

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN ENERGY

УДК 697.31

DOI 10.20535/1813-5420.4.2025.341295

А.М. Ганжа¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0003-3967-2421

В.М. Корнелюк¹, ORCID 0000-0002-0212-1290

Н.А. Марченко¹, к. т. н., доц., ORCID 0000-0001-9889-3713

¹Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ЖИТЛОВОГО МАСИВУ НА ОСНОВІ СИСТЕМНОГО МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОЇ МЕРЕЖІ

Розглянута система теплопостачання житлового масиву великого міста. Котельня розташована за рівнем землі більш ніж на 70 м вище житлового мікрорайону. Між котельнею та мікрорайоном передбачена понижуюча насосна станція. Проектом був передбачений технологічний захист трубопроводів теплових мереж споживачів нижньої зони від неприпустимого підвищення тиску в них в результаті знеживлення (зупинки) мережних насосів насосної станції. При аварійних перервах в електропостачанні насосної в опалювальному сезоні періодично мають місце гідроудари та ушкодження теплових мереж, а також змушені перерви в теплопостачанні споживачів, тому аналіз працездатності і надійності системи є актуальною задачею. Система теплопостачання представляє собою мережу, яка складається з направлених потоків, вузлів, де вони сходяться та розходяться, джерел (стоків) маси, теплоти, тиску, гідростатичного напору та нагнітаючого і теплоспоживаючого обладнання зі своїми характеристиками. Підведення або відведення теплоти може бути розсередженим (по ребрах (потоках), або точковим у вузлах. Потоки можуть міняти своє направлення в залежності від перепаду тиску. Для такої складної топології мережі використовуються методи дискретної математики і теорії графів. Представлено удосконалену математичну модель, яка складається з двох графів: гідравлічного та теплового, які взаємопов'язані між собою та є окремими етапами розрахунку. У тепловій моделі враховуються експлуатаційні характеристики теплового споживання та теплових втрат у мережах, у гідравлічній моделі - експлуатаційні характеристики нагнітачів та трубопроводів. Визначено експлуатаційні характеристики обладнання та події, які будуть впливати на надійність та працездатність системи. Виконано аналіз теплогідравлічного режиму теплової мережі в варіантах нештатної роботи та зроблені висновки про працездатність системи.

Ключові слова: системи теплопостачання, ефективність, надійність, працездатність, аналіз, дискретна математика, теорія графів, трубопровід, втрати теплоти, споживання, тепла енергія, електрична енергія, насоси.

