

С.В. Романенко

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,
Україна

МЕТОДИКА ВИБОРУ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ПРИ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІЙ РЕНОВАЦІЇ БУДИНКІВ

В даній статті запропоновано методика вибору альтернативних джерел енергії для систем теплопостачання будинків при проведенні заходів при їх реновації з метою зменшити енергоспоживання та викиди вуглецю в навколишнє середовище. Методика ґрунтується на визначенні індексів енергоефективності будівлі для визначення оптимального варіанту впровадження. Розглянуто приклад втілення запропонованої методики для учбового корпусу університету.

Ключові слова: альтернативні джерела енергії, термомодернізація будівель, тепловий насос, системи опалення будинків.

Постановка проблеми

Сучасні енергетичні системи в усьому світі стикаються з необхідністю переходу до сталих моделей енергопостачання, які не сприяють накопиченню вуглецю в атмосфері та не посилюють парниковий ефект – чинник, що нині визнається ключовим драйвером глобальної зміни клімату [1]. Для забезпечення універсального доступу до енергоресурсів, покращення якості довкілля та задоволення зростаючих енергетичних потреб людства потрібна комплексна трансформація усіх елементів енергетичної інфраструктури. Такий перехід не має єдиного або простого рішення і потребує багатовимірного підходу. Зниження обсягів викидів парникових газів можливе завдяки поєднанню різних джерел енергії та технологічних рішень, які забезпечують високий рівень ефективності й економічної доцільності. Однак, для утримання глобального потепління в межах допустимих значень, необхідне впровадження додаткових і, водночас, рішучих заходів. Згідно з цілями сталого розвитку до 2030 року [2], провідну роль у досягненні кліматичної нейтральності відіграють відновлювані джерела енергії та підвищення енергоефективності. Саме ці напрями визначаються як основні інструменти для скорочення викидів вуглецю та зменшення рівня забруднення навколишнього середовища.

У Європі комунальний сектор відповідає за 43% загального енергоспоживання та 36% викидів парникових газів в атмосферу. Зокрема, енергія, що використовується для опалення приміщень і гарячого водопостачання, становить 65% від цього обсягу. Більшість теплових систем у містах все ще функціонують на природному газі як основному паливі. Оскільки близько 75% населення Європи проживає в міських умовах [3], а енергоспоживання комерційними, громадськими та житловими

будівлями становить значну частину від загального обсягу енергії, виникає актуальна проблема розробки більш чистих і сталих систем опалення для урбанізованих територій. Це потребує надійних методів комплексного впровадження та забезпечить стале постачання теплової енергії в будинках та забезпечить комфортні умови в зимовий період.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для вирішення проблеми скорочення енергопотреб та викидів вуглецю в атмосферу для систем теплопостачання будинків, необхідне збільшення частки екологічно чистих технологій опалення, таких як теплові насоси, централізоване опалення (ЦТ) та використання відновлювальних джерел енергії. Окрім цього, рециркуляція тепла з існуючих енергетичних систем може забезпечити значну економію первинної енергії та сприяти зменшенню викидів парникових газів [4]. Вивчення впливу на навколишнє середовище різних джерел енергії, що використовуються в системах опалення, здійснено в роботі [5], де джерела енергії на основі відновлювальних джерел енергії продемонстрували менший екологічний вплив та були рекомендовані для впровадження в майбутньому.

Стратегії декарбонізації систем опалення будівель передбачають різноманітні варіанти покращення як попиту на енергію, так і постачання енергії, а також впровадження комплексних рішень після реконструкції огорожувальних конструкцій. Безперервна трансформація енергоефективності окремих будівель та систем постачання енергії є складовою частиною стратегій декарбонізації, що підтримують сталий розвиток [6]. Вибір сценаріїв реконструкції на рівні груп будинків включає покращення енергоефективності окремих будівель, при цьому вартість реконструкції повинна враховувати як стратегії зменшення попиту на

енергію, так і зниження енергоспоживання [7]. Основний підхід полягає в тому, що будівлі повинні ставати більш енергоефективними, а використання викопних видів палива має бути мінімізовано або заміщено відновлювальними джерелами енергії. Збільшення енергоефективності попиту на енергію полягає в удосконаленні огорожувальних конструкцій, зокрема фасадів, вікон і дахів, що, в свою чергу, дозволяє зменшити теплові потреби будівлі.

Система постачання енергії тісно пов'язана з попитом і включає застосування відновлювальних джерел енергії, автоматизованих систем керування та вдосконалення обладнання теплопостачання, таких як ефективні індивідуальні теплові пункти для опалення та гарячого водопостачання. Необхідно враховувати системний підхід, що одночасно реалізує обидві стратегії, оскільки вони взаємно впливають одна на одну та мають різну ефективність та .

Одним із головних викликів під час впровадження інновацій є зниження енергоспоживання на опалення при одночасному забезпеченні комфортних умов всередині будівлі, будь то житлові приміщення чи громадські будівлі. Багато досліджень аналізують вплив енергоспоживання на керування вентиляцією, системами опалення та кондиціонування, як це зазначають [8]. Іншим підходом до зменшення енергоспоживання є використання прогнозу погоди для регулювання роботи системи опалення [9]. За допомогою застосування прогнозу погоди в системах керування на рівні міста можливо оптимізувати споживання природного газу для систем, що використовують викопні види палива [10]. Більшість існуючих систем вентиляції, опалення та кондиціонування повітря (HVAC) у громадських будівлях не враховують рівень заповнюваності і проектується, виходячи з умов максимальної заповнюваності [11], що призводить до непотрібного енергоспоживання. Перспективним підходом є використання систем керування на основі рівня заповнюваності приміщень для систем HVAC [12], що дозволяє досягти економії до 6,1% на рік для офісних будівель.

