

І.Ю. Білоус<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-6640-103X  
В.І. Дешко<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8218-3933  
О.М. Шевченко<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ст. викл., ORCID 0000-0001-9304-5432  
Н.А. Буяк<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ст. викл., ORCID 0000-0003-0597-6945  
А.В. Гавриш<sup>1</sup>, аспірант, ORCID 0009-0000-1728-1169  
<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОЛОГІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОЛОНКИ ІСТОРИЧНОЇ БУДІВЛІ В УМОВАХ ВНУТРІШНЬОГО УТЕПЛЕННЯ

*Мета дослідження полягає в обґрунтуванні підходів до вибору та застосування утеплювальних матеріалів для внутрішньої термомодернізації історичних будівель на основі комплексної теплотехнічної та гігротермічної оцінки огорожувальних конструкцій з урахуванням вимог енергоефективності та збереження стабільного тепловологісного режиму масивних мінеральних стін.*

*Методика дослідження ґрунтується на застосуванні методів будівельної фізики та нормативного теплотехнічного і тепловологісного розрахунку внутрішнього утеплених огорожувальних конструкцій відповідно до чинної нормативної бази. Розрахунковий аналіз виконано для варіантів внутрішнього утеплення із застосуванням мінеральної вати, конопляного утеплювача та піноскла з урахуванням кліматичних параметрів експлуатації та теплофізичних характеристик матеріалів.*

*Результати дослідження. Встановлено вплив внутрішнього утеплення на тепловий і тепловологісний режим масивних мінеральних стін історичних будівель. Показано, що за порівнюваних значень опору теплопередачі огорожувальної конструкції різні утеплювальні матеріали демонструють принципово відмінну гігротермічну поведінку. Зокрема, застосування матеріалів з обмеженою здатністю до регульованого вологообміну супроводжується сезонним накопиченням вологи та формуванням нерівноважного тепловологісного режиму.*

*Висновки. Обґрунтовано доцільність комплексного підходу до внутрішньої термомодернізації історичних будівель, який передбачає поєднання теплотехнічної оцінки з обов'язковим гігротермічним аналізом сумісності утеплювального матеріалу та існуючої огорожувальної конструкції як необхідної умови забезпечення довготривалої експлуатаційної надійності та збереження матеріальної автентичності історичних будівель.*

**Ключові слова:** енергоефективність будівель, внутрішнє утеплення, гігротермічний режим огорожувальних конструкцій, гігротермічний аналіз, теплоізоляційні матеріали, збереження архітектурної спадщини.

**Вступ.** Проблематика утеплення історичних будівель набуває особливої наукової та практичної актуальності в умовах зростання енергетичних витрат, посилення вимог до енергоефективності будівельного фонду та необхідності збереження об'єктів культурної спадщини. Історичні будівлі проєктувалися за відсутності регламентованих нормативних вимог до теплозахисту, що зумовило істотну невідповідність їхніх огорожувальних конструкцій сучасним теплотехнічним нормативам. Унаслідок цього експлуатація таких об'єктів супроводжується підвищеними тепловтратами, дискомфорними мікрокліматичними умовами та зростанням витрат на опалення, що створює довгострокові економічні й екологічні ризики.

Водночас застосування стандартних технологій утеплення, розроблених для сучасного будівництва, у випадку історичних будівель часто є неприйнятним через загрозу втрати автентичних архітектурних елементів, порушення паро- та вологиного режимів стін, активізацію процесів конденсації та біологічного ураження матеріалів. Це формує складну міждисциплінарну проблему, що поєднує завдання будівельної фізики, реставрації, матеріалознавства та охорони культурної спадщини. Наукове обґрунтування рішень з утеплення історичних будівель потребує врахування не лише теплотехнічної ефективності, але й довготривалої сумісності нових матеріалів з традиційними конструкціями, їх впливу на збереження історичної та архітектурної цілісності об'єктів.