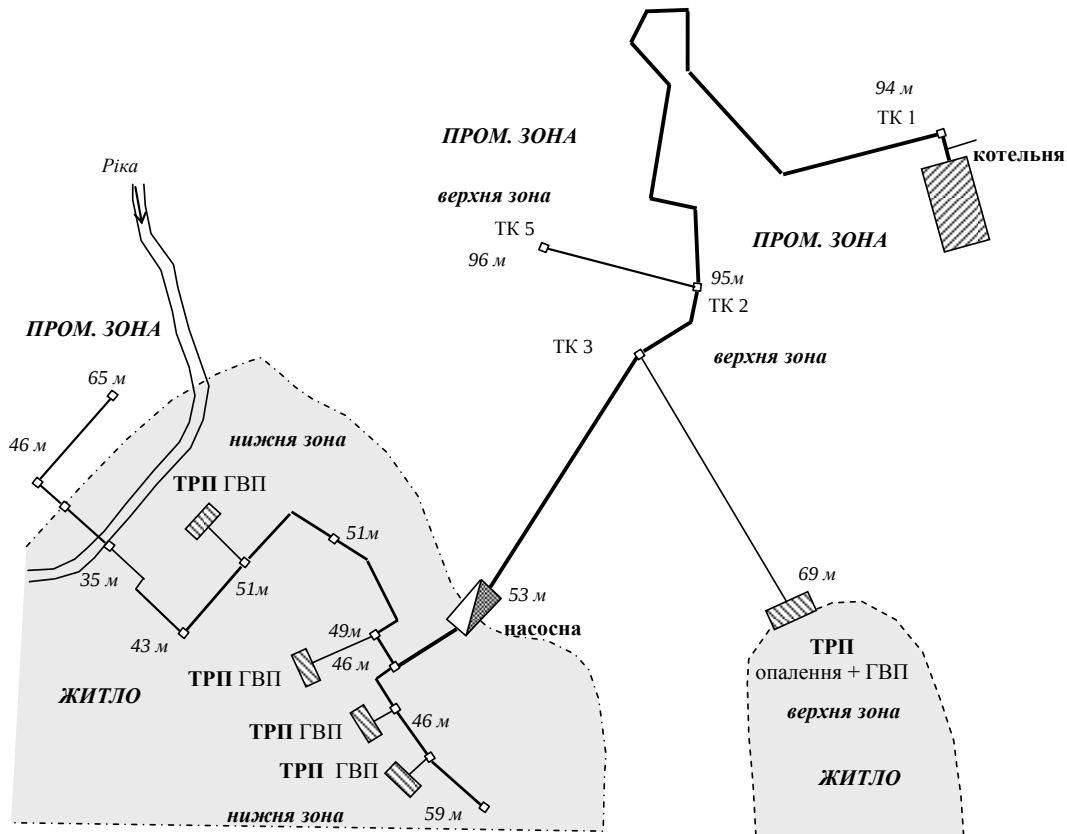
Вступ

Централізоване теплопостачання житлових масивів багатьох міст здійснюється від великих джерел теплової енергії, що обладнані водогрійними та паровими котлами. Джерела, як правило, розташовані на значній відстані від споживачів. Транспортування теплоносія від джерел до житлових масивів здійснюється по магістральним трубопроводам великих діаметрів, що призводить до значних теплових втрат. Великі відстані, на які транспортується теплоносій, обумовлюють також значні витрати електроенергії на транспортування теплоносія. Місцеві теплові мережі опалення підключені в основному по залежній схемі через теплорозподільчі пункти. Стан їх обладнання часто буває незадовільними, що погіршує якість опалення будинків та у останній час деякі споживачі відмовляються від централізованого теплопостачання, що зменшує потребу в постачанні теплової енергії. Крім того, самі такі схеми теплопостачання мають невисоку надійність.

Аналіз стану дослідження

У цій роботі розглянута система теплопостачання житлового масиву великого міста (див. рис. 1). Котельня розташована за рівнем землі більш ніж на 70 м вище житлового мікрорайону.

Між котельнею та мікрорайоном передбачена понижуюча насосна станція. Котельня і насосна станція знаходяться в експлуатації з 1960-х років. Проектом був передбачений технологічний захист трубопроводів теплових мереж споживачів нижньої зони від неприпустимого підвищення тиску в них при гідроударі в результаті знеживлення (зупинки) мережних насосів насосної станції, а саме установка скидних клапанів. Як показала практика експлуатації цієї системи, вона не є надійною. При аварійних перервах в електропостачанні насосної в опалювальному сезоні періодично мають місце гідроудари та ушкодження теплових мереж, а також змушені перерви в теплопостачанні споживачів. Тому розробка і наукове обґрунтування методів і засобів визначення надійності теплопостачання житлового масиву на основі системного математичного моделювання теплової мережі є актуальною задачею.



ГВП – гаряче водопостачання, ТК – теплова камера; ТРП – теплорозподільчий пункт

Рисунок 1 – Схема теплопостачання житлового масиву

Система теплопостачання (див. рис. 1) представляє собою мережу, яка складається з направлених потоків, вузлів, де вони сходяться та розходяться, джерел (стоків) маси, теплоти, тиску, гідростатичного напору та нагнітаючого і теплоспоживаючого обладнання зі своїми характеристиками. Підведення, або відведення теплоти може бути розсередженим (по ребрах (потоках), або точковим у вузлах. Потоки можуть міняти своє направлення в залежності від перепаду тиску. Для такої складної топології мережі використовуються методи теорії графів [1, 2]. У відомій літературі в основному приводяться класичні узагальнені алгоритми теорії графів як розділу дискретної математики [1, 2 та ін]. Питанням аналізу та розрахунку складних водяних, повітряних, вентиляційних та газових мереж методами дискретної математики і теорії графів присвячені роботи відомих авторів Євдокимов А.Г., Яловкин Б.Д., Хасилев В.Н., Меренков А.П., Аврух В.Ю та ін. У роботах вчених Новохатнього В. Г. та Матяша О.В. [3, 4] розглядаються аспекти надійності та пропускної спроможності трубопроводних мереж, а у працях вчених Горбенка Г.О. та Гакала П.Г. [5, 6] – розрахунки двофазних контурів систем термостабілізації космічних апаратів та їх елементів, але, як правило у цих роботах не наводяться математичні моделі, які використовувались при розрахунку розгалужених систем.

У даній роботі представлено удосконалену математичну модель, яка складається з двох графів – гідралічного та теплового, які взаємопов'язані між собою та є окремими етапами розрахунку. У тепловій моделі враховуються експлуатаційні характеристики теплового споживання та теплових втрат у мережах, у гідралічній моделі – експлуатаційні характеристики нагнітачів та трубопроводів.

