УДК 62-5:620.4
DOI https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.1-2/05

Максимова О.Б.
Інститут Військово-Морських Сил
Національного університету «Одеська морська академія»

Мінчев Д.С.
Одеський національний політехнічний університет

РОЗРОБКА МОДЕЛІ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ МІСТА В УМОВАХ НАЯВНОСТІ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТОКІВ

У роботі досліджуються імітаційні моделі системи теплопостачання міста об'єкта в умовах використання альтернативних енергетичних потоків, що відрізняються різною вартістю. Імітаційна модель складається з математичної моделі теплових процесів окремої квартири і багатоквартирного дому, математичних моделей устаткування систем теплопостачання і моделей процесів теплопостачання від різних джерел теплової енергії. Удосконалено математичну імітаційну модель системи теплопостачання міського району, споживача тепла при випадкових збуреннях, яка визначає його структуру, розглядається збурення фізичної природи температури навколишнього середовища і зміна вартості енергетичних джерел. Така структура визначається множиною технічних засобів, які розглядаються на базі рішення нестаціонарної задачі теплопередачі, що дає можливість формувати поточну модель залежно від збурень і різних витрат фінансових ресурсів. Розв'язання поставленої задачі відбувається за рахунок підвищення ефективності системи теплопостачання міста за рахунок розробки імітаційної моделі системи, що функціонує в умовах наявності альтернативних енергетичних потоків. Основна ідея розв'язання поставленої задачі полягає в тому, що до споживача підключається різні джерела енергопостачання, що збільшує кількість можливих комбінацій. Наявність альтернатив дозволить забезпечити необхідну теплову потужність шляхом комбінації наявного обладнання і досягти мети з мінімальними витратами.

Розроблена імітаційна модель транспортної системи дала можливість використовувати її в розподілених системах теплопостачання для забезпечення економічно доцільного процесу доставки теплоносія від джерела теплової енергії до споживача з урахуванням теплових і фізичних втрат теплоносія. Це дозволить надалі керувати структурою ціни енергопостачання.

Ключові слова: *імітаційна модель, система теплопостачання, збурення, змінна технічної структури, альтернативні джерела енергії.*

Постановка проблеми. Основна вимога до моделей, що розробляються, – обчислювальна простота. Як показали дослідження [1, с. 70], спроби точного моделювання температурних полів, або використання таких алгоритмів розв'язання задач, як динамічне програмування або генетичні алгоритми, призводять до суттєвого зростання обчислювальної складності вирішуваних завдань. Як наслідок, рішення виходять або на малих інтервалах часу, або з великою похибкою.

Для імітаційного моделювання міста доцільно виділити такі елементи: квартира, будинок, джерело теплової енергії, система теплопостачання.

Модель будинку повинна враховувати процеси теплообміну між окремими квартирами і всього будинку з навколишнім середовищем, а також моделювати зміни параметрів теплоносія, що надходить в будинок від різних теплових джерел.

Завдання моделей джерел теплової енергії – імітація процесу нагріву теплоносія з урахуванням можливих фізичних і теплових втрат, а також управління процесом підтримки заданої температури теплоносія з урахуванням температурного графіка.

Модель системи опалення набуває особливої важливості під час розгляду розподілених систем, таких як, наприклад, районні котельні. В цьому разі стають істотними витрати на транспортування теплоносія, а також теплові та фізичні втрати теплоносія в магістральних трубопроводах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження, пов'язані з імітаційним моделюванням теплопостачання сучасних міст і міських районів, останнім часом популярні в усьому світі [2, с. 378; 3, с. 41]. Вони спрямовані як на вдосконалення існуючих моделей, так і на розробку

нових підходів в моделюванні технологій отримання теплової енергії [4, с. 36; 5, с. 22]. Доцільність дослідження можливих моделей джерел і споживачів теплової енергії, а також методів підвищення ефективності процесів теплопостачання продемонстровані в [6, с. 892; 7, с. 172; 8, с. 3749; 9, с. 185].

Постановка завдання. Метою статті є підвищення ефективності системи теплопостачання міста за рахунок розробки імітаційної моделі системи, що функціонує в умовах наявності альтернативних енергетичних потоків.

