

МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТРУБОПРОВОДІВ СИСТЕМИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ВОДЯНОГО ОПАЛЕННЯ ТА ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ ФАСАДУ УКРАЇНСЬКИХ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД ДЛЯ РІЗНИХ КЛІМАТИЧНИХ УМОВ

Єрємін А. В.

Об'єктом дослідження є конструктивні параметри та матеріал виконання елементів комплексної термомодернізації будівлі чи споруд, а саме системи центрального водяного опалення та фасадної теплоізоляції, з урахуванням дії кліматичних зон, в яких експлуатуються зазначені об'єкти.

Одними з найбільш проблемних місць є недостатня вивченість та відсутність обґрунтування ефективних конструктивних параметрів та матеріалу виконання трубопроводів системи центрального водяного опалення та фасадної теплоізоляції. Це необхідно для суттєвого зменшення енергоспоживання існуючих будівель і споруд українського житлового фонду.

В ході дослідження використовувався комплексний підхід до вирішення поставлених завдань, включаючи економічний і статистичний аналіз, аналіз світового досвіду та синтез результатів і ретроспективи, історико-еволюційний та логічний підхід. Також використовувались теорія систем і системний аналіз для ідентифікації стратегічних перспектив значного скорочення енергоспоживання існуючих українських будівель і споруд. У перспективі передбачається дисемінація отриманих результатів на зарубіжні будівлі і споруди, що мають аналогічні проблеми з енергоефективності, у тому числі з урахуванням кліматичних зон.

Обґрунтовано ефективні конструктивні параметри та матеріал виконання трубопроводів системи центрального водяного опалення для суттєвого зменшення енергоспоживання існуючих будівель і споруд українського житлового фонду. Визначено мінімальну товщину шару фасадної теплоізоляції, що становить 50 мм, для досліджуваного температурного режиму і умов експлуатації, а також для характеристик використовуваних матеріалів, геометрії трубопроводів і фасадної теплоізоляції для першої температурної зони. Отримана оптимальна товщина шару фасадної теплоізоляції, що становить 100 мм, та приводить до 100 %-го захисту від замерзання трубопроводів навіть при повній зупинці руху теплоносія протягом більше, ніж 24 години після припинення руху теплоносія.

Розроблені інноваційні проектні та конструктивно-технологічні рішення приводять до значного зменшення енергоспоживання існуючих будівель і споруд житлового фонду, що експлуатується понад 30 років і які розміщені у різних кліматичних зонах, і сприяють підтриманню комфортних умов для життєдіяльності.

Ключові слова: *термомодернізація будівель і споруд, фасадна теплоізоляція, система центрального водяного опалення.*

1. Вступ

У роботах [1, 2] було окреслено коло інноваційних технічних рішень щодо термомодернізації (термосанації) житлових споруд і будівель у складі системи центрального водяного опалення та фасадної теплоізоляції. На базі експериментально-числових та розрахункових досліджень було наведено обґрунтування їх ефективності у порівнянні з існуючими технічними рішеннями.

В цьому напрямі актуальним подальшим розвитком є моделювання конструктивно-технологічних параметрів нових транзитних трубопроводів системи центрального водяного опалення та еквівалентної теплоізоляції фасаду для різних кліматичних умов. Ці результати моделювання розширюють географічні кордони застосування розроблених технічних рішень, що підкреслює актуальність досліджуваного напрямку термомодернізації та його експортну орієнтованість.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єкт дослідження – конструктивні параметри та матеріал виконання елементів комплексної термомодернізації будівлі чи споруд, а саме системи центрального водяного опалення та фасадної теплоізоляції, з урахуванням дії кліматичних зон, в яких експлуатуються зазначені об'єкти.

В роботах [1, 2] було відзначено, що значне теплоспоживання при опаленні будь-яких будівель і споруд спричинено підвищеними тепловтратами крізь зовнішні огорожувальні конструкції будівлі чи споруди. Особливо це стосується будівельних конструкцій старих (зокрема, до 1991 року побудови) будівель і споруд, через які тепло втрачається в кілька разів більше, ніж у сучасних будівлях.

Інша проблемна ситуація пов'язана з низькою енергоефективністю старих систем опалення, які побудовані на однотрубній системі центрального водяного опалення. За такої системи опалення, навіть повністю утеплити будинок чи споруду ззовні, на практиці неможливо економити теплову енергію і створити комфортні умови для проживання чи роботи.

Тому одним з головних методів суттєвого скорочення матеріальних і фінансових витрат на опалення існуючих будівель і споруд є суттєве зменшення кількості споживаної теплової енергії. При цьому точкове застосування окремих енергоефективних заходів дає й відповідний «точковий» результат.

Саме у цьому і полягає сутність термомодернізації будівель і споруд, щоби значно зменшити теплоспоживання. Тому є перспективним обґрунтування ефективних конструктивних параметрів та матеріалу виконання трубопроводів системи центрального водяного опалення та фасадної теплоізоляції для суттєвого зменшення енергоспоживання існуючих будівель і споруд українського житлового фонду.

Особливого значення тема дослідження набуває у зв'язку з тим, що українські (і не тільки) будівлі і споруди розташовані у різних кліматичних зонах. Зокрема, в подібних умовах знаходяться досліджувані об'єкти у Російській Федерації, Казахстані, Чехії, Словаччині, Польщі тощо. Тому запропоновані у даній роботі технічні рішення можуть бути розповсюджені і на зазначені країни, зокрема, Центральної та Східної Європи.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – моделювання на базі розроблених інноваційних технічних рішень з термомодернізації ефективних параметрів трубопроводів системи центрального водяного опалення та теплоізоляції фасаду для різних кліматичних умов. Це направлено на кінцеве зменшення енергоспоживання існуючих будівель і споруд як житлового, так і нежитлового фонду.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Обґрунтувати ефективні конструктивні параметри та матеріал виконання трубопроводів системи центрального водяного опалення для суттєвого зменшення енергоспоживання існуючих будівель і споруд українського житлового фонду.

2. Обґрунтувати ефективні конструктивні параметри й матеріал виконання елементів фасадної теплоізоляції.

3. Здійснити моделювання ефективних параметрів трубопроводів системи центрального водяного опалення та теплоізоляції фасаду для різних кліматичних умов.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Нормативно-технічна документація з досліджуваної проблеми репрезентована відповідним ДСТУ [3] та Державними будівельними нормами (ДБН) [4]. Відповідно до цих джерел, встановлюються мінімальні вимоги до теплотехнічних показників конструкцій теплоізоляційної оболонки будівель та до енергетичних характеристик будівель або відокремлених їх частин. Ці показники визначають на підставі економічно обґрунтованого рівня енергетичної ефективності будівлі. При цьому враховують очікуваний життєвий цикл будівлі за умови задоволення побутових потреб людини та створення оптимальних мікрокліматичних умов для її перебування та/або проживання у приміщеннях такої будівлі.