Ціль і завдання дослідження

Метою дослідження є розробка математичної моделі та засобів аналізу системного моделювання системи теплопостачання і наукове обґрунтування визначення її надійності з урахуванням факторів експлуатації. Для виконання поставленої мети треба розробити удосконалену математичну модель, яка складається з двох графів: гідравлічного та теплового, які взаємопов'язані між собою та є окремими етапами розрахунку, визначити експлуатаційні характеристики обладнання та події, які будуть впливати на надійність та працездатність системи. Виконати аналіз теплогідравлічного режиму теплової мережі в варіантах нештатної роботи та зробити висновки про працездатність.

Матеріал і результати дослідження

Моделювання теплогідравлічного режиму теплової мережі проводилось з використанням програми теплогідравлічного розрахунку складної теплової мережі з використанням методів теорії графів [1, 2] та методики визначення теплових втрат при транспортуванні теплоносія, розрахунку систем споживання.

Опис математичної моделі.

а) Гідравлічна складова.

Перший закон Кірхгофа

$$A_{ij}G_j = M_i, \quad (1)$$

де A – матриця інцидентій (з'єднань) розміром $m \times n$. Елемент матриці дорівнює

$$A_{ij} = \begin{cases} -1, & \text{якщо потік по ребру виходить з вузла (початковий вузол ребра),} \\ 1, & \text{якщо потік входить у вузол (кінцевий вузол ребра),} \\ 0, & \text{якщо вузол не належить ребру} \end{cases};$$

m і n – відповідно число вузлів та ребер графа;

G – вектор масових витрат (потоків маси) по ребрам розміром n . Елемент G_j буде додатним, якщо напрямок потоку співпадає з напрямком ребра, і від'ємним, якщо напрямок потоку протилежний з напрямком ребра;

M_i – вектор джерела маси в узлі розміром m , елемент має знаки (+) – джерело, (-) – сток маси в узлі;

i – поточний індекс, кожній i -му рядку відповідає вузол;

j – поточний індекс, кожному j -му стовбцю відповідає ребро.

Якщо ввести матрицю лінійно незалежних контурів, то перший закон Кірхгофа можна записати в вигляді

$$G_j = \sum_{k=1}^n K_{jk}^T G'_k, \quad (2)$$

де K_{jk}^T – елемент транспонованої матриці лінійно незалежних контурів K , що має розміром $s \times n$,

$$K_{jk}^T = \begin{cases} 1, & \text{якщо ребро входить в контур і напрям збігається з напрямом обходу контура;} \\ -1, & \text{якщо ребро входить в контур і напрям протилежний напрямку обходу контура;} \\ 0, & \text{якщо ребро не входить в контур;} \end{cases}$$

s – кількість контурів (цикломатичне число графа), $s = n - m + 1$;

G'_k – вектор масових витрат зв'язків контуру розміром s , елемент якого дорівнює масовій витраті в одному з ребер контура, яке ще називають ребром зв'язку або головним ребром;

k – поточний індекс, кожному k -му рядку відповідає контур,

j – поточний індекс, кожному j -му стовбцю відповідає ребро.

Другий закон Кірхгофа для математичної моделі графа має вид

$$\sum_{j=1}^n K_{kj} \Delta p_j = 0, \quad (3)$$

де K – матриця лінійно незалежних контурів;

Δp – вектор перепадів тиску у ребрах, що має розмір n .

$$\Delta p_j = Z_j G_j |G_j| - Y_j, \quad (4)$$

де Z – вектор наведених опорів ребер, розмір якого дорівнює числу ребер n ,

$$Z_j = \frac{v_j}{2f_j^2} \sum \xi_j;$$

v – вектор середніх питомих об'ємів потоку речовини на ділянці ребер;

f – вектор прохідних площ каналів ребер

$\sum \xi$ – вектор сумарних гідравлічних та місцевих опорів ребер,

$$\sum \xi_j = \lambda_{Tj} \frac{L_j}{d_{ej}} + \sum \xi_{mj};$$

λ_T – вектор коефіцієнтів тертя одиниці довжини ділянок каналу ребер;

L – вектор довжин каналів ребер;

d_e – вектор еквівалентних діаметрів каналів ребер;

$\sum \xi_M$ – вектор сумарних місцевих опорів ребер;

Y – вектор активних джерел напору в ребрах (насоси, вентилятори, гідростатичний напір та ін.).