Досягнення мети здійснюється розробкою імітаційних моделей:

– теплових процесів окремої квартири;

– теплових процесів багатоквартирного будинку;

– обладнання систем теплопостачання;

– процесів теплопостачання від різних джерел теплової енергії.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо імітаційні моделі елементів і процесів системи. Моделювання процесу опалення квартири засноване на визначенні коефіцієнта тепловіддачі радіатору α_p, його площі S_p, температури теплоносія $t_p^{вх}$ на вході, витраті теплоносія G_p і температурі повітря $t_к$. Кількість теплоти, що надійшла в квартиру, визначалося як:

$$Q_p = \alpha_p S_p (t_p^{вх} - t_к)\Delta\tau \qquad (1)$$

Величина Q_p визначає зміну температури повітря. Математична модель радіатору була доповнена шляхом введення коефіцієнту ξ, що імітує роботу керуючого вентиля на вхідному патрубку радіатора. Величина ξ приймає значення від 0, що відповідає закритій тепловій арматурі і відсутності витрат теплоносія в радіаторі, до 1, що відповідає повністю відкритій тепловій арматурі і номінальній витраті теплоносія. З урахуванням коефіцієнту вираз (1) приймає вид:

$$Q_p = \xi\alpha_p S_p (t_p^{вх} - t_к)\Delta\tau$$

При цьому витрата теплоносія через опалювальний прилад визначається як:

$$G_p = \xi G_p^{ном}$$

де $G_p^{ном}$ – номінальна витрата теплоносія.

Підтримання температури повітря в квартирі зводиться до визначення значення коефіцієнту, що відповідає зміні положення вентиля на вхідному патрубку приладу опалення.

Відповідно до діючих норм на вентиляцію було визначена зміна температури в квартирі, зумовлена припливом зовнішнього повітря. При цьому була використана модель зміни температури навколишнього середовища, взята з [1, с. 69].

Основними розрахунковими виразами були:

– зміна температури t тіла масою m при підводі / відводі деякої кількості теплоти

$$Q:\ t = t + \frac{Q}{mC_p}; \qquad (2)$$

– температура суміші двох середовищ з масами і початковими температурами

$$t_1,\ t_2:\ t = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2}. \qquad (3)$$

Враховуючи досвід попередніх досліджень з використанням моделювання температурного поля будівель [1, с. 71; 10, с. 54], було вирішено максимально спростити обчислювальну задачу і розглядати моделювання процесу теплопередачі через стіни, підлогу і стелю кожної квартири як нестаціонарну одновимірну задачу теплопередачі через плоску стінку. Відповідно тривимірне температурне поле всього будинку було замінено окремими одновимірними полями огороджувальних конструкцій.

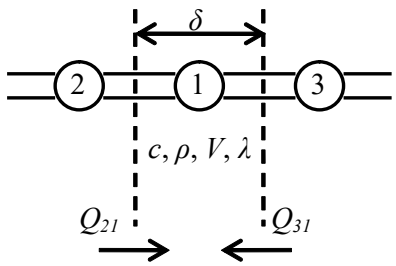


Рис. 1. Розбиття і числова сітка для нестаціонарної одновимірної задачі

Об'єкт розбивається на елементарні об'єми $V = \delta \times \delta \times 1 = \delta^2$ (рис. 1). Вважаючи, що питома теплоємність і коефіцієнт теплопровідності в межах елементарної ділянки постійні, для кожного елемента складається рівняння теплового балансу і визначається нове значення температури через кінцевий приріст часу $\Delta\tau$. У разі одновимірної нестаціонарної задачі (рис. 1) рівняння теплового балансу прийме вид:

$$Q_{21} + Q_{31} = \frac{c\rho V}{\Delta\tau}\left(t_1' - t_1\right).$$

Вирішуючи останнє рівняння щодо невідомої температури, отримуємо

$$t_1' = \frac{\lambda\Delta\tau}{c\rho V}\left(t_2 + t_3 + \frac{t_1}{\frac{\lambda\Delta\tau}{c\rho V}} - 2t_1\right)$$

Цей підхід застосуємо і для вирішення завдання теплопередачі. Припустимо, що між елементами 2 та 1 (рис. 1) здійснюється теплопередача з коефіцієнтом теплопередачі α, а через елементи 3 та 1 – теплопровідність, тоді температура t_1' буде визначатися за виразом

$$t_1' = t_1 + \frac{\alpha\Delta\tau}{c\rho\delta}\left(t_2 - t_1\right) + \frac{\lambda\Delta\tau}{c\rho\delta^2}(t_3 - t_1)\,. \qquad (4)$$

Під час вирішення завдання підтримання в квартирах заданої температури слід врахувати той факт, що температура теплоносія $t_{тн}$ у системі опалення залежить від температури навколишнього середовища $t_{ос}$ та температурного графіка. Цю залежність апроксимували виразом:

$$t_{тн} = (-0{,}0228 t_{тн}^{ном} + 0{,}509) t_{ос} + 0{,}5914 t_{тн}^{ном} + 9{,}12$$

де $t_{тн}^{ном}$ – максимальна температура теплоносія в трубопроводі, що подає.