Зв'язок досліджуваної проблеми з важливими науковими та практичними завданнями визначається необхідністю розроблення адаптованих методів термомодернізації, які забезпечують баланс між енергозбереженням і збереженням культурної цінності будівель. У практичній площині це пов'язано з формуванням науково обґрунтованих рекомендацій для проєктування та реалізації заходів з утеплення історичних будівель у процесах їх реставрації, реконструкції та пристосування до сучасного використання. У науковому вимірі проблема інтегрується у ширший контекст досліджень сталого розвитку,

енергоефективності забудованого середовища та збереження історико-архітектурної спадщини, що надає їй міжгалузевого характеру та визначає перспективність подальших досліджень у цьому напрямі.

Історичний будівельний фонд України характеризується значним розмаїттям конструктивних рішень, зокрема варіативністю товщини масивних цегляних огорожувальних конструкцій, яка може складати 510 мм, 640 мм, 770 мм і більше залежно від періоду зведення та призначення об'єкта. Водночас для значної частини будівель кінця XIX – початку XX століття типовими є зовнішні стіни, виконані кладкою у дві цеглини (510 мм).

Огляд сучасних досліджень з питань утеплення історичних будівель засвідчує поступовий перехід від загальних концепцій енергоефективної модернізації до поглибленого аналізу матеріалів, екологічних наслідків та кліматично-експлуатаційних чинників, що визначають можливості термомодернізації об'єктів культурної спадщини. У працях авторів [1] розглянуто проблематику впровадження принципів будівель з близьким до нульового споживанням енергії у сучасних і історичних будівлях, де доведено, що вимоги збереження автентичних фасадів і конструктивних елементів істотно обмежують застосування зовнішнього утеплення та зумовлюють необхідність внутрішніх теплоізоляційних рішень із контролем тепловологісного режиму. Комплексний аналіз енергетичної ефективності, екологічного впливу та вартості різних утеплювальних матеріалів здійснено у дослідженні Д. Діксона (D. Dickson) і С. Павія (S. Pavía), де наголошується на доцільності системного підходу до їх вибору для існуючих і реконструйованих будівель [2]. Узагальнення сучасних тенденцій розвитку інноваційних утеплювальних матеріалів, виконане Б. Ерзеном (B. Erzen) та співавторами, підкреслює перспективність нових теплоізоляційних рішень, але водночас вказує на обмеженість їх прямого застосування в історичній забудові без адаптації до вимог паропроникності та конструктивної сумісності [3]. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку адаптованих концепцій термомодернізації історичних будівель, що поєднують сучасні енергоефективні вимоги із принципами охорони культурної спадщини.

Вагомий масив досліджень присвячено експериментальному аналізу теплофізичних і вологісних властивостей утеплювальних матеріалів, насамперед природного походження. Зокрема, у роботах П. Косінського (P. Kosiński) та співавторів досліджено змочувальні та вологісні характеристики конопляного волокна, целюлози й мінеральної вати, що дозволило довести кращу здатність природних волокнистих матеріалів до регулювання вологи, критично важливу для старих мурованих конструкцій [4]. Порівняльний аналіз будівель без утеплення і з використанням природних теплоізоляційних матеріалів, виконаний С. Хасаном (S. Hasan) та співавторами, демонструє суттєве зниження тепловтрат без порушення вологісної рівноваги огорожувальних конструкцій [5]. Теплоізоляційні властивості біомасових матеріалів проаналізовано у працях К. Е. Мазура (K. E. Mazur) та співавторів, де підкреслюється їхня конструктивна сумісність із традиційними будівельними матеріалами та потенціал застосування в існуючих будівлях [6]. Експериментальне обґрунтування ефективності конопляної вовни як утеплювача для стін і покрівель наведено у дослідженнях М. Длімі (M. Dlimi) та співавторів, що є релевантним для практики реконструкції та адаптивного повторного використання історичних будівель [7]. Подальші дослідження у цьому контексті мають бути доповнені довготривалими натурними спостереженнями тепловологісної поведінки природних утеплювачів у реальних умовах експлуатації пам'яток архітектури.

