

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕРІАЛИ У ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЇ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ В УМОВАХ КЛІМАТИЧНИХ ВИКЛИКІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У статті досліджено інноваційні технології та матеріали, що застосовуються у термомодернізації індивідуальних житлових будинків в умовах сучасних кліматичних викликів. Особливу увагу приділено теплоізоляційним системам нового покоління (аерогельним панелям, вакуумним ізоляційним плитам, PUR/PIR-утеплювачам, біо-базованим матеріалам), високоефективному склінняю, вентильованим фасадним конструкціям та інтеграції «розумних» інженерних систем. Окреслено вплив зміни клімату на тепловий режим будівель і необхідність одночасного зниження тепловтрат у зимовий період та захисту від перегріву влітку. Проаналізовано техніко-економічну ефективність заходів термомодернізації та їх внесок у підвищення енергетичної незалежності домогосподарств. Наведено порівняльні таблиці, теплотехнічні характеристики та узагальнені схеми модернізації житлових будинків. Результати підтверджують, що комплексна термомодернізація із застосуванням інноваційних матеріалів дозволяє скоротити енергоспоживання на 50–70 %, підвищити стійкість будівель до кліматичних навантажень та забезпечити комфортний мікроклімат упродовж року.

Ключові слова: термомодернізація, енергоефективність, теплоізоляція, інноваційні матеріали, аерогель, вакуумні панелі, біо-базовані утеплювачі, скління, вентильований фасад, кліматична стійкість, індивідуальний житловий будинок.

Abstract

The article examines innovative technologies and materials used in the thermal modernization of individual residential buildings under current climate challenges. Special emphasis is placed on next-generation insulation systems (aerogel panels, vacuum insulation panels, PUR/PIR materials, bio-based insulations), high-performance glazing, ventilated façade systems, and the integration of smart engineering solutions. The influence of climate change on a building's thermal performance is analyzed, highlighting the need to reduce heat losses during winter while preventing overheating in summer. The study evaluates the technical and economic efficiency of modernization measures and their contribution to enhancing household energy independence. Comparative tables, thermophysical characteristics, and generalized modernization schemes are presented. The results confirm that comprehensive modernization using innovative materials can reduce energy consumption by 50–70 %, improve climate resilience of buildings, and ensure comfortable indoor conditions throughout the year.

Keywords: thermal modernization, energy efficiency, insulation, innovative materials, aerogel, vacuum insulation panels, bio-based insulation, glazing, ventilated façade, climate resilience, residential building.

Вступ

Умови сучасних кліматичних змін, які проявляються у зростанні кількості аномальних морозів, теплових хвиль, тривалих періодів спеки, різких температурних коливань та зміні режиму опадів, суттєво впливають на режими експлуатації індивідуальних житлових будинків. У більшості приватного житлового фонду, зведеного до 2000-х років, теплозахисні якості огорожувальних конструкцій не відповідають сучасним вимогам енергоефективності та комфорту перебування людини в приміщенні [1]. Високі втрати тепла через стіни, покрівлю, вікна, містки холоду у вузлах сполучення конструкцій, недостатня повітронепроникність будівельних оболонок призводять до значного перевитрату паливно-енергетичних ресурсів, підвищеного рівня викидів CO₂ та зростання експлуатаційних витрат на опалення й охолодження будинків.

Термомодернізація індивідуальних житлових будинків є ключовим інструментом зниження енергоспоживання та адаптації до кліматичних викликів. Вона передбачає комплекс заходів, спрямованих на підвищення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій, оптимізацію систем опалення, вентиляції та кондиціонування, зменшення інфільтрації повітря, впровадження відновлюваних дже-

рел енергії та «розумних» систем керування [2]. Особливу увагу привертає використання інноваційних теплоізоляційних матеріалів (аерогелів, вакуумних ізоляційних панелей, фазозмінних матеріалів), високоефективного скління, вентилярованих фасадних систем, «тепліх» покрівель та фасадів із комбінованим озелененням.