Проте аналіз енергоефективності в різних регіонах Європи згідно роботи [13] виявив суттєві відмінності у попиті на опалення та охолодження, а також у споживанні енергії, залежно від кліматичних умов. Дослідження демонструє розбіжності в первинному енергоспоживанні від 9% до 88% у різних регіонах, а також різні рівні викидів CO₂. Такі розбіжності підкреслюють необхідність врахування місцевих кліматичних умов при розробці стратегій модернізації будівель. У оглядовій статті [14] аналізуються різні стратегії підвищення енергоефективності будівель у Східній та

Центральній Європі, зокрема політики щодо зменшення енергоспоживання, що включають утеплення та вибір джерела тепла. Відновлення будівель та впровадження відновлювальних джерел енергії вказуються як ключові стратегії для покращення енергетичної безпеки. Аналіз різних джерел енергії для системи опалення в житлових будівлях півдня Польщі наведений у роботі [15], де доведено можливість повного покриття енергетичних потреб за рахунок відновлювальних джерел. Такі варіації створюють труднощі при формулюванні універсальних рекомендацій, які б враховували різноманітність кліматичних зон та будівельних стандартів різних країн.

Більшість міського житла в Україні складається зі старих будівель. Покращення теплових характеристик будівельної оболонки та зменшення тепловтрат є першим кроком на шляху до підвищення енергоефективності та зниження попиту на теплоту. Іншою особливістю теплозабезпечення міськ України є теплопостачання від централізованих теплових мереж, яка є досить розвинутою в українських містах з населенням понад 10 000 жителів. У густонаселених районах міст із різними будівлями, розташованими близько одна до одної, комунальні послуги постачаються від центрального джерела тепла, яким, як правило, є когенерація тепла та електроенергії, через розподільну мережу у вигляді пари під тиском або гарячого теплоносія, яким вступає вода. Переважаючим паливом для систем ЦТ є природний газ, де зростає біомаса, яка використовується для виробництва тепла. У 2018 році близько 42 ТВт·год теплової енергії було поставлено кінцевим споживачам ЦТ, виробленої переважно з природного газу [16]. Аналіз технічного стану систем централізованого теплопостачання в Україні [17] показує поступовий занепад. За останні двадцять років ефективна довжина труб у мережах теплопостачання зменшилася приблизно на 8000 км через меншу кількість споживачів ЦТ. Понад 38% з 20 000 км мереж централізованого теплопостачання, які все ще діють, знаходяться в незадовільному технічному стані. Втрати тепла в розподільних мережах в середньому складають близько 19%. Багато будинків не мають встановлених автоматизованих індивідуальних теплових пунктів. Наприклад, у місті Полтаві лише 14 із 1438 підключених до централізованого теплопостачання будинків, обладнано індивідуальними тепловими пунктами [18]. Надійний і стійкий перехід до нових енергоефективних систем теплопостачання в Україні вимагає розумної модернізації об'єктів теплоспоживання, до якої входять житлові та адміністративні будинки. Проста заміна старого обладнання на сучасне з такою ж потужністю

здебільшого не є розумним варіантом, оскільки інфраструктура теплопостачання існуючої мережі централізованого теплопостачання, її попит та транспорт не відповідають існуючим вимогам.

Перспективи переоснащення існуючих систем централізованого теплопостачання в Україні на низькотемпературні з застосуванням відновлювальних джерел енергії проаналізовано в [19]. Висновок щодо основних обмежень полягає в тому, що необхідні великі капіталовкладення для оновлення. Тим не менш, підвищення енергоефективності з використанням відновлюваних джерел енергії робить удосконалення існуючих систем теплозабезпечення вирішальним фактором сталого розвитку України.

Мета статті

Згідно з оглядом останніх досліджень, для досягнення ефективної реконструкції систем теплозабезпечення будинків, необхідний інтегрований підхід, заснований на математичному моделюванні енергетичної системи будівлі та її системи опалення, з урахуванням кліматичних умов та локальних регуляційних вимог до будівництва, з можливістю оптимального вибору альтернативних джерел енергії, включаючи відновлювальні. Таким чином, безпосередньо розглядаючи тепловтрати будівлі, поточне дослідження зосереджується на багатокритеріальній оцінці енергетичної, екологічної та економічної ефективності впровадження різних заходів з реконструкції, дозволяючи підібрати джерело теплопостачання, серед яких розглядаються альтернативні та відновлювальні засоби.

Виклад основного матеріалу

Для визначення теплової потреби будинку і вибору оптимального альтернативного джерела тепла, необхідно встановити потреби тепла будинку до реконструкції, що здійснюється шляхом проведення енергоаудиту будинку і виявлення міст теплової проникності на основі термограмм. Отримані дані дозволяють встановити річні енергопотреби будинку до і після реконструкції, і на основі багатокритеріальної оптимізації обрати найкращий варіант.

Математична модель визначення теплового споживання будинку. Теплова енергія може втрачатися з будівлі через різні елементи її огорожувальних конструкцій – зокрема, через стіни, віконні та дверні прорізи, покрівлю, перекриття, а також через так звані теплові мости. Для розрахунку сумарних втрат тепла будівлею застосовується відповідне математичне рівняння.:

$$Q_b = \left(\sum_{i=1}^n k_i A_i + c_p \cdot m_{air} \right) \cdot \Delta t, \quad (1)$$

де k_i – коефіцієнт теплопередачі через i -й елемент огорожувальної конструкції будівлі, Вт/м²·К; A_i – площа i -го елемента огорожувальної конструкції будівлі, м²; c_p – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·К); m_{air} – інфільтраційна масова витрата повітря, кг/с; Δt – різниця між внутрішньою t_{in} та зовнішньою t_{out} температурами, °С. До спостережуваних втрат теплової енергії через огорожувальні елементи будівлі належать теплові втрати, що виникають внаслідок інфільтрації повітря, а також через покрівлю, підлогу, віконні конструкції та стіни.

Коефіцієнт тепловіддачі для i -го елемента конструкції будівлі визначається наступним чином:

$$k_i = \left((\alpha_{in})^{-1} + \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\lambda_i} + (\alpha_{out})^{-1} \right)^{-1}, \quad (2)$$

де α_{in} і α_{out} – коефіцієнти теплопередачі від стіни всередину приміщення та ззовні до стіни, Вт/(м²·К); h_i – товщина i -го шару, м; λ_i – теплопровідність i -го шару матеріалу огорожувальної конструкції, Вт/(м·К).