Вид запису рівняння (4) обумовлений необхідністю врахування напрямку потоку маси відносно напрямку ребра. Якщо в результаті розрахунку знак потоку маси G_j у ребрі змінився на протилежний, це означає, що течія в каналі буде в інший бік.

Елементи вектора швидкостей потоку в ребрах визначаються з рівняння нерозривності

$$W_j = \frac{|G_j|v_j}{f_j}. \quad (5)$$

Вектор активних джерел напору Y залежить від від'ємного або додатного значення гідростатичного тиску, обумовленого різницею висот початкового та кінцевого вузла ребра, а також від активного напору нагнітача

$$Y_j = -g \frac{A_{ji}^T b_i}{v_j} + g \frac{H_j}{v_j}, \quad (6)$$

де b – вектор висот вузлів, що має розмір m ; як нульова позначка виступає найнижча точка трубоної системи;

A^T – транспонована матриця з'єднань (інцидентцій);

g – прискорення вільного падіння.

H – напір нагнітача, у м.в.ст. Визначається згідно гідравлічної характеристики як функція масової витрати по ребру G_j .

Гідравлічні характеристики нагнітачів, в залежності від типу, були одержані шляхом інтерполяції графічних даних методом найменших квадратів.

Згідно перепадів тисків у кожному ребрі окремим алгоритмом розраховуються тиски у вузлах p_i .

б) Теплова складова.

Рівняння теплового балансу для вузла. Ентальпія речовини у цьому вузлі враховує всі притоки теплоти в нього. Якщо елемент у матриці з'єднання $A_{ij} = -1$ та масова витрата по ребру додатна, або $A_{ij} = 1$ та масова витрата по ребру від'ємна, то елемент теплової матриці $D_{ij} = 1$, в інших випадках $D_{ij} = 0$.

$$h_i = \frac{D_{ij}G_j h_{Kj} + M_i h_{джі}}{D_{ij}G_j + M_i}, \quad (7)$$

де $h_{джі}$ – ентальпія речовини, яка втікає у вузол з джерела, M_i враховується, якщо вузол є джерелом, інакше дорівнює у цій формулі 0;

h_{Kj} – ентальпія речовини, яка втікає у вузол з ребра, з урахуванням падіння температури речовини у ребрі (кінцева ентальпія на ребрі)

$$h_{Kj} = h_{пj} - \Delta Q_j, \quad (8)$$

де h_{Kj} дорівнює ентальпії у початковому для цього ребра вузлі;

ΔQ_j – втрати теплоти на ребрі. Для трубопроводів теплотрас [7]

$$\Delta Q_j = c_j(t_{пj} - t_{зj}) \left(1 - e^{-\frac{K_{lj}l_j}{G_j c_j}} \right), \quad (9)$$

де $t_{пj}$ і $t_{зj}$ – температури теплоносія у початковому вузлі ребра та у зовнішньому середовищі;

c_j – витрата і теплоємність теплоносія на ділянці;

l_j – довжина ділянки з однаковим типом прокладання, видом ізоляції і її фактичним станом;

K_{lj} – лінійний коефіцієнт теплопередачі на ділянці з урахуванням збільшення фактичної експлуатаційної теплопровідності ізоляції.

Температура теплоносія на виході з ребра

$$t_{Kj} = t_{пj} - \frac{\Delta Q_j}{c_j}, \quad (10)$$

Середня температура теплоносія у ребрі

$$t_j = t_{зj} + (t_{пj} - t_{зj}) \frac{\left(1 - e^{-\frac{K_{lj}l_j}{G_j c_j}} \right)}{\frac{K_{lj}l_j}{G_j c_j}}, \quad (11)$$

По цій температурі визначається c_j та v_j та інші теплофізичні властивості речовини.

Для систем теплоспоживання ΔQ_j та середня температура визначається окремим розрахунком [8, 9].

Загальна модель та алгоритм

Розрахунок відбувається ітераційним способом послідовних алгоритмів гідравлічної та теплової моделі до досягнення заданої збіжності по нев'язці витрат та тисків гідравлічної моделі і балансу тепла теплової моделі.

Основним елементом алгоритму є гідравлічна модель. Закони Кірхгофа та топологічна структура графа є складною і громіздкою системою нелінійних рівнянь. Пропонується використовувати ітераційний метод контурних поправочних витрат з обчисленням поправок методом Ньютона [10]. Перевага цього методу полягає в тому, що він оперує з матрицею контурів, яка зменшує порядок системи в порівнянні з матрицею з'єднань (інцидентів) і має швидку збіжність. Недоліком цього є те, що необхідно чітко задавати збалансований за витратами початковий потокорозподіл. Згідно з другим законом Кірхгофа (3) обчислюється та формується вектор нев'язок перепадів тисків за контурами, розміром s

$$f_l = f_k = \sum_{j=1}^n K_{kj} \Delta p_j, (12)$$

де індексне позначення l використовується реалізації методу Ньютона.