В умовах поглиблення кліматичних змін термомодернізація вже не обмежується лише зменшенням тепловтрат у зимовий період. Зростає роль захисту від перегріву влітку, реалізації пасивних стратегій охолодження, контролю сонячних надходжень, забезпечення стійкого мікроклімату без надмірної залежності від активних систем кондиціонування [3]. Саме тому інноваційні технології та матеріали мають розглядатися комплексно: з позицій енергоефективності, кліматичної стійкості, екологічності, довговічності та економічної доцільності.

Метою цієї статті є аналіз інноваційних технологій і матеріалів, що використовуються у термомодернізації індивідуальних житлових будинків, оцінка їхнього потенціалу в умовах сучасних кліматичних викликів, порівняння техніко-економічної ефективності різних рішень та формування рекомендацій щодо раціонального вибору конструктивно-технологічних підходів [4–6].

Основна частина

Термомодернізація індивідуальних житлових будинків в умовах кліматичних викликів повинна ґрунтуватися на комплексному підході, який включає енергетичний аудит існуючої будівлі, моделювання теплових потоків, аналіз впливу метеорологічних факторів, вибір інноваційних матеріалів та технологій утеплення, а також оптимізацію інженерних систем життєзабезпечення [1; 2]. Ключовою конструктивною ланкою термомодернізації є огорожувальна оболонка будинку, до складу якої входять зовнішні стіни, покрівля, підлоги на ґрунті, віконні й дверні прорізи. У традиційних індивідуальних будинках, зведених із повнотілої цегли, шлакоблоків чи панельних елементів, опір теплопередачі стін часто у 2–3 рази нижчий за вимоги чинних норм щодо енергоефективності будівель [1]. У цьому контексті інноваційні технології термомодернізації спрямовані на формування багатошарових фасадних систем із високоефективними утеплювачами, застосуванням зовнішнього утеплення типу ETICS, вентилярованих фасадів, комбінованих систем з озеленими поверхнями, а також на використання нових класів матеріалів: аерогелів, вакуумних ізоляційних панелей (VIP), фазозмінних матеріалів (PCM), біо-базованих утеплювачів на основі целюлози, конопляного волокна, деревного волокна тощо [3; 5].

Важливо зазначити, що вибір тієї чи іншої системи має враховувати не лише нормативний коефіцієнт теплопередачі, а й параметри паропроникності, вологонакопичення, вогнестійкості, стійкості до біологічного ураження та ультрафіолетового випромінювання, а також можливість адаптації контуру будівлі до підвищених літніх температур. Застосування вентилярованих фасадів у поєднанні з мінераловатними чи комбінованими утеплювачами дозволяє організувати повітряний зазор, який сприяє видаленню вологи та частковому відведенню надлишкового тепла за рахунок повітряної конвекції, що особливо актуально в умовах літніх теплових хвиль [4]. Інноваційні облицювальні матеріали, зокрема світловідбивні та «холодні» покриття з високим коефіцієнтом відбиття сонячної радіації (high albedo coatings), сприяють зменшенню перегріву поверхні фасадів, а отже, і внутрішніх приміщень. Водночас інтеграція фазозмінних матеріалів у штукатурні шари чи гіпсокартонні облицювання дозволяє акумулювати надлишкове тепло в денний час і вивільняти його вночі, згладжуючи добові коливання температури та знижуючи пікові навантаження на системи охолодження [3]. Не менш важливою складовою термомодернізації є модернізація віконних систем. Заміна одинарних склопакетів на енергоефективні багатокамерні склопакети з низькоемісійним (low-e) покриттям, інертними газами в камерах, «теплими» дистанційними рамками, поєднання з зовнішніми сонцезахисними пристроями (маркізами, ролетами, жалюзі) забезпечує значне зниження тепловтрат узимку та контроль над сонячними надходженнями влітку [2; 5]. У поєднанні із зовнішніми чи внутрішніми системами сонцезахисту віконні конструкції стають активним елементом кліматичної адаптації будинку. Покрівля індивідуальних будинків також є критичним елементом у контексті термомодернізації, оскільки через неї може втрачатися до 20–30 % тепла.