Витрата повітря, що надходить в простір з інфільтратом, залежить від внутрішнього об'єму приміщення:

$$m_{air} = n \cdot F \cdot h \cdot \rho_{air}, \quad (3)$$

де ρ_{air} – густина повітря в приміщенні, кг/м³; F – площа приміщення, м²; h – висота приміщення, м; n – відношення об'єму повітря, що надходить у приміщення, до фіксованого об'єму приміщення, що залежить від призначення та енергоефективності будівлі, год⁻¹. У випадку житлових та комерційних будівель цей показник коливається в межах від 2,0 до 0,8 год⁻¹, однак для досягнення вищої енергоефективності будівель необхідно прагнути до його зниження..

Річне споживання тепла, розраховане за коефіцієнтом тривалості опалювального періоду, дорівнює визначається за формулою:

$$Q_{year} = \sum_{i=1}^{12} Q_i^{av} \cdot n_0, \quad (4)$$

де Q_{year} – споживання тепла протягом року, Дж/р; Q_i^{av} – середнє споживання тепла за опалювальний період у i -му місяці, Дж/год; n_0 – тривалість опалювального періоду, год/р.

Спожите паливо для покриття теплових потреб будинку, м³, в разі використання природного газу залежить від його характеристик і визначається за формулою:

$$V_{fuel} = \frac{3.6 \cdot Q_{year}}{Q_{lower} \cdot \rho_{fuel}}, \quad (5)$$

де Q_{lower} – нижча теплота згоряння палива, МДж/кг;
 ρ_{fuel} – густина палива, кг/м³.

Збруднення навколишнього середовища, яке відповідає згорянню цієї кількості палива, розраховується відповідно до залежності:

$$m_{pol} = 3.6 \cdot 10^{-3} \cdot K_{pol} \cdot Q_{year}, \quad (6)$$

де K_{pol} – коефіцієнта викидів забруднюючих речовин, г/ГДж.

Річна вартість теплозабезпечення будинку враховує вартості виробництва тепла, спожитого протягом спостережуваного року та палива за наступним рівнянням:

$$C_{year} = 9.6 \cdot 10^{-4} \cdot c_{heat} \cdot \Delta Q + c_{fuel} \cdot V_{fuel} \cdot 10^{-3}, \quad (7)$$

де c_{heat} – вартість теплової енергії за одиницю за діючими тарифами, грн/ГДж; c_{fuel} – ціна палива, грн/т м³.

Отримані значення річного споживання тепла для будинку за формулою (4), споживання палива за формулою (5), викиди шкідливих величин за формулою (6) та річні витрати за формулою (7) далі порівнюються з випадками розрахунків споживання при термомодернізації будинку і підключення до альтернативних джерел енергії.

Математична модель для вибору альтернативних джерел енергії для теплової системи будинку. При визначенні необхідних засобів по реконструкції будинку, спочатку обираються методи термомодернізації огорожувальних конструкцій, і на основі цього визначається нове значення річних теплопотреб будинку за формулами (1-4). Для встановлення вартості реконструкції, визначається вартість матеріалів та робіт по термомодернізації, визначається тип та ціна альтернативних енергоресурсів на основі наступних математичних моделей.

Сонячний колектор. Кількість теплової енергії, яку виробляє сонячний колектор, розраховується з урахуванням його загальної площі A_{SC} , м², коефіцієнта корисної дії та величини глобального сонячного опромінення G_{Solar} , що визначається на основі кліматичних умов [20]:

$$Q_{SC} = \eta_{SC} \cdot G_{Solar} \cdot A_{SC}, \quad (8)$$

де ефективність оцінювалася як середньомісячна згідно з таким співвідношенням:

$$\eta_{SC} = \eta_0 - c_1 \frac{(T_{av} - T_{air})}{G_{Solar}}, \quad (9)$$

де η_0 – максимальний ККД колектора без втрат тепла, c_1 – константа, що представляє коефіцієнт тепловтрат першого порядку; T_{av} і T_{air} – середня температура сонячного колектора і температура повітря, К.

Тепловий насос. Вибір тепловго насоса виконується з серійно випускаємих теплових насосів для систем опалення. Обсяг енергії, що генерується тепловим насосом типу «повітря-вода» протягом місяця, розраховується з урахуванням енергетичних потреб будівлі та коефіцієнта ефективності роботи теплового насоса, який змінюється залежно від температури зовнішнього повітря T_{out} , K , і температури теплоносія на виході з пристрою T_{HP_out} , К:

$$Q_{HP} = \frac{Q_b \cdot (T_{HP_out} - T_{out})}{0.5 \cdot T_{HP_out}}, \quad (10)$$

Значення температури теплоносія на виході з теплового насоса T_{HP_out} визначається типом внутрішньої системи опалення будівлі. Згідно з технічними рекомендаціями виробника, при використанні системи «тепла підлога» температура становить 35 °С, а для радіаторного опалення – 55 °С.

Багатоцільова оптимізація на основі показників ефективності проведення модернізації системи теплозабезпечення будівлі. Необхідність оцінювати одночасно кілька показників ефективності – енергії, економії та викидів призвела до використання методів багатокритеріальної оптимізації. Математичну модель багатокритеріальної функції в загальному вигляді можна представити наступним чином:

$$\min/\max_{x \in X} (f_1(x), f_1(x), \dots, f_k(x))$$

$$x \in X, \quad x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n, \quad k \geq 2$$

$$g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, p$$

$$h_j(x) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, q \quad (11)$$

$$x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$X = \{x^* \in \mathbb{R}^n \mid g_i(x) \leq 0, \quad h_j(x) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, p, j = 1, 2, \dots, q\},$$

де цільову функцію можна мінімізувати або максимізувати за кількістю k критеріїв оптимізації, $g_i(x)$, $h_j(x)$ та $x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)}$ є обмеженнями в вигляді нерівності, рівності та граничного наближення, $\mathbb{R}^n$ – це n -вимірний простір, утворений проектними змінними. Простір розв'язків X – це набір усіх можливих точок оптимізаційної задачі x^* , які задовольняють функції обмежень, при $f(x) \leq f(x^*)$, x^* утворюють набір оптимальних розв'язків Парето.