Окремі аспекти досліджуваної проблеми термомодернізації будівель і споруд досліджуються в ряді робіт зарубіжних дослідників. Так, наприклад, в роботі [5] використовується поліоптимальний метод для визначення схем термомодернізації будівель на основі теорії нечітких множин за мінімізації загальної вартості здійснення термомодернізації та одночасної максимізації отриманого енергетичного ефекту у вигляді скорочення витрат теплової енергії. У роботі [6] наголошується на важливості вирішення проблеми термомодернізації внаслідок існування значної кількості збірних, з несучими стінами, багатоквартирних будинків. Адже вони були побудовані ще в 50-х, 60-х і 70-х роках минулого століття в країнах Центральної та Східної Європи.

Відповідно повинні враховуватись нові норми з енергоефективності, що діють в країнах ЄС.

Досліджувана проблема надзвичайно важлива для країн колишнього соціального табору, з якими межує Україна. Використовувані методи випробування та отримані результати оцінки даних, що необхідні для прогнозування споживання теплової енергії в типовому будинку для середньостатистичної сім'ї в Польщі, досліджені в роботі [7]. Аспекти здійснення термомодернізації будівель та оцінка її впливу на утворюваний внутрішній мікроклімат цих будівель досліджується в [8].

Питання збереження історичної спадщини будівель, що становлять національне надбання, шляхом здійснення їх термомодернізації висвітлюються в роботі [9]. Напрямки підвищення енергоефективності внаслідок здійснення термомодернізації існуючих будинків досліджено у [10]. Оптимальні енергетичні вимоги та їх вплив на можливі варіанти здійснення термомодернізації типового житлового будинку описано у роботі [11].

Взаємозв'язок здійснення енергоефективної термомодернізації з точки зору забезпечення екологічності оточуючого середовища у майбутньому досліджено в роботі [12]. Чисельний аналіз поведінки системи централізованого теплопостачання у динаміці було здійснено в [13] за допомогою математичної моделі, що адекватно описувала спрощену систему централізованого теплопостачання з трьома кінцевими користувачами і мережею трубопроводів завдовжки 9 км.

Систему термомодернізації будівель і споруд доцільно будувати і аналізувати на базі комплексного підходу, зокрема, із застосуванням структурно-параметричного моделювання. Це дає можливість, відповідно до [14], моделювати зв'язки між структурними елементами досліджуваної системи, зокрема, системи термомодернізації.

Аспектам дослідження фасадної теплоізоляції будівель і споруд присвячено ряд робіт. Варіант використання іншого ізоляційного матеріалу, що дозволяє дифузувати повітря в ізоляційній конструкції і сприяє зменшенню витрат тепла, запропоновано авторами [15]. Дослідження поточного стану з теплоізоляції стін без пінополістиролу та існуючих вікон будівель на конкретному прикладі Alipasino polje, в м. Сараєво, Боснія і Герцеговина, висвітлюється в [16].

Автоматизований підхід до аналізу енергоефективності фасадів будівель, що дозволяє отримувати термографічні 3D-моделі та відповідні їх ортозображення, наведено у дослідженні [17]. У роботі [18] зазначається, що найбільш прийнятним енергоефективним фасадом для всіх кліматичних зон є зовнішня система теплоізоляції в поєднанні з ізоляцією будь-якого типу. Зокрема, це може бути вентиляований фасад у поєднанні з удароміцними ізоляційними матеріалами.

У дослідженні [19] запропонована методологічна база для оцінки зовнішньої теплоізоляційної композиційної системи з точки зору забезпечення високої термостійкості і швидкості монтажу. У роботі [20] наголошується на ефективності використання саме подвійного фасаду в будівлях різних типів з

точки зору зменшення споживанням теплової енергії і забезпечення теплового комфорту. Для зменшення міського парникового ефекту та поліпшення теплових характеристик будівель, у т. ч. для їх модернізації, у праці [21] пропонується широко використовувати так звані «зелені» фасади. А у [22] досліджуються енергоефективні сенсорні системи опалення на базі випромінюючих панелей, що підходять для будинків з низькою витратою енергії.

Модель перемикаємого ізоляційного так званого U-елемента на базі блоку подвійного скла з напівпрозорої ізолюючої панелі, встановленої всередині, з метою дослідження впливу різних теплофізичних властивостей на U-значення, розглядається авторами [23]. У роботі [24] аналізуються фізико-механічні властивості природних теплоізоляційних композитів, зокрема, на основі волоконних конопель, які характеризуються низькою щільністю і пористою структурою, а також придатні для виробництва теплоізоляційних фасадів.

Методика вибору і розрахунку конструктивно-технологічних параметрів ультразвукового низькочастотного кавітаційного пристрою з прямокутною випромінюючою пластиною, що здійснює вигинні коливання, розглядається в [25]. Цей інтенсифікуючий метод може використовуватись для виготовлення теплоізоляційних фасадних композиційних матеріалів з полімерною матрицею.

Підсумовуючи вищенаведений аналіз літературних джерел, слід відзначити відсутність моделювання ефективних параметрів трубопроводів системи центрального водяного опалення та теплоізоляції фасаду для різних кліматичних умов. Це підкреслює перспективність дослідження.

5. Методи дослідження

На рис. 1 [2] наведена загальна схема досліджуваної системи комплексної термомодернізації будівлі. На рис. 1 прийняті наступні позначення:

- 1 – існуюча зовнішня (фасадна) стіна термомодернізуємої будівлі (далі – стіна);
- 2 – шар еквівалентної фасадної теплоізоляції (далі – фасадна теплоізоляція);
- 3 – клейовий шар, призначений для кріплення фасадної теплоізоляції до існуючої зовнішньої стіни;
- 4 – рідкий теплоносій;
- 5 – шар еквівалентного трубного утеплювача;
- 6 – нові транзитні трубопроводи двотрубної системи центрального водяного опалення (далі – трубопроводи);
- 7 – опалювальний прилад з бічним підключенням;
- 7' – опалювальний прилад з нижнім підключенням;
- 8 – розподільна поповерхова гребінка;
- 9 – нова штроба, зроблена в існуючій стіні 1 або в фасадній теплоізоляції 2 (далі – штроба);
- 10 – наскрізний отвір в існуючій стіні 1;
- 11 – вікна або світлопрозорі конструкції;
- 12 – радіаторна арматура;

13 – зовнішній захисний шар, що оберігає фасадну теплоізоляцію 2 від атмосферних опадів і/або ультрафіолетового випромінювання. Римськими цифрами (II–XVII) на рис. 1 позначені окремі елементи (проектні рішення) системи термомодернізації, окремо досліджені в [2].