Далі обчислюються елементи матриці Якобі розміром $s \times s$

$$B_{lk} = \frac{\partial f_l}{\partial G_k} = 2 \sum_{j=1}^n K_{lj} K_{kj} Z_j G_j, (13)$$

та методом Гауса розв'язується система лінійних рівнянь

$$B_{lk} \Delta G_k = f_k, (14)$$

де ΔG_k – вектор поправних контурних витрат (вектор розв'язку) розміром s для методу Ньютона.

Згідно з першим законом Кірхгофа обчислюються нові значення витрат у ребрах (будується вектор витрат) для наступного наближення:

$$G_j^{(q+1)} = G_j^{(q)} - \sum_{k=1}^s K_{jk}^T \Delta G_k, (15)$$

де $G_j^{(q+1)}$ і $G_j^{(q)}$ – уточнені вектори витрат (поток) маси у ребрах для наступного наближення (ітерації) $q + 1$ та у поточному наближенні (ітерації) q ;

Розрахунок повторюється доти, доки максимальне за модулем значення нев'язки з векторів f_k та ΔG_k буде менше допустимого.

Авторами було запропоновано в алгоритмі використовувати формулу (15) замість формули (2), згідно якої необхідно було б знаходити вектор головних ребер контурів і масових витрат G_k' розміром s окремим складним алгоритмом та додавати до нього поправки ΔG_k . Експериментально перевірено збіжність запропонованого методу, що також забезпечую меншу кількість обчислень.

Аналіз працездатності та надійності системи теплопостачання

Вихідними даними для розрахунку є характеристики:

1) кожної ділянки (ребра графу): насосів; арматури (клапани, засувки, елементи обладнання); теплової мережі; підігрівачів гарячої води, систем споживання;

2) кожного вузла (вершини графу): висота; якщо вузол є джерелом – витрата та температура, теплоносія, що додається, тепловий потік у вузол; якщо вузол є виток – витрата теплоносія та тепловий потік, що виходить з вузла ззовні; для граничних вузлів – статичний тиск та температура теплоносія;

3) графу схеми теплової мережі (див. рис.2): матриця з'єднань (інцидентів, номер ребра (ділянки); ідентифікатор типу; початковий та кінцевий вузол; перелік та тип граничних вузлів (джерело чи скид);

4) роботи теплової мережі (температурні графіки, температури оточуючого середовища).

При аналізі даних розрахунку нормального режиму встановлено, що розбіжність розрахункових даних з вихідними даними (по тискам і витратам) складає не більше 0,5 %, що говорить про адекватність моделі і можливість її застосування для інших режимів. Відпуск теплоти до споживачів нижньої зони і ТРП верхньої зони знаходиться в межах норми. Відпуск теплоти до споживачів, що підключені до теплотраси від ТК 2 до ТК 5, значно нижче норми (температури внутрішнього повітря 13÷14°C) у зв'язку з великими тепловими втратами, що пов'язані зі значною протяжністю теплотрас великого діаметру і малим тепловим навантаженням. Слід зазначити, що в розрахунку не були враховані теплові втрати в квартальній тепловій мережі.

Розрахунок телогідравлічного режиму теплової мережі проводився і у варіантах нештатної роботи.

При відключенні підкачувального насоса на ТРП верхньої зони витрата теплоносія на ТРП падає в 2,4 рази, температура внутрішнього повітря і гарячої води знижується відповідно до 12°C і 35°C. Загальна витрата теплоносія незначно зменшується (з 1245 до 1218 т/год), що призводить до незначного підвищення

його тиску в окремих точках схеми. До споживачів нижньої зони і теплотраси від ТК 2 до ТК 5 надходить трохи більше теплоносія, що призводить до незначного підвищення відпуску теплоти до них.

При відключенні підкачувального насосу на насосній загальна витрата теплоносія через котли зменшується з 1245 до 983 т/год. Недопустимо підвищуються надлишкові тиски теплоносія в нижній зоні (перед регулюючим клапаном до 10 кгс/см², зворотного теплоносія нижньої зони – до 7,2 кгс/см²), у верхній зоні ТРП – до 9÷10 кгс/см². Кількість теплоносія в нижній зоні зменшується на 25%, що призводить до недовідпуску теплоти. В районі ТРП верхньої зони витрата теплоносія зростає на 15 %, що призводить до перетопу в цих споживачів. У зоні теплотраси від ТК 2 до ТК 5 витрата теплоносія зростає в 2 рази.