Для здійснення багатокритеріальної оптимізації опалювальної системи з використанням альтернативних джерел енергії було реалізовано метод, заснований на аналізі показників ефективності. У його основі лежить оцінка трьох ключових показників ефективності: енергетичного EPI_1 , екологічного EPI_2 та економічного EPI_3 . Ці

показники оптимізувалися на кожному етапі модернізації з метою подальшого відстеження їх змін у процесі впровадження інновацій.

Показники ефективності визначаються як співвідношення між питомою величиною річного показника до і після реконструкції. Для визначення енергетичного показника ефективності розраховується кількість теплової енергії, необхідної після впровадження інноваційних заходів за формулою (4). Різниця між значеннями енергоспоживання до реконструкції Q_{year}^0 , отримана на першому етапі моделювання, та для випадку після реконструкції ΔQ . Показник енергоефективності EPI_1 визначається як відношення отриманої різниці до величини початкового значення енергоспоживання, тобто $\Delta Q/Q_{year}^0$. Аналогічно екологічний показник ефективності EPI_2 визначається як $\Delta m_{pol}/m_{pol}^0$ за формулою (6), та показник економічного ефекту EPI_3 становитиме $\Delta C_{year}/C_{year}^0$ за формулою (7).

За отриманими показниками з використанням багатокритеріального підходу (11), проводять оптимізацію наступної цільової функції:

$$\max F(x) = \sum_{k=1}^K w_k EPI_k(x), \quad (12)$$

де x – сукупність заходів по реконструкції теплової системи будівлі; w_k – вагомість цілі, яка вибирається пропорційно до її відносної важливості в кожному конкретному випадку; обмеження визначаються чинними рекомендаціями будівельних стандартів для параметрів з термомодернізації, регулюваннями з викидів забруднюючих речовин в атмосферу для викидів, та обмеженнями в фінансуванні для економічного показника.

Представлена математична модель, описана рівняннями (4)–(7) з застосуванням багатокритеріальної оптимізації (12) за показниками ефективності впровадження заходів по теплової модернізації будівлі, була реалізована в електронних таблицях Excel з використанням мови VBA.

Результати дослідження на натурному об'єкті та верифікація моделі. Розглянуто приклад втілення запропонованої методики для частини учбового корпусу Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова, зображеного на Рис. 1а.

Будинок побудовано о 1989 р., він складається з 3-х поверхів, в яких розташовано 6 приміщень. Загальна опалювальна площа складає 225,3 м². Площа першого поверху натурального об'єкта становить 79,20

м², а висота стелі дорівнює 3,40 м. Будівля має дві зовнішні стіни, а також дві стіни, що контактують з внутрішніми опалювальними приміщеннями. У цьому приміщенні розташовано чотири вікна. Площа другого поверху дорівнює 68,40 м², висота стелі також складає 3,40 м. Тут також присутні дві зовнішні стіни та дві стіни, суміжні з внутрішніми опалювальними кімнатами, а також чотири вікна. На третьому поверсі знаходяться три кабінети. Перший має площу 40,10 м² та висоту стелі 3,40 м, оснащений двома вікнами, однією зовнішньою стіною та трьома стінами, які прилягають до опалювальних приміщень. Другий кабінет площею 18,00 м² при висоті стелі 3,40 м має одне вікно, одну зовнішню стіну і три стіни, суміжні з опалювальними кімнатами. Третя кімната має площу 19,60 м², висоту стелі 3,40 м, одне вікно, дві зовнішні стіни та дві стіни, що межують із внутрішніми опалювальними приміщеннями. Термограма об'єкту дослідження представлена на Рис. 1б.

Фундамент будівлі виконаний із повнотілої керамічної цегли. Переkritтя між опалювальним простором цокольного поверху та фрагментом адмінкорпусу – багатопустотна залізобетонна плита вкрита плитами ДСП з шаром паркетного покриття із деревини твердих порід поверх нього в приміщеннях адміністративного призначення, та шаром кольорової плитки в місцях загального користування. Зовнішні огорожувальні конструкції стін виконані з повнотілої керамічної цегли на основі цементно-піщаного розчину, та зовні мають шар покриття цементної штукатурки типу «шуба». Покрівля є скатною вкритою листовим шифером. Горище покриття вентильється зовнішнім повітрям, переkritте залізобетонними плитами без шару утеплювача у будь якому виконанні. Вікна виконані з полівінілхлоридного профілю із заповненням однокамерними склопакетами (4М₁-18-4М₁), загальною площею 46,6 м². Середовище камер склопакетів заповнено повітрям.

Теплопостачання адмінбудівлі на потреби опалення здійснювалось від міських централізованих теплових мереж комунального підприємства «Харківські теплові мережі». В будівлі передбачено двотрубну систему опалення із вертикальними П-образними стояками із нижньою розводкою. В якості опалювальних приладів використані сталеві панельні конвектори із терморегуляторами.

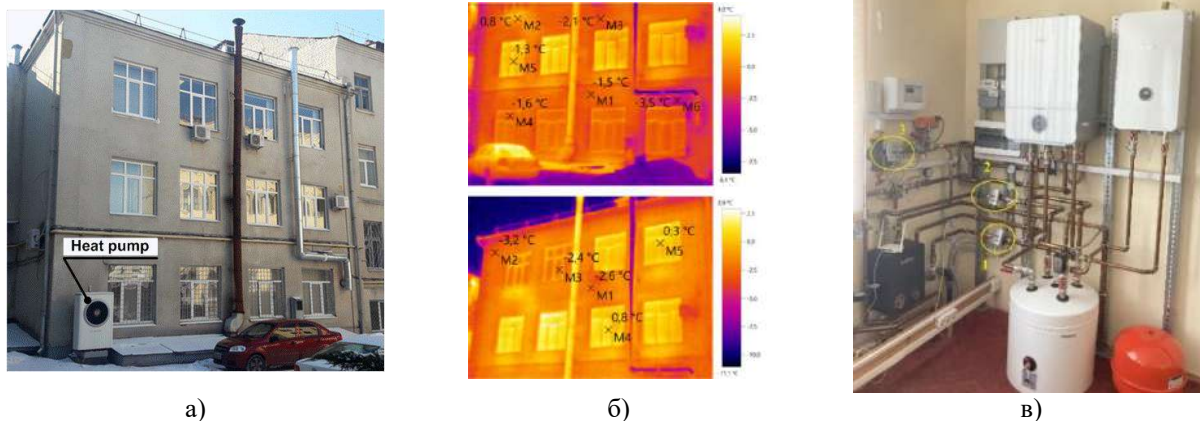


Рис. 1. Об'єкт дослідження: а) загальний вигляд фасаду; б) термограма при проведенні енергоаудиту; в) встановлений тепловий насос з вимірювальними приладами (позиції 1,2,3)