Використання систем «теплої покрівлі», де утеплювач розміщується над плитою перекриття, застосування пароізоляційних шарів, вентилярованих покрівельних систем, а також влаштування «зелених» покрівель із рослинністю, яка виконує роль природного утеплювача та захищає від перегріву, є ефективною відповіддю на кліматичні виклики [4]. Додатково інтеграція сонячних фотомодулів

(BIPV – building integrated photovoltaics) у покрівельні конструкції дозволяє частково компенсувати енергоспоживання будинку, перетворюючи оболонку на активний енергогенеруючий елемент [6]. Для оцінки ефективності різних варіантів термомодернізації доцільно використовувати порівняльні таблиці, де враховуються параметри теплопровідності, товщини, вартості, екологічності та довговічності матеріалів (див. табл. 1, табл. 2). Окремо слід відзначити роль систем керованої вентиляції з рекуперацією тепла та вологи, які не лише скорочують енергетичні втрати, але й забезпечують стабільний мікроклімат, нормовану концентрацію CO₂ та комфортну вологість повітря. У поєднанні з герметизацією стиків, ущільненням вікон і дверей, застосуванням паро- й повітронепроникних мембран формуються будівлі із високим рівнем герметичності оболонки, що відповідає принципам пасивного будинку [6]. Водночас надмірна герметизація без відповідної вентиляції створює ризики погіршення якості повітря та зростання вологості, тому інноваційні рішення мають враховувати баланс між повітронепроникністю та потребою в повітрообміні.

З огляду на економічний аспект термомодернізації індивідуальних будинків, особливо в умовах обмежених фінансових можливостей домогосподарств, важливим є оптимальний добір заходів, які забезпечують найкоротший термін окупності. Для цього використовують прості та комбіновані показники ефективності: питомі тепловтрати до та після модернізації, скорочення витрат на паливо, термін окупності утеплення фасаду, даху, заміни вікон та впровадження «розумних» систем керування. Практика показує, що комплексна термомодернізація з використанням інноваційних матеріалів та технологій може зменшити енергоспоживання будинку на 50–70 %, що стає особливо важливим в умовах зростання тарифів і нестабільності енергоринку [2; 4]. У контексті кліматичних викликів слід також враховувати адаптаційний потенціал рішень: здатність оболонки будівлі протидіяти не лише холоду, а й перегріву, екстремальним зливам, сильним вітрам, граду тощо.

У цьому сенсі перспективними є комбіновані фасадні системи з озелененням (вертикальні сади), використання перфорованих екранів, регульованих ламельних систем, які забезпечують динамічний контроль сонячних надходжень. Узагальнення результатів термомодернізації, представлених у таблицях та на схемах, дає можливість сформулювати для власників індивідуальних будинків типові стратегії модернізації: від «базового» рівня (заміна вікон, часткове утеплення) до «просунутого» (пасивний рівень, BIPV, «розумний дім», використання фазозмінних матеріалів) [5; 6]. Таким чином, інноваційні технології та матеріали в термомодернізації індивідуальних житлових будинків мають розглядатися не як окремі елементи, а як взаємопов'язані компоненти єдиної системи, здатної забезпечити високу енергоефективність, комфорт та стійкість до сучасних і майбутніх кліматичних викликів.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика сучасних теплоізоляційних матеріалів для термомодернізації стін

