denmark". In Proceedings of the 10th International Symposium on District Heating and Cooling. Lund University, Lund, 2006-09-03 – 2006-09-05, https://web.archive.org/web/20240416111122/http://www.lsta.lt/files/events/34_gabrielaitiene.pdf
12. Kulinko, Ye., Skochko, V., Pohosov, O., Tyslenko, P., & Shebanova, M. "Heometrychne modeliuvannia merezh systemy teplopostachannia na osnovi minimizatsii teplovtrat". *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika*, Vol. 1, No. 106, 2024, pp. 278-300. <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2024.106.278-300>.
 13. Sarbu, I., Mirza, M., & Crasmareanu, E. "A review of modelling and optimisation techniques for district heating systems". *International Journal of Energy Research*, Vol. 43, Iss. 13, 2019, pp. 6572–6598. <https://doi.org/10.1002/er.4600>.
 14. Stock, J., Xhonneux, A., & Müller, D. "Optimisation of district heating network separation for the utilisation of heat source potentials". *Energy*, Vol. 303, 2024, pp. 131872. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131872>.
 15. Laakkonen, L. Predictive supply temperature optimization of district heating networks: Master's thesis, Tampere University of Technology, 2016. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/24380/Laakkonen.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
 16. Boghetti, R et al. "Optimizing supply temperature control in district heating networks via differentiable dynamic simulation and gradient descent". In Construction, Energy, Environment and Sustainability: Proceedings of CEES 2025. *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 744, 2026, pp. 357-365, Springer, Singapore, https://doi.org/10.1007/978-981-95-1826-5_38
 17. Kyrylenko, O. V., Snizhkin, Yu. F., Basok, B. I., & Bazieiev, Ye. T. Enerhetyka Ukrainy: imovirni stsenarii vidnovlennia ta rozvytku. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, No. 9, 2022, pp. 22-37, <https://doi.org/10.15407/visn2022.09.022>.
 18. Zhang, J. H., Zhang, B. B., Zhang, Z. J., Liang, H. X., & Ge, D. M. "Low-frequency data analysis and expansion". *Applied Geophysics*, Vol. 12, Iss. 2, 2015, pp. 212-220, <https://doi.org/10.1007/s11770-015-0484-2>.
 19. Martin, M. A. "Frequency domain applications to data processing". *IRE Transactions on Space Electronics and Telemetry*, Vol. 1, 2009, pp. 33-41. <https://doi.org/10.1109/IRET-SET.1959.5008646>
 20. Van Haarlem, M. P. et al. LOFAR: The low-frequency array. *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 556, 2013, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220873>

UDC 620.9:697.34

PhD, Assoc. Prof. **Oleksandr Pohosov**,

pohosov.oh@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2158-8897,

PhD, Assoc. Prof. **Pavlo Pasichnyk**,

pasichnyk.po@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8499-6949,

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.57.92-109>

NUMERICAL MODELLING OF TEMPERATURE REGIME DYNAMICS IN DISTRICT HEATING SYSTEMS CONSIDERING TRANSPORT DELAY AND DAILY LOAD FLUCTUATIONS

Abstract. *The paper addresses the critical task of enhancing the energy efficiency and regulation quality of district heating systems (DHS) under the conditions of central qualitative regulation. Traditional control methods relying on static temperature schedules where the supply temperature is strictly tied to the current outdoor temperature are reactive and fail to ensure consumer comfort during sharp diurnal ambient temperature fluctuations. This failure stems primarily from transport delay—the hours-long travel time required for the coolant to pass from the heat source to remote consumers. Ignoring this factor leads to system unbalance, causing systematic overheating or underheating during rapid transitional periods of the day, which ultimately results in excess fuel consumption. To resolve this power imbalance, a quasi-dynamic mathematical model of thermal network dynamics has been developed based on a discrete tracking method for elementary "parcels" of coolant moving through pipelines. Unlike standard quasi-stationary approaches, the developed model explicitly factors in the thermal inertia of steel pipe walls and insulation by modifying the coolant's heat capacity using an equivalent one-element model. This approach derives a corrected thermal wave propagation velocity that is lower than the physical hydraulic velocity, allowing for accurate tracking of the temperature front. The integrated predictive control algorithm calculates the required preemptive supply temperature at the heat source based on numerical weather forecasts for the exact moment the coolant reaches the target calculated point of the network. Numerical simulation of a main heating pipeline section with the length of 8 km and the nominal diameter of 600 mm at the water velocity of 1 m/s conducted in SciLAB 2026 demonstrates that the effective thermal delay is approximately 2.4 hours. The graphical dependencies reveal a severe phase shift under static regulation: underheating occurs during rapid night-time temperature drops because the consumer still receives older, cooler water, while rapid morning warming causes severe overheating due to the delayed arrival of the hot night wave. Furthermore, parametric analysis highlights a highly non-linear relationship between pipe diameter and thermal delay. For smaller nominal diameters 50-100 mm the high ratio of steel wall mass to water cross-section significantly absorbs the front wave*

energy, slowing down the thermal wave and increasing total delay by nearly an hour over the hydraulic travel time (3.03 vs 2.22 hours). For larger nominal diameters of 300-600 mm, this additional inertial error drops to 8-10 minutes. The simulation results prove that incorporating transport delays into the control loop successfully reduces the amplitude of indoor temperature fluctuations and achieves energy savings by preventing excess heat supply. The study concludes that predictive control algorithms must be adaptive, accounting not only for pipeline length and circulation velocity but also for the specific constructive parameters and metal mass of the heating network.

Keywords: *district heating, centralised systems, transport delay, temperature regime, energy efficiency, mathematical modelling, district heating network dynamics, predictive control, heat load.*

Received/Надійшла до редакції 21.04.2026

Accepted/Прийнято 22.05.2026

Issued/Опубліковано 29.05.2026

 Distributed under the license / Розповсюджується за ліцензією:

Creative Commons Attribution 4.0 International License