Фактичний річний обсяг теплоспоживання фрагментом будівлі, усереднений за останні 2 роки, складає 48,8 МВт·год. Фактична за останні роки середньорічна питома енергопотреба на 1 м² загальної площі дорівнює 205,4 Вт/м² або на 1 м³ опалювального об'єму 73,4 Вт/м³, і потребує проведення термомодернізації будівлі.

На першому етапі моделювання, відповідно до запропонованого підходу було встановлено енергетичні потреби будівлі по місяцях та поточне значення викидів в атмосферу та затрат на теплоенергію, які представлені в Таблиці 1.

Таблиця 1

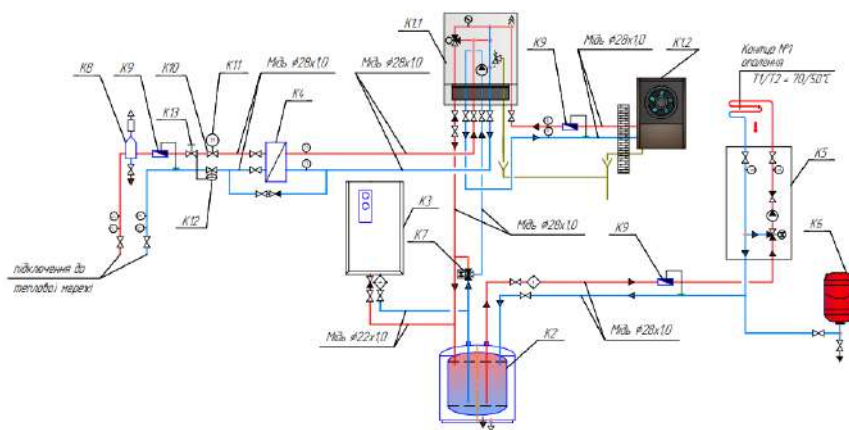
Показники початкового стану об'єкту дослідження до модернізації

Період року	Q_{year}^0 , Гкал	V_{fuel}^0 , 10 ³ м ³	$m_{CO_2}^0$, 10 ³ кг	m_{NOx}^0 , кг	C_{year}^0 , тис. грн
Зима	23,9	3,1	6,1	0,006	25,9
Весна	7,8	0,9	1,8	0,003	8,6
Літо	0	0	0	0	0
Осінь	8,6	1,1	2	0,003	9,7
Річний	40,3	5,1	9,9	0,012	44,2

При модернізації було запропоновано зробити термомодернізацію огорожувальних конструкцій та в якості альтернативного джерела теплової енергії встановити тепловий насос Buderus Logatherm WPL17AR з зовнішнім блоком Bosch Compress 7000i AW B17 OR-T та внутрішнім AW B17. В якості резервного джерела тепла в разі недогріву в зимовий

період встановлено електричний котел Bosch Tronic Heat 3000 6 UA. Схема підключення комбінованої системи опалення представлена на Рис. 2.

Розраховані показники енергетичної, екологічної та економічної ефективності впроваджень у порівнянні з початковим станом об'єкту дослідження в опалювальний сезон наведені на Рис. 3.



Поз.	Позначення	Найменування	Кол- тис.	Маса кг	Вартість
K11	Вент. Слоты 800 мм 17.8	Вентилятори 800 мм 17.8	1		
K12	Вент. Слоты 800 мм 17.8	Вентилятори 800 мм 17.8	1		
K2	Вент. Слоты 800 мм 17.8	Вентилятори 800 мм 17.8	1		
K3	Вент. Слоты 800 мм 17.8	Вентилятори 800 мм 17.8	1		
K4	Вент. Слоты 800 мм 17.8	Вентилятори 800 мм 17.8	1		
K5	Вент. Слоты 800 мм 17.8	Вентилятори 800 мм 17.8	1		
K6	Вент. Слоты 800 мм 17.8	Вентилятори 800 мм 17.8	1		
K7	Вент. Слоты 800 мм 17.8	Вентилятори 800 мм 17.8	1		
K8	Вент. Слоты 800 мм 17.8	Вентилятори 800 мм 17.8	1		
K9	Вент. Слоты 800 мм 17.8	Вентилятори 800 мм 17.8	1		
K10	Вент. Слоты 800 мм 17.8	Вентилятори 800 мм 17.8	1		
K11	Вент. Слоты 800 мм 17.8	Вентилятори 800 мм 17.8	1		
K12	Вент. Слоты 800 мм 17.8	Вентилятори 800 мм 17.8	1		
K13	Вент. Слоты 800 мм 17.8	Вентилятори 800 мм 17.8	1		