Цей вираз також дозволяє отримати необхідне значення температури теплоносія в вузлових точках довільної системи опалення (на вході / виході котлів, теплових пунктів тощо) залежно від температурного графіка, що використовується, і температури навколишнього середовища.

Розглянемо модель теплових процесів у багатоквартирному будинку. Розроблена імітаційна модель квартири є елементарною коміркою, з яких формується довільне будівля. Як середньостатистичний був вибраний багатоквартирний 9-ти поверховий житловий будинок на 72 квартири. Планування будинку представлено на рис. 2.

Теплові процеси, що відбуваються в окремій квартирі, впливають на температурні поля всіх стін підлоги і стелі і, як наслідок, впливають на температури повітря в сусідніх квартирах, а також визначають величину втрат тепла в навколишнє середовище. Розроблена модель дозволяє задавати теплофізичні параметри кожної стіни окремо і таким чином імітувати різні матеріали і конструкції стін.

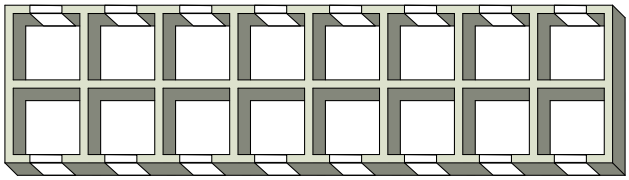


Рис. 2. Планування будинку

Можливість індивідуальної зміни витрат теплоносія в кожній квартирі визначила необхідність моделювання гідравлічної системи будинку. Спрощена схема гідравлічної системи показана на рис 3.

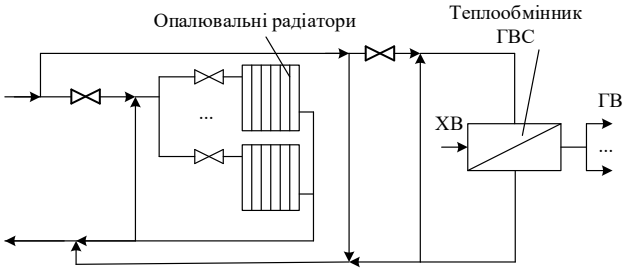


Рис. 3. Спрощена схема гідравлічної системи будинку

Розрахунок витрат теплоносія в різних потоках гідравлічної мережі виконувався за умови дотримання закону Кірхгофа [11, с. 126]:

$$\sum_i G_i = const\,,$$

де G_i – витрати теплоносія в одному вузлі гідравлічної мережі.

У разі змішування декількох потоків теплоносія з різними температурами температура суміші визначалася як:

$$t_{см} = \frac{\sum_i t_i G_i \Delta\tau}{\sum_i G_i \Delta\tau}$$

Завдання теплового пункту – забезпечити в системі опалення будинку температуру теплоносія відповідно до температурного графіка. Для цього на ТП встановлений відповідний регулятор, а задане значення температури визначається за (4).

Розглянемо моделі обладнання систем теплопостачання. В рамках цього дослідження були розглянуті такі джерела теплової енергії, як газовий котел, АГВ і теплонасосна установка.

Дослідження показали, що з погляду системи теплопостачання досить моделювати кількість генерованої теплової енергії як функції ККД котла:

$$Q = G_г R \tau$$

де $G_г$ – витрата газу, м^3/с; R – питома теплота згоряння, Дж/м^3.

Для вирішення завдання опалення, не виходячи з температурного графіка, визначалося необхідне значення температури теплоносія на виході котла. Кількість споживаного газу враховувалося у відповідному лічильнику. Теплотворна здатність газу і ККД котла визначали кількість корисної теплоти, що йде на нагрів теплоносія.

Відмінність моделі АГВ від котлів полягала в тому, що в АГВ міститься значна кількість води, яка акумулює тепло. У цьому разі температура суміші прямої і зворотної води в АГВ спочатку

знаходилась за виразом (3), а далі визначалося, наскільки температура зміниться з підведення теплоти від спаленого газу (2).

В основу моделі ТНУ була покладена залежність коефіцієнту трансформації енергії для ідеального циклу Карно [12, с. 154]:

$$K_{тр} = \frac{T_o}{T_o - T_{oc}}$$

де T_o – температурний потенціал тепла, що відводиться в систему опалення, *К*; T_{oc} – температура навколишнього середовища, *К*.