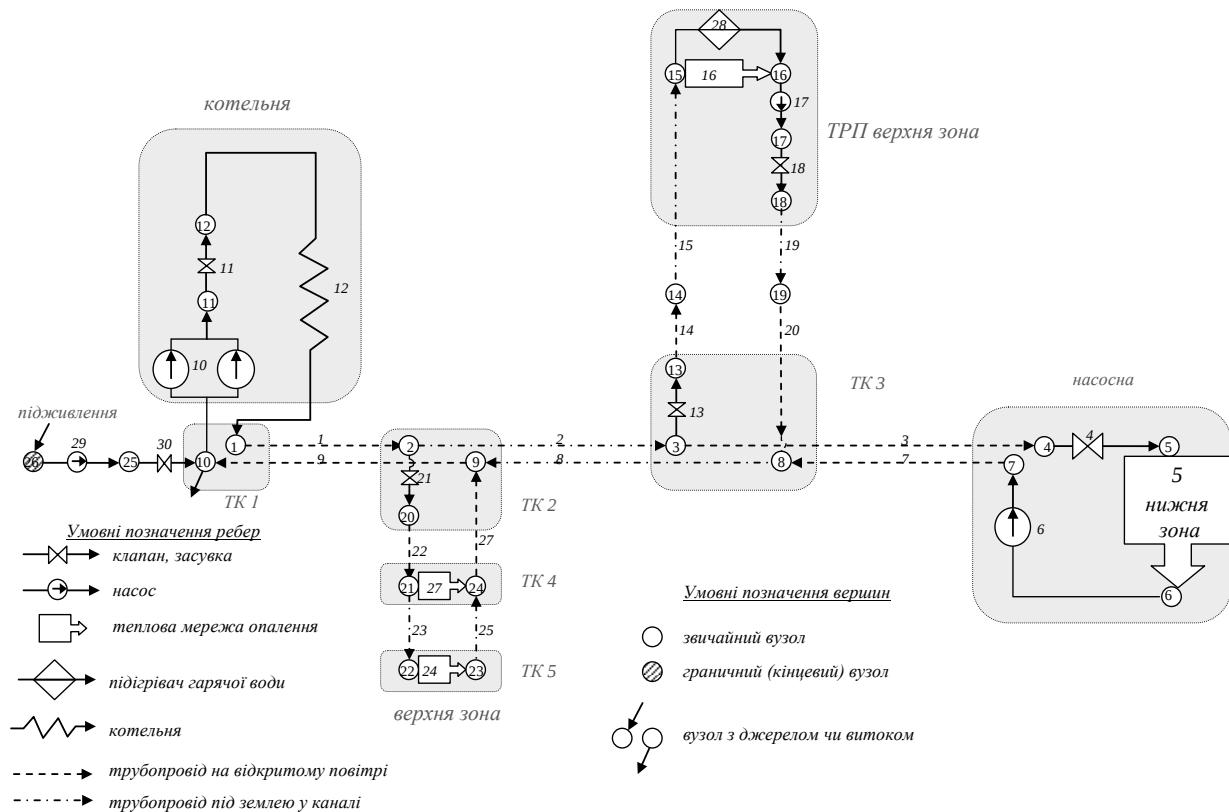


Рисунок 2 – Граф схеми теплопостачання житлового масиву з рис. 1

При відключенні підкачувального насосу на насосній та підкачувального насосу на ТРП верхньої зони загальна витрата теплоносія через котли зменшується з 1245 до 966 т/год. Недопустимо підвищуються надлишкові тиски теплоносія у нижній зоні (перед регулюючим клапаном до 10 кгс/см², зворотного теплоносія нижньої зони – до 7,2 кгс/см²), у верхній зоні ТРП – до 7,5÷9 кгс/см². Кількість теплоносія в нижній зоні зменшується на 22 %, що призводить до недовідпуску теплоти. В районі ТРП верхньої зони витрата теплоносія також падає на 22 %, що також призводить до недотопу в цих споживачів. В зоні теплотраси від ТК 2 до ТК 5 витрата теплоносія зростає у 2 рази.

При відключенні мережних насосів на котельні загальна витрата теплоносія через котли зменшується з 1245 до 844 т/год. Тиски теплоносія у верхній зоні недопустимо низькі (особливо на прямому трубопроводі ТК 2, ТК 4 і ТК 5). Температура теплоносія в прямому трубопроводі ТК 2 близька до закипання. В мережі теплотраси від ТК 2 до ТК 5 відбувається "перекидання" циркуляції з можливим закипанням теплоносія. В нижній частині та в районі ТРП верхньої зони витрата теплоносія падає на 32 %, що призводить до недотопу в цих споживачів.