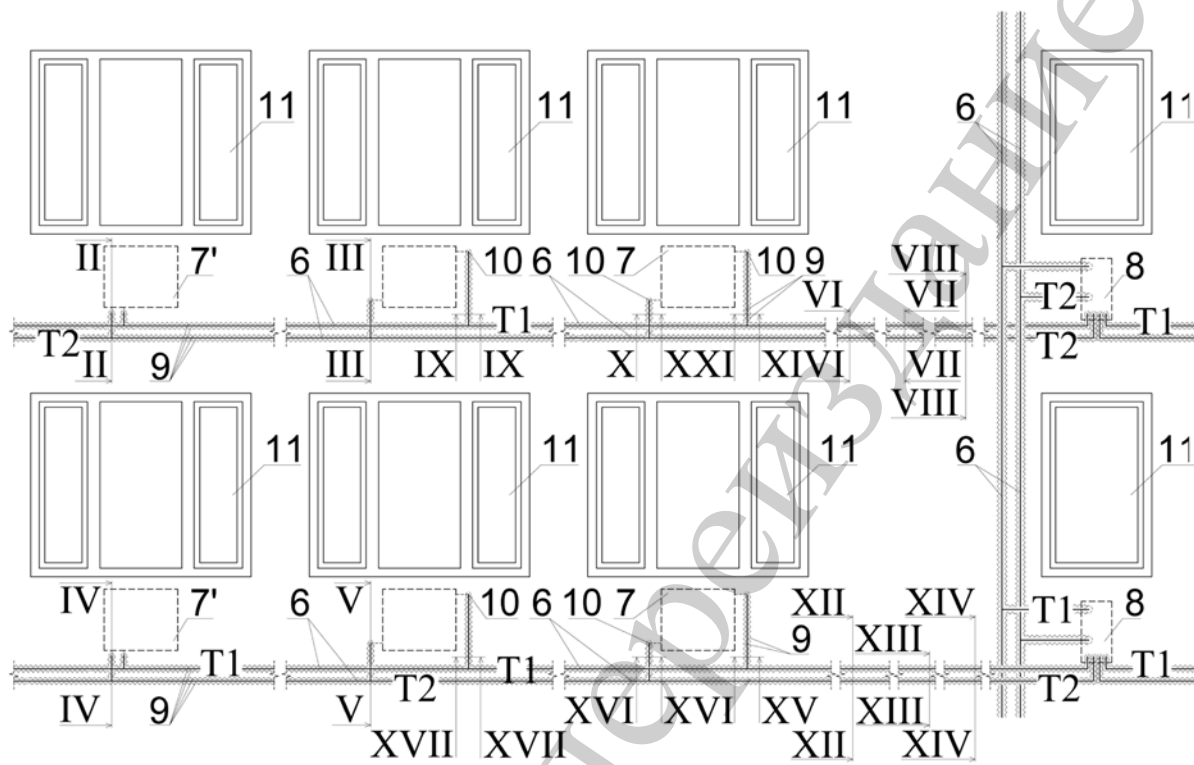


Рис. 1. Загальна схема досліджуваної системи комплексної термомодернізації будівель і споруд [2]

Зазначимо, що сукупність описаних в розроблених інноваційних технічних рішеннях, що стосуються системи [26] та реалізуючого її способу термомодернізації [27], істотних відмінностей була встановлена як експериментальним, так і експериментально-розрахунковим шляхом. Це стосувалось оптимальних розмірів, геометричної форми, матеріалів виконання, складу і взаємозв'язку елементів системи термомодернізації. Зокрема, для нових транзитних трубопроводів 6 двотрубної системи центрального водяного опалення, еквівалентної трубної теплоізоляції 5, еквівалентної фасадної теплоізоляції 2, форми виконання нових штроб 9 та інших елементів системи. Результати проведених досліджень подані у табл. 1.

Таблиця 1

Основні геометричні параметри, склад і матеріал виконання складових конструктивних елементів системи термомодернізації будівель і споруд

Показник (в круглих дужках – межі інтервалу)	Значення параметра в межах інтервалу за прикладами реалізації № 1–12											
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9	№ 10	№ 11	№ 12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Характеристики термомодернізуємої стіни будівель і споруд та розрахункові кліматичні умови												
Коефіцієнт опору зовнішньої огорожувальної конструкції існуючої зовнішньої стіни термомодернізуємої будівлі $R_{суц.}$, $m^2 \cdot K / Bt$, (0,75–5,5) $m^2 \cdot K / Bt$	0,5	0,75	1	1,2	1,5	1,8	2,2	2,8	3,3	4,0	5,5	5,9
Коефіцієнт опору зовнішньої огорожувальної конструкції (стіни) $R_{терм. UA}$; $R_{терм. UA} = R_{min. UA} - R_{суц.}$ при $R_{min. UA} = 2,8/3,3$ ($m^2 \cdot K / Bt$), для першої/другої температурних зон, (0,5–2,8) ($m^2 \cdot K / Bt$)	2,3/2,8	2,0/2,5	1,8/2,3	1,6/2,1	1,3/1,8	1,0/1,5	0,6/1,1	-/0,5	-/-	-/-	-/-	-/-
Коефіцієнт опору зовнішньої огорожувальної конструкції (стіни) $R_{терм. EU}$ $R_{терм. EU} = R_{min. EU} - R_{суц.}$ при $R_{min. EU} = 2,0/5,9$ ($m^2 \cdot K / Bt$) (0,2–5,1) ($m^2 \cdot K / Bt$)	1,5/5,4	1,2/5,1	1,0/4,9	0,8/4,7	0,5/4,4	0,2/4,1	-/3,7	-/3,1	-/2,6	-/1,9	-/0,4	-/-
Коефіцієнт опору зовнішньої огорожувальної конструкції (стіни) $R_{терм. CHГ}$ $R_{терм. CHГ} = R_{min. CHГ} - R_{суц.}$ при $R_{min. CHГ} = 2,0/5,9$ ($m^2 \cdot K / Bt$), (0,2–5,1) ($m^2 \cdot K / Bt$)	1,5/5,4	1,2/5,1	1,0/4,9	0,8/4,7	0,5/4,4	0,2/4,1	-/3,7	-/3,1	-/2,6	-/1,9	-/0,4	-/-
Мінімальна товщина шару еквівалентної фасадної теплоізоляції для України $B_{min. UA}$, мм, (50–250) мм	100/150	100/150	100/100	100/100	50/100	50/100	50/50	-/50	-/-	-/-	-/-	-/-