Реальний коефіцієнт трансформації менше ідеального і визначається ступенем термодинамічної досконалості компресора і незворотними втратами процесу:

$$K'_{тр} = \frac{T_o}{T_o - T_{oc}} h$$

Для вирішення завдання охолодження реальний коефіцієнт трансформації визначається як:

$$K'_{тр} = \frac{T_{oc}}{T_{oc} - T_o} h$$

Подальший розрахунок аналогічний розрахунку, що виконується для котлів. Одержуване / утилізоване тепло в ТНУ йде на зміну температури зворотної води в разі опалення, або холодної мережевої води – в разі ГВС.

Розглянемо моделі процесів теплопостачання від різних джерел теплової енергії. Якщо у разі з індивідуальними втратами джерела теплової енергії на транспортування теплоносія можна знехтувати, то для розподілених систем опалення це неприйнятно.

Чим більше розподілена система, тим більше довжина магістральних трубопроводів, більше кількість теплових пунктів, більше кількість різної арматури. Все це призводить до того, що в процесі експлуатації відбуваються постійні втрати теплоносія, пов'язані не тільки з технологічними потребами, а й зі зношуванням обладнання. Також велика протяжність трубопроводів призводить до більшого рівня теплових втрат. Всі ці фізичні і теплові втрати визначають вартість теплової енергії для кінцевого споживача. Тому для систем опалення, заснованих на різного виду котельнях, необхідно було додатково розробити моделі систем транспортування теплоносія.

Найбільшу складністю має модель систем опалення, що використовує районні котельні.

У рамках цього дослідження була розглянута система теплопостачання міського району, яка складається з 200 будинків. З котельні виходить 8 магістральних трубопроводів, які розподіляють теплоносій по різних напрямах. Діаметр труб становить 300 мм. У кожному трубопроводі на відстані 300 м один від одного розташовані 5 центральних теплових пунктів. Від кожного ЦТП йде один магістральний трубопровід діаметром 100 мм. До нього підключено 5 будинків на відстані 100 м один від одного.

Кожна ділянка магістрального трубопроводу характеризується фізичними і тепловими втратами теплоносія. Гранично допустиме значення теплових втрат в магістральних трубопроводах отримано через апроксимацію табличних даних для коефіцієнта лінійних втрат:

$$\alpha_{лин} = \beta \frac{(0,0012D + 0,1841)T + 0,0394D - 0,7873}{168}, \quad \text{Дж/(м·К)} \qquad (5)$$

де D – діаметр трубопроводу, мм; T – температурний перепад між теплоносієм і навколишнім середовищем, *К*; β – додатковий множник.

З погіршенням ізоляції рівень теплових втрат в трубопроводах збільшується. Величина β в (5) призначена для імітації цієї зміни стану ізоляції. Значення $\beta = 1$ відповідає нормованому рівню втрат.

Нормоване значення фізичних втрат теплоносія складає 5% від маси води, що знаходиться в гідравлічній системі. Для цієї теплової мережі лінійний коефіцієнт фізичних втрат $\phi = \beta \cdot 0,00008$ кг/м. Як і у разі з тепловими втратами додатковий коефіцієнт β дозволяє імітувати зміну фізичних втрат, пов'язаних з погіршенням стану трубопроводу. $\beta = 1$ відповідає ідеальному стану трубопроводу.

Для компенсації фізичних втрат у котельні передбачено додавання в систему холодної мережевої води.

Для вирішення завдання управління, в кожному ЦТП передбачений регулятор, що підтримує на виході температуру ЦТП відповідно до температурного графіка. Управління здійснюється шляхом підмішування в «обратку» гарячого теплоносія.

У загальному випадку в кожному ЦТП відбувається змішання двох потоків теплоносія: прямого гарячого потоку від котельні і зворотного потоку від споживача. На рис. 4 представлена гідравлічна схема ділянки теплової мережі. Цифрами позначені точки, в яких проводиться розрахунок витрат і температур теплоносія. Сам розрахунок складається з двох частин: в першій визначаються витрати теплоносія, в другій – температури.