При відключенні мережних насосів на котельні та підкачувального насосу на ТРП верхньої зони загальна витрата теплоносія через котли зменшується з 1245 до 779 т/год. Це призводить до наслідків, як і в варіанті 5, тобто до зниження тиску теплоносія в нижній частині до неприпустимо низького рівня; температура теплоносія в прямому трубопроводі ТК 2 близька до закипання; в мережі теплотраси від ТК 2 до ТК 5 відбувається "перекидання" циркуляції з можливим закипанням теплоносія. На відміну від попереднього варіанта в нижній зоні витрата теплоносія падає на 25 %, що також призводить до недотопу в цих споживачів. У верхній зоні ТРП у цьому випадку також відбувається "перекидання" циркуляції, але ймовірність закипання менша, ніж у мережі теплотраси від ТК 2 до ТК 5. Таким чином "перекидання" циркуляції у цьому випадку відбувається у всій верхній зоні.

Висновки.

Таким чином, побудовані методи і засоби визначення надійності тепlopостачання житлового масиву на основі системного математичного моделювання теплогідравлічних процесів з урахуванням взаємного впливу елементів системи і впливу зовнішніх факторів. Моделювання теплогідравлічного режиму теплової мережі показало, що він дуже складний та має низьку надійність. Надійність окремих елементів складної системи відчутно впливає на роботу всієї системи та її ділянок. Тому існуюча схема тепlopостачання підлягає реконструкції з метою підвищення її ефективності та надійності. Розроблені методи і засоби можуть бути застосовані для обґрунтування реконструкції інших систем тепlopостачання.

Список використаної літератури

1. Комп'ютерна дискретна математика / А. М. Сергієнко, А. А. Молчанова, В. О. Романкевич. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 189 с.
2. Кузьменко І. М. Теорія графів. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 71 с.
3. Новохатній В. Г. Топологічні аспекти надійності трубопровідних мереж / В. Г. Новохатній // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава : ПолтНТУ, 2015, Вип. 1(43). – С. 112 – 121
4. Аналіз пропускної спроможності діючої водопровідної мережі / О.В. Матяш, В.Г. Новохатній, С.О. Костенко // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава : ПолтНТУ.– 2016, Вип. 1 (46). – С. 221-231
5. The calculation of the heat control accumulator volume of two-phase heat transfer loop of a spacecraft thermal control system=Розрахунок обсягу гідроакумулятора двофазного контуру теплопереносу системи терморегулювання космічного апарату / А. Hodunov, G. Gorbenko, P. Gakal // Авіаційно-космічна техніка і технологія. - 2021. - № 5. - Р. 15-23.
6. Retrospective Review of a Two-Phase Mechanically Pumped Loop for Spacecraft Thermal Control Systems / G. Gorbenko, P. Gakal, R.Turna, A. Hodunov // *J. of Mech. Eng.*, 2021, vol. 24, no. 4, pp. 27-37
7. Ганжа А.М., Корнелюк В.М., Марченко Н.А. Аналітичне розв'язання диференціального рівняння теплопровідності для пошкодженої теплової ізоляції трубопроводів // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2024. No 1, С 125-130.
8. Ганжа А.М., Марченко Н.А., Семененко Л.В. Визначення ефективності тепlopостачання багатоповерхового житлового будинку з урахуванням нерівномірності підведення теплоти до приміщень та несистемних утеплень // *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. – 2019. – Том 9. – № 1.
9. Математичне моделювання теплової ефективності огорожувальних конструкцій багатоповерхових будівель з урахуванням індивідуального утеплення / А.М. Ганжа, Л.В. Семененко, Ю.Ф. Броневський, Ю.І. Саврасва // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – 2021. – №4. – С.46–58.
10. Кутнів М. В. Чисельні методи / М. В. Кутнів, Я. В. Пізюр. – Львів : Растр-7, 2024. – 277 с.