Мінімальна товщина шару еквівалентної фасадної теплоізоляції для країн СНД, $B_{min.CHI}$, мм, (50–250) мм	100/250	50/250	50/250	50/250	50/200	50/200	–/200	–/150	–/150	–/100	–/50	–/–
Мінімальна товщина шару еквівалентної фасадної теплоізоляції для країн Європейського Союзу $B_{min.EU}$, мм, (50–250) мм	100/250	50/250	50/250	50/250	50/200	50/200	–/200	–/150	–/150	–/100	–/50	–/–
Параметри нових транзитних трубопроводів б двотрубної системи центрального водяного опалення, трубної теплоізоляції, а також граничні температурні умови для теплоносія												
Зовнішній діаметр D , мм, нових транзитних трубопроводів двотрубної системи центрального водяного опалення при різних матеріалах їх виконання, (7–114) мм, при товщині стінки (0,7–22,1) мм	6	7–12	13–18	19–25	26–32	33–40	41–50	51–57	58–75	76–85	86–114	140
Існуючі діаметри трубопроводів із зшитого поліетилену (PEX) D_{PEX} , мм, із зазначенням товщини стінки	–	12x2,0	14x2,0; 14x2,25; 16x2,0; 16x2,2; 16x2,6; 18x2,0 18x2,5	20x2,8; 20x2,9; 25x2,3; 25x3,5;2 5x3,7	32x2,9; 32x4,4; 32x4,7	40x3,7; 40x5,5; 40x6,0	50x4,6; 50x6,9	–	63x5,8; 63x8,6; 63x8,7	14x2,0; 14x2,25; 16x2,0; 16x2,2; 16x2,6; 18x2,0 18x2,5	90x8,2; 110x10, 0	–
Існуючі діаметри трубопроводів з багат шарового металопластику $D_{мет.пласт.}$, мм, із зазначенням товщини стінки	–	–	14x2,0; 16x2,0; 16x2,7; 16,2x2,6	20x2,0; 20x2,25; 20x2,9; 20x3,3; 25x2,5; 25x3,7; 25x4,0	26x2,0; 26x3,0; 32x3,0; 32x4,0; 32x4,4	40x3,5; 40x4,0	50x4,5	–	63x4,5; 63x6,0	75x5,0; 75x7,5	90x8,5; 110x10, 0	–
Існуючі діаметри трубопроводів зі сталі $D_{сталь}$, мм, із зазначенням товщини стінки	–	12x1,2	15x1,2; 18x1,2	22x1,5	28x1,5	35x1,5	42x1,5	54x1,5	64x1,5; 66,7x1,5	76,1x2,0	88,9x2,0 ; 108x2,0	–

Існуючі діаметри трубопроводів з чорної сталі $D_{\text{чорн.сталь}}$, мм, із зазначенням товщини стінки	–	10,2x1,8; ; 10,2x2,0; ; 10,2x2,5	13,5x2,0; ; 13,5x2,2; ; 13,5x2,8; ; 17x2,0; 17x2,2; 17x2,8	21,3x2,5; ; 21,3x2,8; ; 21,3x3,2	26,8x2,5; ; 26,8x2,8; ; 26,8x3,2	33,5x2,8; ; 33,5x3,2; ; 33,5x4,0	42,3x2,8; ; 42,3x3,2; ; 42,3x4,0; ; 48x3,0; 48x3,5; 48x4,0	–	60x3,0; 60x3,5; 60x4,5; 75,5x3,2; ; 75,5x4,0; ; 75,7x4,5	–	88,5x3,5; ; 88,5x4,0; ; 88,5x4,5; ; 101,3x3,5; 101,3x4,0; 0101,3x4,5; 114x4,0; 114x4,5; 114x5,0	140x4,0 140x4,5 140x5,5
Існуючі діаметри трубопроводів з нержавіючої сталі $D_{\text{нерж.сталь}}$, мм, із зазначенням товщини стінки	–	–	15x1,0; 18x1,0	22x1,2	28x1,2	35x1,5	42x1,5	54x1,5	–	76,1x2,0	88,9x2,0; ; 108x2,0	–
Існуючі діаметри трубопроводів із міді $D_{\text{мідь}}$, мм, із зазначенням товщини стінки	6x1,0	8x1,0; 10x1,0; 12x0,7; 12x1,0	14x0,8; 15x1,0; 16x2,0; 18x1,0	22x1,0	28x1,0	35x1,0	42x1,5	54x1,5; 54x2,0	64x2,0	76x2,0	89x2,0; 108x2,5	–
Існуючі діаметри трубопроводів з поліпропілену D_{pp} , мм, із зазначенням товщини стінки	–	–	16x2,2; 16x2,3; 16x2,7	20x1,9; 20x2,3; 20x2,8; 20x3,2; 20x3,4; 20x4,1; 25x2,3; 25x2,8; 25x3,5; 25x4,2; 25x5,1	32x2,9; 32x3,6; 32x4,4; 32x4,5; 32x5,4; 32x6,5	40x3,7; 40x4,5; 40x5,5; 40x5,6; 40x6,7; 40x8,1	50x4,6; 50x5,6; 50x6,1; 50x6,9; 50x8,3; 50x8,4; 50x10,1	–	63x5,8; 63x7,1; 63x7,8; 63x8,6; 63x8,7; 63x10,5; 63x12,7; 75x6,8; 75x8,4; 75x9,5; 75x10,3; 75x10,4; 75x12,5; 75x15,1	–	90x8,2; 90x10,1; 90x12,3; 90x12,5; 90x15,0; 90x18,1; 110x10,0; 110x12,3; 110x15,1; 110x15,2; 110x18,	–

											3; 110x18, 4; 110x22, 1	
Існуючі діаметри трубопроводів з полібутилену $D_{\text{полібутилен}}$, мм, із зазначенням товщини стінки	–	–	15x1,75	22x2,15	28x2,65	–	–	–	–	–	–	–
Матеріал виконання еквівалентної трубної теплоізоляції	немає ізоляції	спінений поліетилен/каучук/гофрована теплоізоляція	спінений поліетилен/каучук/гофрована теплоізоляція	спінений поліетилен/каучук/гофрована теплоізоляція	спінений поліетилен/каучук/гофрована теплоізоляція	спінений поліетилен/каучук/гофрована теплоізоляція	спінений поліетилен/каучук/гофрована теплоізоляція	спінений поліетилен/каучук/гофрована теплоізоляція	спінений поліетилен/каучук/гофрована теплоізоляція	спінений поліетилен/каучук/гофрована теплоізоляція	спінений поліетилен/каучук/гофрована теплоізоляція	немає ізоляції
Товщина шару еквівалентної трубної теплоізоляції δ_T , мм, (спінений поліетилен/каучук/гофрована), (6–50) мм	–/–/–	6/6/4	9/9/4	13/13/6	13/13/6	15/15/6	20/19/6	22/25/6	28/32/6	35/40/6	42/50/6	–/–/–
Розрахункова різниця температур теплоносія в подавальному та зворотному трубопроводах ΔT , °C, (10–25) °C	5	10–25										30
Час досягнення температури теплоносія 0 °C при товщині еквівалентного шару теплоізоляції $B_{\text{min}}=50$ мм, t_{50} , год, (8–19) год	20	19	17	16	15	14	13	12	11	10	8	6
Час досягнення температури теплоносія 0 °C при товщині еквівалентного шару теплоізоляції $B=100$ мм, t_{100} , год	замерзання теплоносія не відбувається											

Варіанти розміщення і кріплення трубопроводів двотрубною системою опалення

У штробі, виконаній в існуючій стіні з боку її кріплення до еквівалентної фасадної теплоізоляції/(у штробі, виконаній в еквівалентному фасадному утеплювачі, з боку його кріплення до існуючої зовнішньої стіни)	ні/так	так/так	так/так	так/так	так/так	так/так	так/так	так/ні	так/ні	так/ні	так/ні	ні/так
Форма виконання штробы (прямокутна/трикутна/арочна)	ні/ні/ні	так/так/так	так/так/так	так/так/так	так/так/так	так/так/так	так/так/так	ні/ні/так	так/ні/так	так/ні/ні	ні/так/ні	ні/ні/ні
Оптимальна глибина (висота) штробы $B_{г}$, мм, (25–155) мм	10	25	36	43	50	60	90	100	115	125	155	180
Оптимальна ширина штробы $B_{ш}$, мм, (50–310) мм	20	50	72	86	100	120	180	200	230	250	310	360

У лівій колонці табл. 1 наведений досліджуваний показник та його відповідне позначення, а в круглих дужках подані межі інтервалу, в яких змінюється цей показник. У колонках № 2–13 по горизонталі, які одночасно є номерами прикладів (відповідно № 1–12) реалізації розроблених технічних рішень, наведені основні параметри і матеріал виконання конструктивних елементів системи термомодернізації.