Рис. 2. Функціональна схема комбінованої системи опалення з тепловим насосом

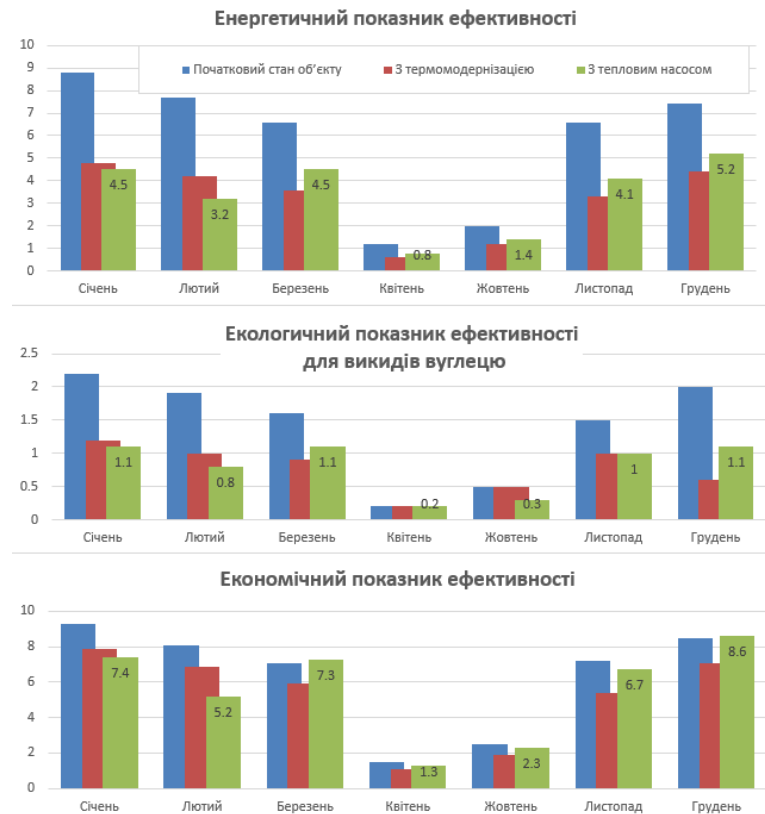


Рис. 3. Значення показників ефективності для початкового стану, проведення термомодернізації будівлі і встановлення теплового насосу

Термомодернізація огорожувальних конструкцій будівлі є достатньо ефективним заходом з енергозбереження, який дозволяє суттєво зменшити витрати теплової енергії системою теплоспоживання протягом опалувального періоду і отримати такий річний ефект:

- енергетичний: економія теплової енергії – 22,1 Гкал або 54,8%;
- екологічний: скорочення витрати природного газу – 2,8 тис. м³, зменшення викидів у атмосферу CO₂ і NO_x – 5,4 т і 0,006 т, відповідно;
- економічний: скорочення плати за опалення – 36,1 тис. грн.

Використання в якості основного джерела теплопостачання теплового насосу є найбільш ефективним заходом з енергозбереження, який дозволяє забезпечити достатній обсяг теплової енергії для функціонування системи теплопостачання протягом року та отримати такий річний ефект:

- енергетичний: економія теплової енергії – 23,7 Гкал або 58,8%;
- екологічний: скорочення витрати природного газу – 3,0 тис. м³, зменшення викидів у атмосферу CO₂ і NO_x – 5,8 т і 0,006 т, відповідно;
- економічний: скорочення плати за теплову енергію – 38,8 тис. грн.; при цьому орієнтовний термін окупності заходу складає 17 років.

При проведенні багатокритеріальної оптимізації за формулою (12) найбільший пріоритет відводився до енергетичного показника ефективності, і обґрунтовано доцільність впровадження теплового насосу, який було встановлено о 2020 році, і представлено на Рис. 1в.

Перевірка адекватності моделі. Для вимірювання виробленої та спожитої теплової енергії в систему було встановлено наступні 3 лічильники виробництва Landis+Gyr ultraheat T 230:

- Позиція 1 – лічильник встановлений для обліку виробленої теплової енергії тепловим насосом.
- Позиція 2 – лічильник для обліку теплової енергії яка подається до системи опалення від джерела теплової енергії (теплового насосу).
- Позиція 3 – лічильник для фіксації показників спожитої теплової енергії від додаткового теплогенератора (централізоване опалення).

Максимальна похибка вимірювання лічильників складає 1,5% при $\Delta t = 3^\circ\text{C}$. Розташування лічильників теплової енергії комбінованої системи теплопостачання наведено на Рис. 1в.

Для контролю за споживанням електричної енергії система встановлено лічильники Nik 2303 ART T.1200.MC.11. Фіксація зовнішньої температури виконувалась датчиком Danfoss ESMT, який встановлений на північній стороні будівлі. Датчик

температури має опір 1000 Ом при 0°C. Вимірювання параметрів зовнішньої температури виконувалось кожні 15 хвилин та фіксувалось в архіву інтернет порталу ECL COMFORT.

На протязі опалювальних сезонів 2019/2020, 2020/2021, тепловий насос повністю забезпечував потреби приміщень натурного об'єкту. Порівняння розрахункових та експериментальних значень енергоспоживання за річний період становить $\pm 15\%$, що доводить адекватність запропонованої моделі.

Висновки

Енергоефективна модернізація систем теплопостачання будинків із збільшенням частки відновлюваних джерел енергії для виробництва теплової енергії дуже важливо для відбудови України. Сталий розвиток сучасних міст вимагає врахування енергетичного та екологічного ефекту кожного заходу разом із врахуванням вартості впровадження заходів з модернізації. Запропонований підхід на основі моделі системи теплопостачання, який оцінює вплив кожної інновації на основі введених енергетичних,

екологічних та економічних показників ефективності, є корисним інструментом при попередніх інженерних розрахунках на етапі проектування.

Представлена методологія знаходить оптимальне рішення при виборі різних джерел енергії для виробництва теплової енергії систем опалення адміністративних та житлових будинків на основі стану енергоефективності самої будівлі. Застосування запропонованої моделі продемонстровано на прикладі адміністративної будівлі в Харкові. Оцінка впровадження термомодернізації будівлі і встановлення теплового насосу оцінено за екологічними та економічними показниками. Проведення рекомендованої модернізації у 2020 році, і аналіз вимірювань на натурному об'єкті виявило розбіжність спрогнозованих тепловитрат від вимірних значень на рівні 15%, що дозволяє рекомендувати запропонований метод для удосконалення систем теплопостачання будинків.