Матеріал	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	Рекоменд. товщина для $R \approx 5$ м ² ·К/Вт, мм	Паропроникність	Орієнтовна вартість, грн/м ²	Особливості застосування
Мінеральна вата	0,034–0,040	160–200	Висока	Середня	Вентильовані фасади, ETICS
Пінополістирол (EPS)	0,036–0,040	160–200	Низька	Низька	Системи ETICS, цокольні зони
Екструдований XPS	0,028–0,032	140–180	Дуже низька	Вища за EPS	Цоколь, підлоги, інверсійні дахи
Пінополіуретан (PUR/PIR)	0,022–0,026	110–140	Низька	Висока	Покрівлі, складні вузли, труби
Аерогельні панелі	0,013–0,018	70–90	Середня	Дуже висока	Тонкі стіни, історичні фасади
Целюлозний утеплювач	0,037–0,040	160–200	Висока	Середня	Еко-рішення, каркасні конструкції

Дані таблиці 1 показують, що найбільш низькі значення теплопровідності мають аерогельні панелі та пінополіуретан (PUR/PIR), що дозволяє зменшити товщину утеплювача при досягненні необхідно-

го опору теплопередачі. Проте їхня висока вартість обмежує використання переважно вузловими рішеннями або в об'єктах з підвищеними вимогами до енергоефективності та обмеженою товщиною огорожувальних конструкцій [3]. Мінеральна вата й целюлозні утеплювачі мають більшу товщину, але забезпечують високу паропроникність і екологічність, що є важливим для довгострокової експлуатації та формування «дихаючих» огорожувальних конструкцій [5]. EPS та XPS демонструють баланс між вартістю та ефективністю, однак потребують ретельного конструкторського опрацювання для запобігання запарюванню конструкцій.

Таблиця 2 – Орієнтовна економічна ефективність окремих заходів термомодернізації індивідуального будинку

Захід	Зменшення тепловтрат, %	Орієнтовні капітальні витрати, грн	Скорочення витрат на енергію, %	Орієнтовний термін окупності, років
Утеплення фасаду ($R \approx 5 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$)	25–35	2000–2500/м ²	20–30	5–8
Утеплення покрівлі	15–20	1500–2000/м ²	10–15	4–7
Заміна вікон на енергоефективні	10–15	6000–8000/м ² отвору	8–12	7–10
Встановлення рекуператора	10–20	40 000–70 000	10–18	6–9
Інтеграція BIPV (дах, фасад)	15–25 (компенсація)	80 000–150 000	20–30	8–12

Таблиця 2 ілюструє, що найбільш швидкоокупними заходами є утеплення покрівлі й фасадів, які дають істотне скорочення тепловтрат при відносно помірних інвестиціях [2; 4]. Заміна вікон та встановлення рекупераційних систем потребує більших початкових витрат, проте суттєво покращує якість мікроклімату та зменшує втрати через інфільтрацію і вентиляцію. Інтеграція BIPV має найдовший термін окупності, однак забезпечує додатковий енергетичний ефект та підвищує енергетичну автономність будинку, що важливо в умовах енергетичних і кліматичних ризиків [6].