6. Результати дослідження

6.1. Товщина шару фасадної теплоізоляції

В результаті проведених досліджень було встановлено, що відхилення від оптимальних розмірів та ефективних матеріалів виконання призводить до погіршення параметрів елементів системи термомодернізації. А саме до високих теплових втрат, порушення несучої здатності існуючих фасадних стін) термомодернізуємої будівлі, високого гідравлічного опору в трубопроводах б, можливості замерзання теплоносія 4. Не виключений також негативний вплив термічного розширення трубопроводів б на цілісність шару фасадної теплоізоляції 2 (крайні приклади реалізації № 1, № 12 у табл. 1).

Наприклад, експериментально було встановлено, що зменшення товщини B_{min} шару фасадної теплоізоляції 2 менше оптимального значення призводить до зменшення коефіцієнта опору теплопередачі R_{min} . При $B_{min}=50$ мм коефіцієнт $R_{min}=1,32$ ($m^2 \cdot K$)/Вт, а при $B_{min}=150$ мм коефіцієнт $R_{min}=3,65$ ($m^2 \cdot K$)/Вт. Це, в свою чергу, збільшує в 2,7 рази теплові втрати термомодернізуємої будівлі і трубопроводів б та призводить до зниження температури теплоносія 4, що надходить до споживачів. А відсутність руху теплоносія 4 в трубопроводах б може призвести до його замерзання і до порушення цілісності трубопроводів б.

У той же час збільшення товщини B_{min} понад оптимальне значення для першої і другої температурної зон України призводить до підвищення коефіцієнта опору R_{min} понад мінімально необхідних значень коефіцієнта опору $R_{min.UA}$, що не є порушенням. Останній встановлений згідно ДБН [4] для різних температурних зон України. Однак застосування фасадної теплоізоляції 2 товщиною B_{min} більше 150 мм підвищує вартість матеріалів і монтажних робіт не пропорційно збільшенню коефіцієнта опору теплопередачі R_{min} .

6.2. Значення діаметра трубопроводів

У табл. 1 представлені діаметри D промислово випускаємих трубопроводів для більш точного визначення глибини необхідного штроблення 9 в існуючій стіні 1 або в матеріалі фасадного утеплювача 2. Співвідношення діаметрів D застосовуваних трубопроводів б системи опалення до товщини δ_T еквівалентної трубної ізоляції 5 і до глибини B_2 виконуваного штроблення 9 дозволяє розділити їх на кілька розрахункових випадків.

У табл. 1 у колонках для значень діаметрів трубопроводів D для різних матеріалів вказані значення «зовнішній діаметр» х «товщина», після чого вказані значення всіх типорозмірів, що застосовуються на сьогоднішній день. А для значень діаметрів D трубопроводів б, які вказані у вигляді діапазону, межі діапазонів позначають мінімальні і максимальні величини значень.

Також експериментально було встановлено, що, зменшення діаметрів D трубопроводів b і розрахункової різниці температур ΔT між подаючими і зворотними трубопроводами b призводить до збільшення швидкості руху теплоносія 4 . Як наслідок, відбувається підвищення гідравлічного опору в трубопроводах b термомодернізуємої будівлі. Це, в свою чергу, призводить до необхідності використання насосів з підвищеними характеристиками потужності, а також збільшує капітальні та експлуатаційні витрати, необхідні для стабільної роботи двотрубною системою центрального водяного опалення.

У той же час збільшення діаметрів D і розрахункової різниці температур ΔT між подаючим і зворотним трубопроводами b призводить до зменшення швидкості руху теплоносія 4 . Це може призвести до збільшення глибини B_2 штроб 9 , тобто може негативно відобразитись на несучій здатності термомодернізуємої будівлі.

Заміна існуючої (однотрубною) системи трубопроводів на нові транзитні трубопроводи b двотрубною системою центрального водяного опалення з оптимальними параметрами і радіаторів системи опалення 7 та $7'$ дає наступні переваги. Це, передусім, можливість здійснювати при проектуванні двотрубною системою центрального водяного опалення вибір між високо- і низькотемпературним джерелом тепла. Це, в свою чергу, розширює можливість застосування різних джерел тепла, таких як теплові насоси і поновлювані джерела енергії, тобто диверсифікувати використовувані джерела тепла. Також застосування двотрубною системою опалення в складі системи комплексної термомодернізації дозволяє здійснювати облік і регулювання спожитого тепла кожним із споживачів.

6.3. Розміщення трубопроводів у штробах

Позначення в табл. 1 «у штробі, виконаний в існуючій стіні/(штробі, виконаний в еквівалентному фасадному утеплювачі)» означає прокладку трубопроводів b або в штробі 9 , або безпосередньо в стіні 1 , або в шарі фасадної теплоізоляції 2 . Форми виконання штроб 9 вказані в табл. 1 через знак дробу «/», а саме вона може бути «прямокутна/трикутна/арочна».

Вибір конкретної форми виконання нових штроб 9 визначається конструктивними особливостями існуючої стіни 1 термомодернізуємої будівлі в місці її приєднання до опалювальних приладів 7 , $7'$. У той же на вибір форми нової штроб 9 додатково впливає вибір обладнання, яким здійснюють штробильні роботи (штроборіз, шліфувальна машина по бетону, застосування механізмів, в яких ріжучою крайкою є алмазний трос).

Згідно розробленого технічного рішення, максимальна глибина B_2 штроб 9 у стіні 1 змінюється в межах $B_2=(25-155)$ мм. Ця величина B_2 вибирається залежно від розмірів діаметрів D трубопроводів b , які будуть прокладатися в штробі 9 , і товщини δ_T шару трубної теплоізоляції 5 , які спільно повинні повністю поміститися у виконаний штробі 9 .

У той же час розміщення трубопроводів b у штробах 9 , які виконуються в шарі фасадної теплоізоляції 2 , створює ризики того, що при термічному розширенні трубопроводів b відбувається подовження прямих ділянок

трубопроводів 6. Як наслідок, підвищується напруження всередині будівельної конструкції. Це може призвести до втрати герметичності шару фасадної теплоізоляції 2 і, як наслідок, до погіршення теплотехнічних характеристик термомодернізуємої будівлі.

Розміщення ж трубопроводів 6 у штробах 9, виконаних у стіні 1, дозволяє перерозподіляти навантаження, що виникають від термічного подовження трубопроводів 6 на існуючу будівельну конструкцію. Це, в свою чергу, дозволяє підвищити енергоефективність і герметичність будівельної конструкції, а також уникнути порушення цілісності шару фасадної теплоізоляції 2 термомодернізуємої будівлі.