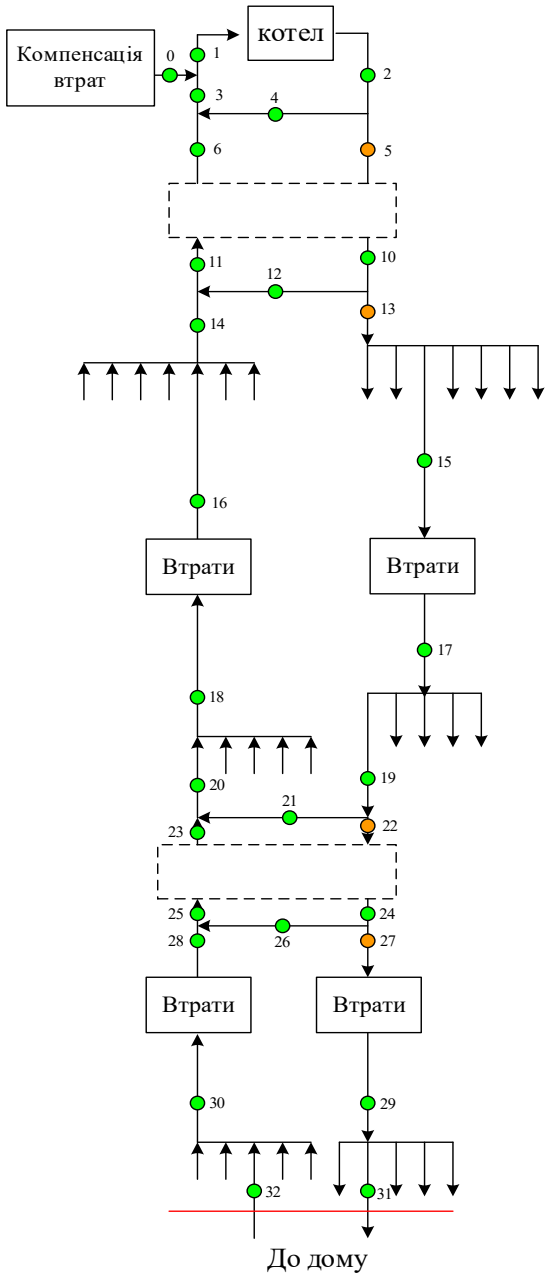


Рис. 4. Гідравлічна схема ділянки теплової мережі

У точках 5, 13, 22 і 27 розташовані регулятори витрати. Для простоти розрахунків було прийнято, що вони регулюють ступінь відкриття ψ відповідної теплової арматури. 0 відповідає «повністю закрита» тепловій арматурі, а 1 – «повністю відкрита». Поточна витрата визначається як добуток максимальної витрати на показник відкриття.

Витрати теплоносія в точках 2, 10, 24 є номінальними значеннями та розраховуються заздалегідь.

Послідовність розрахунків наступна:

$G_5 = G_2\psi_5$, $G_4 = G_2 - G_5$, $G_{13} = G_{10}\psi_{10}$, $G_{12} = G_{10} - G_{13}$, $G_{15} = G_{13}/8$, $G_{17} = G_{15} - 0.00008L$,

де L – довжина ділянки трубопроводу між точками 15 – 17.

$G_{19} = G_{17}/5$, $G_{22} = G_{19}\psi_{19}$, $G_{21} = G_{19} - G_{22}$, $G_{27} = G_{24}\psi_{27}$, $G_{26} = G_{24} - G_{27}$, $G_{29} = G_{27} - 0.00008L$,

де L – довжина ділянки трубопроводу між точками 27 – 29.

$G_{31} = G_{29}/5$, $G_{30} = 5G_{31}$, $G_{28} = G_{30} - 0.00008L$,

де L – довжина ділянки трубопроводу між точками 30–28.

$G_{25} = G_{26} + G_{28}$, $G_{23} = G_{22} - G_{27} + G_{28}$, $G_{20} = G_{23} + G_{21}$, $G_{18} = 5G_{20}$, $G_{16} = G_{18} - 0.00008L$,

де L – довжина ділянки трубопроводу між точками 18–16.

$G_{14} = 8G_{16}$, $G_{11} = G_{12} + G_{14}$, $G_6 = G_5 - G_{13} + G_{14}$, $G_3 = G_6 + G_4$, $G_0 = G_2 - G_3$.

Далі слідує розрахунок температур.

$$T_2 = T_1 + \frac{N\eta}{G_2 C_p}.$$

де N – потужність котла; η – КПД котла; C_p – теплоємність теплоносія.

$$T_{10} = \frac{G_5 T_2 + 200T_{10} + G_{11}T_{11}}{G_5 + 200 + G_{11}},$$

$$T_{17} = T_{10} - \frac{\alpha_{лин}(T_{10} - T_{oc})L}{G_{15}C_p},$$

де T_{oc} – температура навколишнього середовища; L – довжина ділянки трубопроводу між точками 15 – 17.

$$T_{24} = \frac{G_{22}T_{17} + 200T_{24} + G_{25}T_{25}}{G_{22} + 200 + G_{25}},$$

$$T_{29} = T_{24} - \frac{\alpha_{лин}(T_{24} - T_{oc})L}{G_{27}C_p}$$

де L – довжина ділянки трубопроводу між точками 27 – 29.