Література

1. IEA. Tracking Clean Energy Progress 2023: Assessing critical energy technologies for global clean energy transitions. 2023, Available online: <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023> (accessed 09.04.2025).
2. IEA. Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach; International Energy Agency: Paris 2023, Available online: <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>, (accessed 09.04.2025).
3. DESA, UN. (2019). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420). New York: United Nations. <https://population.un.org/wup/assets/WUP2018-Report.pdf> (accessed 09.04.2025)
4. Bianchi, G., Panayiotou, G. P., Aresti, L., Kalogirou, S. A., Florides, G. A., Tsamos, K., Tassou, S. A., & Christodoulides, P. (2019). Estimating the waste heat recovery in the European Union Industry. *Energy, Ecology and Environment*, 4(5), 211-221. <https://doi.org/10.1007/s40974-019-00132-7>
5. Mahmoud, M., Ramadan, M., Naher, S., Pullen, K., & Olabi, A.-G. (2021). The impacts of different heating systems on the environment: A review. *Science of The Total Environment*, 766, 142625. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142625>
6. Guzović, Z., Duic, N., Piacentino, A., Markovska, N., Mathiesen, B. V., & Lund, H. (2022). Recent advances in methods, policies and technologies at sustainable energy systems development. *Energy*, 245, 123276. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123276>
7. Lerbinger, A., Petkov, I., Mavromatidis, G., & Knoeri, C. (2023). Optimal decarbonization strategies for existing districts considering energy systems and retrofits. *Applied Energy*, 352, 121863. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121863>
8. Taheri, S., Hosseini, P., & Razban, A. (2022). Model predictive control of heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems: A state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*, 60, 105067. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.105067>
9. Cholewa, T., Siuta-Olcha, A., Smolarz, A., Muryjas, P., Wolszczak, P., Guz, L., Bocian, M., Sadowska, G., Łokczewska, W., & Balaras, C. A. (2023). On the forecast control of heating system as an easily applicable measure to increase energy efficiency in existing buildings: Long term field evaluation. *Energy and Buildings*, 292, 113174. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113174>
10. Anđelković, A. S., & Bajatović, D. (2020). Integration of weather forecast and artificial intelligence for a short-term city-scale natural gas consumption prediction. *Journal of Cleaner Production*, 266, 122096. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122096>
11. Kitzberger, T., Kotik, J., & Pröll, T. (2022). Energy savings potential of occupancy-based HVAC control in laboratory buildings. *Energy and Buildings*, 263, 112031. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112031>
12. Lin, G., Casillas, A., Sheng, M., & Granderson, J. (2023). Performance Evaluation of an Occupancy-Based HVAC Control System in an Office Building. *Energies*, 16(20). <https://doi.org/10.3390/en16207088>
13. Valančius, K., Grinevičiūtė, M., & Streckienė, G. (2022). Heating and Cooling Primary Energy Demand and CO2 Emissions: Lithuanian A+ Buildings and/in Different European Locations. *Buildings*, 12(5), 570. <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/5/570>
14. Mišik, M., Oravcová, V., & Vicenová, R. (2024). Energy efficiency of buildings in Central and Eastern Europe: room for improvement. *Energy Efficiency*, 17(4), 32. <https://doi.org/10.1007/s12053-024-10215-y>
15. Pater, S. (2019). Field measurements and energy performance analysis of renewable energy source devices in a heating and cooling system in a residential building in southern

Poland. *Energy and Buildings*, 199, 115-125. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.057>

16. KT-Energy, L. (2018). District Heating in Ukraine: Improving the performance of District Heating Systems in Central and Eastern Europe. <https://keepwarmeuropa.eu/countries-in-focus/ukraine/english/> (accessed 09.04.2025)

17. Geletukha, G., Kramar, V., Oliynyk, Y., & Antonenko, V. (2019). Analysis of the possibilities for savings and development of district heating systems in Ukraine. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 41(1), 53-58. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2019.7>

18. Gebrail, G., Jordan-Tank, M., & Tvedt, K. (2018). 1086 Policy paper on infrastructure – Making district heating happen: empowering users through fair metering. <https://solarthermalworld.org/wp-content/uploads/2021/03/making-district-heating-happen-empowering-users-through-fair-metering-en.pdf> (accessed 09.04.2025)

19. Fialko, N. M., Tymchenko, N. P., & Sherenkovskiy, J. V. (2020). Fourth Generation of District Heating and Centralized Heating Supply Systems of Ukraine. *Proceedings of CEE 2019*, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_10

20. Trier, D., Nielsen, J., Sorensen, A., Le Denn, A., Miedaner, O., Pauschinger, T., & Schubert, M. (2012). Solar district heating Guidelines–Collection of fact sheets. *Intelligent Energy–Europe*. https://www.solar-district-heating.eu/wp-content/uploads/2018/06/SDH-Guidelines_update_09.2017.pdf (accessed 09.04.2025)

21. Polyvianchuk, A., Malyarenko, V., Semenenko, R., Gura, K., Varbanov, P. S., & Arsenyeva, O. (2023). The general-purpose approach for estimation of residential heating systems efficiency using the various energy sources. *Energy and Buildings*, 296, 113390. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113390>

References

1. IEA. Tracking Clean Energy Progress 2023: Assessing critical energy technologies for global clean energy transitions. 2023, Available online: <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023> (accessed 09.04.2025).

2. IEA. Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach; International Energy Agency: Paris 2023, Available online: <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>, (accessed 09.04.2025).

3. DESA, UN. (2019). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*. New York: United Nations. <https://population.un.org/wup/assets/WUP2018-Report.pdf> (accessed 09.04.2025)

4. Bianchi, G., Panayiotou, G. P., Aresti, L., Kalogirou, S. A., Florides, G. A., Tsamos, K., Tassou, S. A., & Christodoulides, P. (2019). Estimating the waste heat recovery in the European Union Industry. *Energy, Ecology and Environment*, 4(5), 211-221. <https://doi.org/10.1007/s40974-019-00132-7>

5. Mahmoud, M., Ramadan, M., Naher, S., Pullen, K., & Olabi, A.-G. (2021). The impacts of different heating systems on the environment: A review. *Science of The Total Environment*, 766, 142625. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142625>

6. Guzović, Z., Duic, N., Piacentino, A., Markovska, N., Mathiesen, B. V., & Lund, H. (2022). Recent advances in methods, policies and technologies at sustainable energy systems development. *Energy*, 245, 123276. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123276>

7. Lerbinger, A., Petkov, I., Mavromatidis, G., & Knoeri, C. (2023). Optimal decarbonization strategies for existing districts considering energy systems and retrofits. *Applied Energy*, 352, 121863. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121863>