6.4. Значення коефіцієнта опору теплопровідності

Коефіцієнт опору зовнішньої огорожувальної конструкції стіни 1 термомодернізуємої будівлі змінюється в межах $R_{суц.}=(0,75-5,5) \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$. Встановлено, що відхилення від нижнього значення цього оптимального параметра призводить до зниження ефективності системи термомодернізації будівель. Це відбувається внаслідок того, що стіни 1 будівель з більш низьким коефіцієнтом опору теплопровідності R_{min} , ніж $0,75 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, доцільніше повністю замінити, ніж виконувати їх термомодернізацію.

У той же час відхилення від верхнього значення оптимального параметра $R_{суц}$ призводить до зниження ефективності системи термомодернізації будівель. Це обумовлено тим, що стіни 1 будівель вже володіють мінімально необхідним коефіцієнтом теплопровідності $R_{min.UA}$ для конкретно зазначеного регіону, і тому не вимагають додаткового утеплення.

Коефіцієнт необхідного опору зовнішньої огорожувальної конструкції $R_{терм.UA}$ для термомодернізації будівлі, згідно розроблених технічних рішень, розраховується так: $R_{терм.UA}=R_{min.UA}-R_{суц.}$, і змінюється в межах $R_{терм.UA}=(0,5-2,8) \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$. Застосовуючи вищевказаний вираз, отримують діапазон значень від $0,5 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ до $2,8 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, які обумовлюють мінімально необхідні значення коефіцієнта $R_{min.UA}$.

Коефіцієнт опору теплопровідності $R_{min.UA}$ застосовується в Україні і залежить від застосовуваної температурної зони згідно ДБН В.2.6-31: 2016 [10]. Так, для першої температурної зони коефіцієнт $R_{min.UA}=3,3 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, для другої температурної зони коефіцієнт $R_{min.UA}=2,8 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$. У табл. 1 вказані значення $R_{min.UA}$ для першої і другої зони через знак дробу «/».

Коефіцієнт необхідного опору зовнішньої огорожувальної конструкції країн ЄС $R_{терм.EU}$ для комплексної термомодернізації будівлі розраховується за такою формулою: $R_{терм.EU}=R_{min.EU}-R_{суц.}$, і змінюється в межах $R_{терм.EU}=(0,2-5,1) \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$. Застосовуючи вище зазначений вираз, отримують діапазон значень від $0,2 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ до $5,1 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, які обумовлюють мінімально необхідні значення коефіцієнта $R_{min.EU}$.

Коефіцієнт необхідного опору зовнішньої огорожувальної конструкції $R_{min.EU}$ залежить від кліматичних умов різних країн. Так, для теплих країн (Італія, Угорщина і т. д.) коефіцієнт $R_{min.EU}=2,0 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, для холодних країн

(Норвегія, Швеція, Фінляндія) коефіцієнт $R_{min.EU}=5,9 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$. У табл. 1 вказані значення $R_{min.EU}$ через знак дробу «/».

Коефіцієнт необхідного опору зовнішньої огорожувальної конструкції $R_{терм.СНГ}$ для комплексної термомодернізації будівлі розраховується так: $R_{терм.СНГ}=R_{min \text{ СНГ}}-R_{суц.}$, і змінюється в межах $(0,2-5,1) \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$. Застосовуючи вище зазначену формулу, отримують діапазон значень $R_{терм.СНГ}$ від $0,2 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ до $5,1 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, які обумовлюють мінімально необхідні значення коефіцієнта $R_{min.СНГ}$.

Коефіцієнт необхідного опору зовнішньої огорожувальної конструкції $R_{min.СНГ}$ застосовується в країнах СНД і залежить від кліматичних умов різних країн і/або регіонів. Так, для теплих регіонів, таких як Краснодарський Край РФ, коефіцієнт $R_{min.СНГ}=2,0 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, для холодних регіонів, таких як Крайня Північ, коефіцієнт $R_{min.СНГ}=5,9 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$. У табл. 1 вказані значення $R_{min.СНГ}$ і їх похідні через знак дробу «/».

6.5. Приклад здійснення термомодернізації будівлі

Після проведення аналізу технічного стану термомодернізуємої будівлі, включаючи проведення енергетичного аудиту будівлі та аналізу справності й технічного стану існуючої системи опалення будівлі, виконують проектування окремих елементів і всієї системи термомодернізації в цілому.

Зокрема, при дослідженні розподілу температурного поля всередині будівельної конструкції, тобто при розгляді теплової задачі припускають, що трубопроводи *б* та стіна *1* покриті шаром фасадної теплоізоляції *2* зі змінною товщиною B_{min} . Результатом цього є зміна температури T на (зовнішній) поверхні фасадної теплоізоляції *2* від мінімального до максимального значення, що визначається відповідно до ДБН [10].

Також для прогнозування працездатності проектованої системи опалення досліджують граничне падіння температури теплоносія *4* з часом у випадку припинення руху теплоносія *4* у трубопроводах *б* при змінній товщині шару еквівалентної фасадної теплоізоляції B_{min} .

Встановлено, що в прикладі № 4 табл. 1 (м. Київ (Україна), розрахункова температура $T=-22 \text{ }^\circ\text{C}$) час для досягнення температури теплоносія *4* значення $0 \text{ }^\circ\text{C}$ при товщині шару фасадної теплоізоляції $B_{min}=50 \text{ мм}$ складає $t_{50}=16 \text{ год}$. А при товщині шару фасадної теплоізоляції $B_{min}=100 \text{ мм}$ замерзання теплоносія *4* не відбувається.

Вищевказані дослідження дозволили визначити оптимальні параметри та матеріал виконання конструктивних елементів системи термомодернізації будівлі, які наведені нижче, шляхом проведення досліджень відповідно до методики, наведеної в роботі [2]. Також враховуються значення, вказані в табл. 1 (у даному випадку це приклад № 4).

Як теплотехнічний параметр вибрали коефіцієнт опору зовнішньої огорожувальної конструкції (стіни *1*), а саме $R_{суц.}=1,2 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$. Коефіцієнт опору зовнішньої огорожувальної конструкції (стіни *1*) $R_{терм.УА}=1,6/2,1 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$ (відповідно для першої/другої температурних зон України), що визначає товщину B_{min} фасадної теплоізоляції. Розрахункова

різниця температур теплоносія 4 в подаючому й зворотному трубопроводах 6 у даному прикладі складає $\Delta T=20$ °С.

Для оптимізації товщини шару фасадної теплоізоляції 2 B_{min} також досліджували два варіанти розміщення трубопроводів 6. Варіант № 1, при якому трубопроводи 6 розміщені в штробі 9, що виконана в стіні 1 з боку її кріплення до фасадної теплоізоляції 2. Варіант № 2, при якому трубопроводи 6 розміщені в штробі 9, яка виконана в фасадній теплоізоляції 2 з боку її кріплення до стіни 1.