$$T_{28} = T_{in} - \frac{\alpha_{лин}(T_{in} - T_{oc})L}{G_{30}C_p}$$

де T_{in} – температура на виході з будівлі; L – довжина ділянки трубопроводу між точками 30 – 28.

$$T_{25} = \frac{G_{26}T_{24} + G_{28}T_{28}}{G_{25}}; \; T_{20} = \frac{G_{23}T_{24} + G_{21}T_{17}}{G_{20}};$$

$$T_{16} = T_{20} - \frac{\alpha_{лин}(T_{20} - T_{oc})L}{G_{18}C_p}$$

де L – довжина ділянки трубопроводу між точками 18–16.

$$T_{11} = \frac{G_{12}T_{10} + G_{14}T_{16}}{G_{11}}; \; T_3 = \frac{G_6T_{10} + G_4T_2}{G_3};$$

$$T_1 = \frac{G_3T_3 + G_0T_{хв}}{G_1}.$$

де $T_{хв}$ – температура мережевої води, що використовується для підживлення котла.

Проведений розрахунок дозволяє також оцінити тепловий ККД системи.

$$\eta_{сис} = \eta_1\eta_2\eta_3\eta_4\eta, \quad (6)$$

де η_1 – ККД ділянка трубопроводу між точками 15–17; η_2 – ККД ділянка трубопроводу між точками 27–29; η_3 – ККД ділянка трубопроводу між точками 30–28; η_4 – ККД ділянка трубопроводу між точками 18–16.

$$\eta_1 = \frac{G_{17}T_{17}}{G_{15}T_{15}},\ \eta_2 = \frac{G_{29}T_{29}}{G_{27}T_{27}},\ \eta_3 = \frac{G_{28}T_{28}}{G_{30}T_{30}},\ \eta_4 = \frac{G_{16}T_{16}}{G_{18}T_{18}}.$$

Слід також зазначити, що оцінка теплового ККД системи по (6) в перехідному режимі може давати істотну похибку.

Таким чином, запропонована модель транспортної системи теплоносія міського району дозволяє визначити параметри теплоносія в будь-якій точці системи з урахуванням теплових і фізичних втрат, як при вирішенні завдання опалення, так і при гарячому водопостачанні. Варіюючи кількість трубопроводів і ЦТП можна адаптувати цю модель для будь-яких розподілених систем опалення будь то модульні котельні, призначені для опалення групи будинків, або дахові котельні.

Проведемо обговорення результатів дослідження. Аналіз таблиці 1 показав, що вартість теплової енергії для відповідних джерел змінюється в істотних межах. Спільне вплив таких чинників, як залежність вартості електроенергії від часу доби, вже спожитої кількості, а також істотний діапазон зміни температурного коефіцієнту перетворення тепла у теплового насосу, призводять до того, що для ТНУ діапазон зміни вартості теплової енергії набагато більше, ніж в інших джерелах.

Слід також враховувати високий знос сучасних теплових мереж в містах України. В деяких містах знос теплових мереж такий, що до 50% теплової енергії не надходить до споживача.

Розглянемо для прикладу магістральний теплоізольований трубопровід з діаметром умовного проходу 300 мм, розташований на відкритому повітрі [13, с. 144]. Приймемо температуру теплоносія рівною 100 °С. Згідно з СНиП 41-03-2003 нормативні теплові витрати такого трубопроводу складають 76 Вт/м (80,7 Вт/м^2). При підземній канальній і безканальній прокладці цього ж трубопроводу ці величини відповідно становлять 105 Вт/м (111 Вт/м^2) та 157 Вт/м (166,6 Вт/м^2).

Приймемо, що житловий масив складається з типових 9-поверхових будинків на 72 квартири із середнім рівнем теплових втрат 204 кВт. У такому житловому масиві для підключення одного будинку потрібно в середньому 100 м трубопроводу. Вартість одиниці теплової енергії, одержуваної на котельні, передусім визначається вартістю газу, що спалюється. Витрати на електроенергію, необхідну для приводів насосів, свідомо не розглядаються, тому що вони тільки збільшують собівартість теплової енергії. Приймемо, що теплові втрати в трубопроводі відповідають нормативним. Тоді залежність собівартості тепла S (для діючих тарифів на газ) від кількості підключених будинків N в системі централізованого опалення набуде вигляду, показаного на рис. 5а. Ефективність такої системи теплопостачання при забезпеченні теплом міського району з 200 будинків із сумарним тепловим навантаженням 70 МВт становить 92,6%.