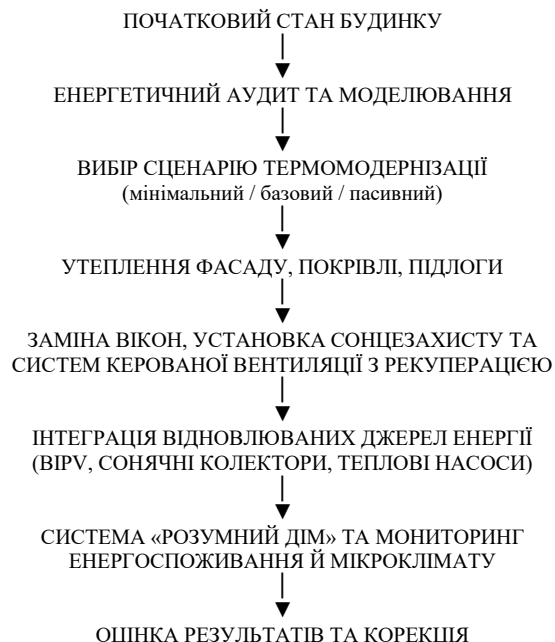


Рис. 1. Узагальнена схема термомодернізації індивідуального житлового будинку

Схема на рисунку 1 узагальнює логіку термомодернізації індивідуального будинку як поетапного процесу: від вихідного діагностичного етапу до впровадження «розумних» систем керування. Такий підхід дозволяє уникнути хаотичних, несистемних рішень, мінімізувати ризики технічних помилок (наприклад, запаровування конструкцій чи надмірної герметизації без вентиляції) та забезпечити максимальний ефект від інвестицій у модернізацію [3; 6]. Послідовність кроків підкреслює необхідність інтеграції інноваційних матеріалів, інженерних рішень та цифрових технологій моніторингу в єдину систему.

Висновки

Інноваційні технології та матеріали у термомодернізації індивідуальних житлових будинків є визначальним фактором підвищення енергоефективності, комфорту та стійкості до кліматичних викликів. Проведений аналіз показав, що застосування високоефективних теплоізоляційних матеріалів (аерогелі, PUR/PIR, XPS, целюлозні утеплювачі), сучасних фасадних систем (ETICS, вентиляовані фасади, «зелені» рішення), енергоефективного скління та систем керованої вентиляції з рекуперацією дозволяє суттєво знизити тепловтрати, стабілізувати мікроклімат та зменшити вплив екстремальних температур на житлове середовище [1–5].

Табличні та графічні матеріали підтверджують, що найбільший енергетичний ефект досягається за рахунок комплексної термомодернізації огорожувальних конструкцій у поєднанні з модернізацією інженерних систем і впровадженням відновлюваних джерел енергії. Умови кліматичних змін, зокрема зростання інтенсивності теплових хвиль та аномальних погодних явищ, зумовлюють необхідність переходу від суто «зимового» підходу до утеплення до всебічної адаптації будинків до цілорічних навантажень, включно із захистом від перегріву, контролем сонячних надходжень, організацією пасивного охолодження.

Перспективи розвитку термомодернізації індивідуальних будинків пов'язані з подальшою інтеграцією інноваційних матеріалів (фазозмінних, біо-базованих, гібридних), розвитком BIPV-рішень, широким впровадженням систем моніторингу та «розумного» керування, а також із формуванням державних і місцевих програм підтримки енергоефективних заходів для домогосподарств [4–6]. Раціональне поєднання технічних, економічних та екологічних аспектів термомодернізації дозволить суттєво знизити навантаження на енергетичну систему, підвищити рівень енергетичної безпеки та покращити якість життя населення в умовах кліматичних викликів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція будівель. – Київ : Мінрегіон України, 2021. – 78 с.
2. ДБН В.2.6-33:2018. Конструкції зовнішніх стін із утеплювачем. – Київ : Мінрегіон України, 2018. – 28 с.
3. ДСТУ ISO 52016-1:2020. Енергетичні характеристики будівель. Розрахунок потреби в енергії для опалення та охолодження. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. – 74 с.
4. Стеценко В. М. Термомодернізація житлових будинків : монографія. – Львів : ЛНТУ, 2021. – 212 с.
5. Кравчук І. С. Сучасні теплоізоляційні матеріали та системи фасадної термомодернізації : навч. посіб. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 180 с.
6. Пархоменко О. П., Яковенко Л. В. Пасивний дім в українських кліматичних умовах : проєктні рішення. – Київ : КНУБА, 2019. – 196 с.

Сінчук Богдан Васильович – студент 2-го курсу магістратури, група 1Б-24м, Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, kalashVE@gmail.com

Джеджула В'ячеслав Васильович – д.т.н., професор кафедри будівництва міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету, e-mail: djedjula@vntu.edu.ua

Sinchuk Bohdan – 2nd year master's student, group 1B-24m, Faculty of Civil Engineering, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, kalashVE@gmail.com

Shvets Vitaliy – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Urban Construction and Architecture of Vinnytsia National Technical University, e-mail: djedjula@vntu.edu.ua