При цьому варіанти № 1 і № 2 досліджували при варіації товщини B_{min} . Проведені дослідження підтвердили значення $B_{min}=100$ мм.

У прикладі № 4 матеріал трубопроводів 6 – поліпропілен; зовнішній діаметр трубопроводів 6 становив $D=20$ мм, товщина їх стінки складала $\delta=2,8$ мм; товщина шару трубної теплоізоляції 5 трубопроводів 6 складала $\delta_T=13$ мм.

Після визначення місць розміщення опалювальних приладів 7, 7', розподільних гребінок 8. Далі визначають траси прокладання, в яких трубопроводи 6 розміщують у штробах 9, виконаних в стінах 1 з боку кріплення до фасадної теплоізоляції 2, і траси прокладання, в яких трубопроводи 6 розміщують у штробах 9, виконаних у фасадній теплоізоляції 2 з боку її кріплення до стіни 1.

Траси прокладання трубопроводів 6 виконують з урахуванням технічної можливості штроблення 9 у стінах 1 з боку кріплення до фасадної теплоізоляції 2 без порушення несучої здатності будівлі. Штроба 9 виконують прямокутної форми у вигляді одного різнобічного прямокутника. Таким чином, прокладку трубопроводів 6 виконують у трасах, а саме в штробах 9, виконаних як в існуючій зовнішній стіні 1 з боку її кріплення до фасадної теплоізоляції 2, так і в фасадній теплоізоляції 2 з боку її кріплення до стіни 1.

Після цього здійснюють монтаж системи опалення. Зокрема, після прокладання трубопроводів 6 монтують опалювальні прилади 7, 7' всередині приміщень. Після цього здійснюють гідравлічні випробування трубопроводів 6, що дозволяє визначити можливі витіки цих трубопроводів і усунути негерметичність системи опалення.

Далі трубопроводи 6 покривають шаром трубної теплоізоляції 5 зі спіненого поліетилену й товщиною δ_T , яка змінюється в межах 13 мм.

Після успішного завершення гідравлічних випробувань трубопроводи 6, що покриті шаром трубної теплоізоляції 5, разом зі стінами 1 покривають шаром фасадної теплоізоляції 2 товщиною $B_{min}=100$ мм.

У даному прикладі систему фасадного утеплення зовнішніх стін будівель і споруд виконують у вигляді «мокрого фасаду» із застосуванням основного матеріалу утеплювача пінопласту ПСБ-С-25 і мінеральної вати у вигляді пожежних розсічок навколо вікон та на фасаді. При цьому утеплення фасаду термомодернізуємої будівлі виконують у формі плит, які прикріплюють за допомогою клейових сумішей і дюбелів до існуючої зовнішньої стіни 1. Потім плиту покривають шаром штукатурки з армуючою сіткою, що виготовлена з високоміцного й одночасно інертного матеріалу у вигляді скловолна.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

Strengths. У порівнянні з аналогами позитивна дія об'єкта досліджень у вигляді складових елементів системи термомодернізації полягає в довгостроковій оптимізації організаційних та технічних рішень з підвищення енергетичної ефективності українських будівель і споруд для різних кліматичних умов. Це включає моделювання ефективних параметрів трубопроводів системи центрального водяного опалення та теплоізоляції фасаду.

Weaknesses. До слабких сторін пропонувані ефективних параметрів та матеріалів виконання трубопроводів системи центрального водяного опалення та теплоізоляції фасаду при здійсненні термомодернізації будівель і споруд можна віднести необхідність початкових капітальних вкладень в систему нових транзитних трубопроводів водяного опалення і в фасадну теплоізоляцію. Також необхідно передбачити витрати на їх монтаж за місцем розміщення будівель і споруд. Також до слабких сторін пропонувані рішень можна віднести їх локальність («точковість») по відношенню до всієї комплексної системи термомодернізації та відсутність розгляду взаємодії усіх складових елементів системи термомодернізації.

Opportunities. Пропонувані технічні рішення з підвищення енергетичної ефективності будівель і споруд сприятимуть зниженню споживання теплової енергії в опалювальний сезон. Це, у свою чергу, дозволить суттєво зменшити суми комунальних платежів за опалення як для населення, так і для промислових підприємств. Очікуваний прибуток прогнозується отримати приблизно через 2–3 роки в залежності від кількості термомодернізуємих об'єктів.

Threats. Від підприємства чи експлуатуючої організації будуть потрібні початкові капітальні вкладення в систему нових транзитних трубопроводів водяного опалення і в фасадну теплоізоляцію. Також необхідні витрати на їх монтаж за місцем розміщення термомодернізуємих будівель і споруд.

Негативна дія на об'єкт дослідження зовнішніх чинників у вигляді зовнішнього середовища та інших умов експлуатації обумовлені нормативним терміном експлуатації фасадної теплової ізоляції та системи нових транзитних трубопроводів водяного опалення. Це залежить від використовуваних матеріалів і кліматичних зон експлуатації термомодернізуємих будівель і споруд. Однак цей термін становить не менше 20 років, що є більш, ніж достатнім, для самоокупності розроблених організаційно-технічних рішень з термомодернізації. Останні охороняються патентами України на винаходи на спосіб і пристрій, що підтверджує їх інноваційність серед подібних світових прототипів.

8. Висновки

1. В результаті проведених експериментально-чисельних і розрахункових досліджень обґрунтовано ефективні конструктивні параметри та матеріал виконання трубопроводів системи центрального водяного опалення для суттєвого зменшення енергоспоживання існуючих будівель і споруд українського житлового фонду. Встановлено, що відхилення від знайдених експериментально-розрахунковим шляхом оптимальних розмірів та ефективних

матеріалів виконання елементів системи термомодернізації призводить до високих теплових втрат, порушення несучої здатності існуючих фасадних стін термомодернізуємої будівлі. Не менш негативним наслідком є високий гідравлічний опір в трубопроводах, можливість замерзання в них теплоносія, а термічне розширення трубопроводів та порушення цілісності шару фасадної теплоізоляції.

Визначено мінімальну товщину шару фасадної теплоізоляції, що становить 50 мм, для досліджуваного температурного режиму і умов експлуатації, а також для характеристик використовуваних матеріалів, геометрії трубопроводів і фасадної теплоізоляції для першої температурної зони.

2. Знайдено ефективні конструктивні параметри та матеріал виконання тфасадної теплової ізоляції. Отримана оптимальна товщина шару фасадної теплоізоляції, що становить 100 мм, та приводить до 100 %-го захисту від замерзання трубопроводів навіть при повній зупинці руху теплоносія протягом більше, ніж 24 години після припинення руху теплоносія. Відзначено, що з огляду на незначну вагу застосування фасадної теплоізоляції, відповідає необхідність посилення несучих конструкцій термомодернізуємої будівлі. Кріплення фасадної теплоізоляції і трубопроводів двотрубною системою водяного опалення здійснюється за допомогою клейових сумішей і «зонтичних кріплень». Завдяки цьому забезпечується постійний мікроклімат всередині приміщень, тобто комфортні умови роботи чи проживання.