Повне намокання ізоляції на основі мінеральної вати призводить до збільшення теплових втрат в 11 разів. Численні перевірки стану теплових мереж у різних містах свідчать про те, що фактичні теплові втрати в десятки і сотні разів перевищують нормативні.

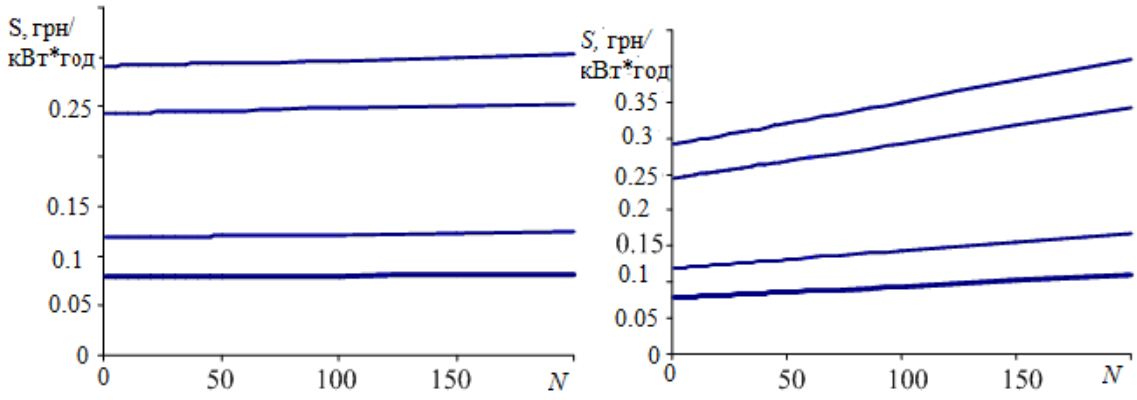
Згідно з [14, с. 129] нормоване значення фізичних втрат теплоносія не повинне перевищувати 0,0025 кг/(год*м). Фактичний стан трубопроводів такий, що ці втрати істотно вищі і за практичними даними можуть досягати значення 0,01 кг/(год*м).

Аналіз показує, що централізоване опалення в містах зі зношеними тепловими мережами вже не може конкурувати з низькоефективними побутовими газовими котлами.

Таблиця 1

Результати аналізу оцінки вартості теплової енергії від різних джерел

Теплове джерело	Мінімальна вартість теплової енергії, грн. / кВт*год	Максимальна вартість теплової енергії, грн. / кВт*год
Централізоване опалювання	0,066	0,423
Децентралізоване газове опалювання	0,067	0,25
Індивідуальне опалювання тепловим насосом	0,01	1,242



а *б*

Рис. 5. Залежність собівартості *S* від *N*: при рівні теплових втрат, що відповідають нормам (а); при середньому зносі трубопроводу (б)

Очевидно, що при розрахунку повної собівартості теплової енергії, з урахуванням капітальних і експлуатаційних витрат, її значення будуть вище. У той же час отримані результати свідчать про широкий потенціал оптимізації процесу теплопостачання міських районів.

Сьогодні в середньостатистичній квартирі є різні альтернативні джерела теплової енергії. Перебої з гарячою водою призвели до того, що в якості резерву споживачі встановлюють електричні бойлери. Для компенсації низької температури теплоносія в системі централізованого опалення купуються різного виду масляні радіатори та тепловентилятори. Останнім часом широко використовуються кондиціонери з можливістю опалення та спеціальні теплові насоси.

Кожне нове джерело, що підключається до споживача, збільшує кількість можливих комбінацій. При цьому кожному джерелу окремо не обов'язково повністю закривати потребу в тепловій енергії. Наявність альтернатив дозволить забезпечити необхідну теплову потужність шляхом оптимальної комбінації наявного обладнання і досягти мети з мінімальними витратами.

Висновки. Розроблено імітаційну модель багатоквартирного висотного будинку, яка дозволяє обчислити зміни температур повітря в *i*-ій квартирі і параметри теплоносія в будь-якій точці гідравлічної системи опалення. Імітаційна модель заснована на узагальненій *i*-ой квартирі, в якій визначаються витрати на підігрів приточного повітря в системі вентиляції, тепловтрати через будівельні конструкції і гаряче водопостачання.

Розроблено імітаційні моделі промислового і індивідуального газових котлів, опалювальних приладів і промислової та індивідуальної теплонасосної установки. Для розрахунку теплових процесів між квартирами, а також між будинком і навколишнім середовищем був використаний математичний апарат для моделювання нестаціонарних процесів теплообміну і теплопередачі.