A. Ganzha¹, Dr. Tech. Science, Prof., ORCID 0000-0003-3967-2421

V. Kornelyuk¹, ORCID 0000-0002-0212-1290

N. Marchenko¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-9889-3713

¹National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

DETERMINATION OF HEAT SUPPLY RELIABILITY OF A RESIDENTIAL ESTATE BASED ON SYSTEMIC MATHEMATICAL MODELING OF A HEAT NETWORK

The heat supply system of a residential estate of a large city is considered. The boiler room is located more than 70 m above the ground level of the residential neighborhood. A lowering pumping station is provided between the boiler room and the neighborhood. The project provided for technological protection of the pipelines of the heat networks of consumers of the lower zone from an unacceptable increase in pressure in them as a result of the de-energizing (stopping) of the network pumps of the pumping station. During emergency interruptions in the power supply of the pumping station during the heating season, water hammer and damage to the heat networks periodically occur, as well as forced interruptions in the heat supply of consumers, therefore, the analysis of the system's operability and reliability is an actual task. A heat supply system is a network consisting of directed flows, nodes where they converge and diverge, sources (sinks) of mass, heat, pressure, hydrostatic head, and pumping and heat-consuming equipment with their own characteristics. Heat supply or removal can be distributed (along

edges (flows) or pointwise at nodes. Flows can change their direction depending on the pressure drop. For such a complex network topology, methods of discrete mathematics and graph theory are used. An improved mathematical model is presented, which consists of two graphs: hydraulic and heat, which are interconnected and are separate stages of calculation. The heat model takes into account the operational characteristics of heat consumption and heat losses in networks, and the hydraulic model takes into account the operational characteristics of superchargers and pipelines. The operational characteristics of the equipment and events that will affect the reliability and operability of the system are determined. An analysis of the thermal hydraulic regime of the heat network in abnormal operation options is performed and conclusions are drawn about the operability of the system.

Keywords: heat supply systems, efficiency, reliability, operability, analysis, discrete mathematics, graph theory, pipeline, heat loss, consumption, heat energy, electrical energy, pumps.

References

1. Komp'yuterna dyskretna matematyka / A. M. Serhiyenko, A. A. Molchanova, V. O. Romankevych. – Kyiv: KPI im. Ihorya Sikors'koho, 2022. – 189 s.
2. Kuz'menko I. M. Teoriya hrafiv. – Kyiv: KPI im. Ihorya Sikors'koho, 2020. – 71 s.
3. Novokhatniy V. H. Topologichni aspekty nadiynosti truboprovodnykh merezh / V. H. Novokhatniy // Zbirnyk naukovykh prats'. Seriya: Haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo. – Poltava : PolNTU, 2015, Vyp. 1(43). – S. 112 – 121
4. Analiz propusknoyi spromozhnosti diyuchoyi vodoprovodnoyi merezhi / O.V. Matyash, V.H. Novokhatniy, S.O. Kostenko // Zbirnyk naukovykh prats'. Seriya: Haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo. – Poltava : PolNTU. – 2016, Vyp. 1 (46). – S. 221-231
5. The calculation of the heat control accumulator volume of two-phase heat transfer loop of a spacecraft thermal control system=Rozrakhunok obsyahu hidroakumulyatora dvofaznoho konturu teploperenosu systemy termorehulyuvannya kosmichnoho aparatu / A. Hodunov, G. Gorbenko, P. Gakal // Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnolohiya. - 2021. - № 5. - P. 15-23.
6. Retrospective Review of a Two-Phase Mechanically Pumped Loop for Spacecraft Thermal Control Systems / G. Gorbenko, P. Gakal, R.Turna, A. Hodunov //J. of Mech. Eng., 2021, vol. 24, no. 4, pp. 27-37
7. Ganzha A.M., Kornelyuk V.M., Marchenko N.A. Analitichne rozv'yazannya dyferentsial'noho rivnyannya teploprovodnosti dlya poshkodzhenoï teplovoyi izolyatsiyi truboprovodiv // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya. 2024. No 1, S 125-130.
8. Ganzha A.M., Marchenko N.A., Semenenko L.V. Vyznachennya efektyvnosti teplopostachannya bahatopoverkhovoho zhytlovoho budynku z urakhuvannyam nerivnomirnosti pidvedennya teploty do prymishchen' ta nesystemnykh utepen' // Naukovyy visnyk Tavriys'koho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu. – 2019. – Tom 9. – № 1.
9. Matematychnye modelyuvannya teplovoyi efektyvnosti ohorodzhuval'nykh konstruktsiy bahatopoverkhovykh budivel' z urakhuvannyam indyvidual'noho uteplennya / A.M. Ganzha, L.V. Semenenko, YU.F. Bronevs'kyi, YU.I. Savrayeva // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. – 2021. – №4. – S.46–58.
10. Kutniv M. V. Chysel'ni metody / M. V. Kutniv, YA. V. Pizyur. – L'viv : Rastr-7, 2024. – 277 s.

Надійшла: 16.06.2025

Received: 16.06.2025