3. Здійснено моделювання ефективних параметрів трубопроводів системи центрального водяного опалення та теплоізоляції фасаду для різних кліматичних умов. Результати моделювання доцільно розповсюдити як на українські, так і на зарубіжні організації, що обслуговують зазначені будинки і споруди. Отримані результати розширюють географічні кордони застосування розроблених технічних рішень, що підкреслює перспективність досліджуваного напряму термомодернізації та його експортну орієнтованість.

References

1. Yeromin A., Kolosov A. Choice and ground for direction of energy efficiency increasing for Ukrainian buildings and facilities // *Technology Audit and Production Reserves*. 2018. Vol. 1, No. 1 (39). P. 48–55. doi:[10.15587/2312-8372.2018.85402](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.85402)
2. Yeromin A., Kolosov A. Modeling of energy efficient solutions regarding the heating system and the facade heat insulation in the implementation of thermomodernization // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1, No. 8 (91). P. 49–57. doi:[10.15587/1729-4061.2018.123021](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123021)
3. DSTU В V.3.2-3:2014. Nastanova z vykonannya termomodernizatsii zhytlovykh budynkiv. Introduced: 01.10.2015. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2014. 70 p.
4. DBN V.2.6-31: 2016. Teplova izoliatsiia budivel'. Approved by the order of the Ministry of Regional Development of Ukraine from 08.07.2016 No. 220. Introduced: 08.10.2016. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2016. 30 p.

5. Weglarz A., Gilewski P. G. A Method of Evaluation of Polioptimal Thermo-modernization Schemes of Buildings // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 153. P. 862–865. doi:[10.1016/j.proeng.2016.08.194](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.194)
6. Kuzniar K., Zajac M. Numerical evaluation of natural vibration frequencies of thermo-modernized apartment buildings subjected to mining tremors // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 199. P. 296–301. doi:[10.1016/j.proeng.2017.09.039](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.039)
7. Assessment of single-family house thermal renovation based on comprehensive on-site diagnostics / Hurnik M. et al. // *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 158. P. 162–171. doi:[10.1016/j.enbuild.2017.09.069](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.069)
8. Zender-Swiercz E., Piotrowski J. Z. Thermomodernization a building and its impact on the indoor microclimate // *Structure and Environment: Architecture, Civil Engineering, Environmental Engineering and Energy*. 2013. Vol. 5, No. 3. P. 37–40.
9. Jaworska-Michalowska M. Ochrona historycznej elewacji w procesie termomodernizacji – wybrane zagadnienia // *Czasopismo Techniczne. Budownictwo*. 2009. Vol. 106, No. 2-B. P. 151–161.
10. Sadowska B., Sarosiek W. Efficiency of raising low-energy buildings and thermomodernization of existing ones // *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*. 2014. Vol. 63, No. 1. P. 179–191.
11. Rutkowska G., Wojnowski D. Analysis of variants thermomodernization of a dwelling house from a point of view of optimal energetic demands // *Inzynieria Ekologiczna*. 2014. Vol. 37. P. 162–173.
12. Lundstrom L., Wallin F. Heat demand profiles of energy conservation measures in buildings and their impact on a district heating system // *Applied Energy*. 2016. Vol. 161. P. 290–299. doi:[10.1016/j.apenergy.2015.10.024](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.024)
13. Bali D., Maljkovi D., Loncar D. Multi-criteria analysis of district heating system operation strategy // *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 144. P. 414–428. doi:[10.1016/j.enconman.2017.04.072](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.072)
14. Kolosov A. E., Virchenko G. A., Kolosova E. P., Virchenko G. I. Structural and Technological Design of Ways for Preparing Reactoplastic Composite Fiber Materials Based on Structural Parametric Modeling // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2015. Vol. 51, No. 7–8. P. 493–500. doi:[10.1007/s10556-015-0075-3](https://doi.org/10.1007/s10556-015-0075-3)
15. Zender-Swiercz E., Telejko M. Impact of Insulation Building on the Work of Ventilation // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 161. P. 1731–1737. doi:[10.1016/j.proeng.2016.08.766](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.766)
16. Optimization of Thermal Insulation and Regression Analysis of Fuel Consumption / Lulic H. et al. // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 69. P. 902–910. doi:[10.1016/j.proeng.2014.03.069](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.069)
17. Image-based thermographic modeling for assessing energy efficiency of buildings facades / Gonzalez-Aguilera D. et al. // *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 65. P. 29–36. doi:[10.1016/j.enbuild.2013.05.040](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.040)
18. Sierra-Perez J., Boschmonart-Rives J., Gabarrell X. Environmental assessment of facade-building systems and thermal insulation materials for different climatic conditions // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 113. P. 102–113. doi:[10.1016/j.jclepro.2015.11.090](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.090)

19. Sulakatko V., Lill I., Witt E. Methodological Framework to Assess the Significance of External Thermal Insulation Composite System (ETICS) on-site Activities // Energy Procedia. 2016. Vol. 96. P. 446–454. doi:[10.1016/j.egypro.2016.09.176](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.176)

20. Elarga H., De Carli M., Zarrella A. A simplified mathematical model for transient simulation of thermal performance and energy assessment for active facades // Energy and Buildings. 2015. Vol. 104. P. 97–107. doi:[10.1016/j.enbuild.2015.07.007](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.007)

21. Vox G., Blanco I., Schettini E. Green facades to control wall surface temperature in buildings // Building and Environment. 2018. Vol. 129. P. 154–166. doi:[10.1016/j.buildenv.2017.12.002](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.002)

22. Cvetkovi D., Boji M. Optimization of thermal insulation of a house heated by using radiant panels // Energy and Buildings. 2014. Vol. 85. P. 329–336. doi:[10.1016/j.enbuild.2014.09.043](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.043)

23. Modeling of facade elements with switchable U-value / Pflug T. et al. // Energy and Buildings. 2018. Vol. 164. P. 1–13. doi:[10.1016/j.enbuild.2017.12.044](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.044)

24. Investigations on Physical-mechanical Properties of Effective Thermal Insulation Materials from Fibrous Hemp / Kremensas A. et al. // Procedia Engineering. 2017. Vol. 172. P. 586–594. doi:[10.1016/j.proeng.2017.02.069](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.069)

25. Procedure for analysis of ultrasonic cavitator with radiative plate / Kolosov A. E. et al. // Chemical and Petroleum Engineering. 2013. Vol. 48, No. 11–12. P. 662–672. doi:[10.1007/s10556-013-9677-9](https://doi.org/10.1007/s10556-013-9677-9)

26. Yeromin A. V. Systema kompleksnoi termomodernizatsiyi budivel i sporud za Yerominym: Patent No. 115858 C2 UA, MPK F24D3/00, F16L59/00. Appl. No. a201709331. Filed: 25.09.2017. Published: 26.12.2017. Bull. No. 24.

27. Yeromin A. V. Sposib kompleksnoi termomodernizatsiyi budivel i sporud za Yerominym: Patent No. 115760 C2 UA, MPK F24D3/00, F16L59/00. Appl. No. a201709333. Filed: 25.09.2017. Published: 11.11.2017. Bull. No. 23.