Розроблено імітаційну модель транспортної системи, яка використовується в розподілених системах теплопостачання для забезпечення процесу доставки теплоносія від джерела теплової енергії до споживача з урахуванням теплових і фізичних втрат теплоносія.

Список літератури:

1. Давыдов В.О., Максимова О.Б. Компьютерное моделирование тепловых режимов жилых помещений. *Тр. Одес. политехн. ун-та*. 2009. Вып. 1 (31). С. 67–72.

2. Jiang X.S., Jing Z.X., Li Y.Z., Wu Q.H., Tang W.H. Modelling and operation optimization of an integrated energy based direct district water-heating system. *Energy*. 2014. Vol. 64. pp. 375-388.

3. Verda V., Guelpa E., Kona F., Lo Russo S. Reduction of primary energy needs in urban areas trough optimal planning of district heating and heat pump installations. *Energy*. 2012. № 48(1). pp. 40–46.

4. Kozlov S.A. Energy conservation in heat supply systems. Tyazheloe *Mashinostroenie*. 1996. № 1. pp. 36–37.

5. Verda V., Baccino G., Sciacovelli A., Lo Russo S. Impact of district heating and groundwater heat pump systems on the primary energy needs in urban areas. *APPLIED THERMAL ENGINEERING. Elsevier*. 2012. Vol. 9. pp. 18–26.

6. Shu, H.W. Lin D. M., Li X. L., Zhu Y. X. Energy-Saving Judgment of Electric-Driven Seawater Source Heat Pump District Heating System over Boiler House District Heating System. *Energy and Buildings*. 2010. Vol. 42. No. 6. pp. 889–895.

7. Chen, C.M., Zhang Y.F., Ma L.J. Assessment for Central Heating Systems with Different Heat Sources: A Case Study. *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 48. pp. 168–174.

8. Hepbaslia A., Balta M.T. A study on modeling and performance assessment of a heat pump system for utilizing low temperature geothermal resources in buildings. 2007. Vol. 42. pp. 3747–3756.

9. Verda V., Borchiellini R., Calì M. A thermoeconomic approach for the analysis of district heating systems. *The International Journal of Applied Thermodynamics.* 2001. Vol. 4, No. 4. pp. 183–190.

10. Максимова О.Б., Давыдов, В.О., Бабич С.В. Управление системой теплоснабжения с изменяемой структурой технических средств. *Проблемы управления и информатики: междун. науч.-техн. журн.* 2014. № 3. С. 50–60.

11. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. Москва : Наука, 1985. 280 с.

12. Васильев Г.П. Теплоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли: монография. Москва : Издательский дом «Граница», 2006. 176 с.

13. Бабич С.В., Давыдов В.О. Анализ экономической эффективности систем теплоснабжения городских районов. *Праці Одес. політехн. ун-та.* 2014. Вип. 1(43). С. 141–147.

14. Методические указания по определению расходов топлива, электроэнергии и воды на выработку теплоты отопительными котельными коммунальных теплоэнергетических предприятий: методические указания. 4-е изд. Москва : АКХ им. Памфилова. 2002. 129 с.

Maksymova O.B., Minchev D.S. DEVELOPMENT OF A MODEL OF THE CITY HEAT SUPPLY SYSTEM IN THE CONDITIONS OF ALTERNATIVE ENERGY FLOWS

The paper investigates simulation models of the heat supply system of the city of the object in the conditions of using alternative energy flows, which differ in different cost. The simulation model consists of a mathematical model of thermal processes of a separate apartment and apartment building, mathematical models of heat supply system equipment, and models of heat supply processes from different sources of thermal energy. The mathematical simulation model of the city district heat supply system, heat consumer in case of accidental disturbances, which determines its structure, is improved, both disturbances of physical nature, ambient temperature, and change of cost of energy sources are considered. This structure is determined by a set of technical means, which are considered on the basis of solving a non-stationary problem of heat transfer, which makes it possible to form a current model depending on the disturbances and different costs of financial resources. The solution to this problem is to increase the efficiency of the city's heat supply system by developing a simulation model of the system, which operates in the presence of alternative energy flows. The basic idea of solving this problem is to connect different power sources to the consumer, which increases the number of possible combinations. The availability of alternatives will provide the required heat capacity through a combination of existing equipment, and achieve the goal at minimal cost.

The developed simulation model of the transport system made it possible to use it in distributed heat supply systems to ensure a cost-effective process of delivering the coolant from the heat source to the consumer, taking into account heat and physical losses of the coolant. This will further manage the price structure of energy supply.

Key words: *simulation model, heat supply system, perturbation, technical structure variable, alternative energy sources.*