8. Taheri, S., Hosseini, P., & Razban, A. (2022). Model predictive control of heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems: A state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*, 60, 105067. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105067>

9. Cholewa, T., Siuta-Olcha, A., Smolarz, A., Murjas, P., Wolszczak, P., Guz, Ł., Bocian, M., Sadowska, G., Łokczewska, W., & Balaras, C. A. (2023). On the forecast control of heating system as an easily applicable measure to increase energy efficiency in existing buildings: Long term field evaluation. *Energy and Buildings*, 292, 113174. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113174>

10. Anđelković, A. S., & Bajatović, D. (2020). Integration of weather forecast and artificial intelligence for a short-term city-scale natural gas consumption prediction. *Journal of Cleaner Production*, 266, 122096. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122096>

11. Kitzberger, T., Kotik, J., & Pröll, T. (2022). Energy savings potential of occupancy-based HVAC control in laboratory buildings. *Energy and Buildings*, 263, 112031. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112031>

12. Lin, G., Casillas, A., Sheng, M., & Granderson, J. (2023). Performance Evaluation of an Occupancy-Based HVAC Control System in an Office Building. *Energies*, 16(20). <https://doi.org/10.3390/en16207088>

13. Valančius, K., Grinevičiūtė, M., & Streckienė, G. (2022). Heating and Cooling Primary Energy Demand and CO2 Emissions: Lithuanian A+ Buildings and/in Different European Locations. *Buildings*, 12(5), 570. <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/5/570>

14. Mišik, M., Oravcová, V., & Vicenová, R. (2024). Energy efficiency of buildings in Central and Eastern Europe: room for improvement. *Energy Efficiency*, 17(4), 32. <https://doi.org/10.1007/s12053-024-10215-y>

15. Pater, S. (2019). Field measurements and energy performance analysis of renewable energy source devices in a heating and cooling system in a residential building in southern Poland. *Energy and Buildings*, 199, 115-125. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.057>

16. KT-Energy, L. (2018). District Heating in Ukraine: Improving the performance of District Heating Systems in Central and Eastern Europe. <https://keepwarmeuropa.eu/countries-in-focus/ukraine/english/> (accessed 09.04.2025)

17. Geletukha, G., Kramar, V., Oliynyk, Y., & Antonenko, V. (2019). Analysis of the possibilities for savings and development of district heating systems in Ukraine. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 41(1), 53-58. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2019.7>

18. Gebrail, G., Jordan-Tank, M., & Tvedt, K. (2018). 1086 Policy paper on infrastructure – Making district heating happen: empowering users through fair metering.

<https://solarthermalworld.org/wp-content/uploads/2021/03/making-district-heating-happen-empowering-users-through-fair-metering-en.pdf> (accessed 09.04.2025)

19. Fialko, N. M., Tymchenko, N. P., & Sherenkovskiy, J. V. (2020). Fourth Generation of District Heating and Centralized Heating Supply Systems of Ukraine. Proceedings of CEE 2019, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_10
20. Trier, D., Nielsen, J., Sorensen, A., Le Denn, A., Miedaner, O., Pauschinger, T., & Schubert, M. (2012). Solar district heating Guidelines–Collection of fact sheets. Intelligent Energy–

Europe. https://www.solar-district-heating.eu/wp-content/uploads/2018/06/SDH-Guidelines_update_09.2017.pdf (accessed 09.04.2025)

21. Polyvianchuk, A., Malyarenko, V., Semenenko, R., Gura, K., Varbanov, P. S., & Arsenyeva, O. (2023). The general-purpose approach for estimation of residential heating systems efficiency using the various energy sources. *Energy and Buildings*, 296, 113390. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113390>

Рецензент: д-р. техн. наук, проф., директор Навчально-наукового інституту підготовки кадрів вищої кваліфікації Харченко Віктор Федорович, Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова

Автор: ПОМАНЕНКО Сергій Вікторович старший викладач кафедри теплогазопостачання і вентиляції Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова
E-mail - Sergiy.Romanenko@kname.edu.ua

METHODOLOGY FOR SELECTING ALTERNATIVE ENERGY SOURCES IN THERMAL ENERGY RENOVATION OF BUILDINGS

S. Romanenko

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

Modern energy systems worldwide are facing the imperative of transitioning to sustainable energy supply models that do not contribute to the accumulation of carbon in the atmosphere or exacerbate the greenhouse effect, a factor now widely recognized as a key driver of global climate change. To ensure universal access to energy resources, improve environmental quality, and meet the growing energy demands of humanity, a comprehensive transformation of all elements of energy infrastructure is required. This transition does not have a singular or simple solution and demands a multidimensional approach. Reducing greenhouse gas emissions can be achieved through the integration of various energy sources and technological solutions that ensure high levels of efficiency and economic viability. The renewable energy sources and improvements in energy efficiency play a leading role in achieving climate neutrality. The reliable methods for comprehensive implementation, ensuring sustainable heat energy supply in buildings while providing comfortable conditions during the winter season is of key importance.

Energy-efficient modernization of heating systems in buildings, with an increased share of renewable energy sources for heat production, is of paramount importance for the reconstruction of Ukraine. The paper proposes an approach, based on a heating system model that evaluates the impact of each innovation through the integration of energy, environmental, and economic performance indicators. The mathematical model of the building heat consumption estimation based on energy audit, which determines the initial building condition is presented. Every possible renovation action, including the change of the heating source is evaluated, and energy, environmental, and economic performance indicators are defined, enabling to find the optimal solution based on the multi-objective optimisation. The proposed approach serves as a valuable tool for preliminary engineering calculations during the design phase.

The application of this model is demonstrated through a case study of an administrative building in Kharkiv. The evaluation of building thermal modernization and the installation of a heat pump was carried out based on environmental and economic performance indicators. The implementation of the recommended modernization measures in 2020, coupled with the analysis of measurements at the actual site, revealed a discrepancy of 15% between the predicted and measured heat consumption values. This finding supports the recommendation of the proposed method for enhancing heating systems in buildings.

Keywords: alternative energy sources, thermal modernization of buildings, heat pump, building heating systems.