Окремий блок досліджень зосереджений на оцінюванні енергетичних, економічних та екологічних наслідків утеплення з використанням підходів аналізу життєвого циклу та багатокритеріальної оцінки. На прикладі шведського кейсу М. Гульт (M. Hult) і С. Карлсма (S. Karlsma) доводять, що утеплення конопляним волокном характеризується нижчим екологічним навантаженням і конкурентними витратами упродовж життєвого циклу будівлі порівняно з традиційними утеплювачами [8]. Багатокритеріальний підхід до оцінювання сталості «зелених» утеплювальних матеріалів застосовано у працях Д. Стреймікене (D. Streimikiene) та співавторів, де наголошується на необхідності одночасного врахування енергетичних, екологічних і соціальних критеріїв при виборі рішень для будівель [9]. Порівняння традиційних та високотехнологічних утеплювачів, зокрема аерогелю і мінеральної вати, виконано Х. М. Данаджі (H. M. Danaci) і Н. Акіном (N. Akin), які вказують на обмеження їх застосування у реконструкції історичних будівель через високу вартість і специфічні експлуатаційні вимоги [10]. Подальші дослідження доцільно спрямувати на адаптацію методів аналізу життєвого циклу саме до умов термомодернізації об'єктів культурної спадщини.

Значна увага в сучасних працях приділяється впливу кліматичних і експлуатаційних чинників на ефективність утеплення огорожувальних конструкцій. Зокрема, у дослідженнях П. Косінського (P. Kosiński) та співавторів проаналізовано тепловтрати, спричинені тимчасовим впливом вітру у стінах з волокнистими утеплювачами, що є типовою проблемою для будівель старої забудови з нещільними конструкціями [11]. Особливості вибору утеплювальних матеріалів у різних кліматичних зонах узагальнено у роботах Ю. Донга (Y. Dong) та співавторів, де підкреслюється необхідність кліматично адаптованих рішень для існуючих і історичних будівель [12]. Аналіз динамічних теплоізоляційних технологій, виконаний Т. Каранафті (T. Karanafti) та співавторами, відзначає їх потенціал для підвищення енергоефективності будівель за умов змінних температурних і вологісних навантажень [13]. Подальші

дослідження варто спрямувати на розробку кліматично орієнтованих моделей внутрішнього утеплення історичних будівель із урахуванням вітрових, температурних та вологісних впливів.

Незважаючи на значний обсяг досліджень у сфері енергоефективної термомодернізації будівель, проблематика внутрішнього утеплення історичних об'єктів залишається недостатньо вирішеною. Більшість наявних робіт орієнтована на досягнення нормативних показників теплозахисту без урахування гіротермічної сумісності сучасних утеплювальних матеріалів із традиційними мінеральними стінами. Недостатньо вивченими залишаються процеси довготривалого вологонакопичення, сезонної компенсації конденсації та впливу внутрішнього мікроклімату на експлуатаційну надійність огорожувальних конструкцій. Відсутність спеціалізованих критеріїв оцінювання внутрішнього утеплення історичних будівель у чинній нормативній базі обмежує можливості науково обгрунтованого вибору інженерних рішень.

Запропоноване дослідження заповнює виявлені прогалини шляхом комплексного аналізу конструктивних особливостей історичних будівель у поєднанні з теплотехнічними та тепловологісними розрахунками для різних утеплювальних матеріалів за однакових кліматичних умов. Проведена порівняльна оцінка гіротермічної поведінки утеплювачів дозволяє обгрунтувати інженерні рішення з позицій експлуатаційної надійності та збереження історичної структури будівель, розширюючи наукові уявлення про ефективність внутрішньої термомодернізації історичних будівель.

**Метою статті** є порівняльний аналіз впливу конопляного утеплювача та мінеральної вати на теплотехнічні показники та гіротермічний режим внутрішньо утеплених стін історичної будівлі. Для досягнення поставленої мети в статті передбачається розв'язання таких завдань:

1. Проаналізувати конструктивні та історико-архітектурні особливості історичних будівель як чинники, що визначають можливості внутрішнього утеплення.

2. Виконати теплотехнічні й тепловологісні розрахунки огорожувальних конструкцій для різних варіантів внутрішнього утеплення та порівняти їх за показниками теплозахисту й гіротермічної надійності.

3. Виявити науково-практичні проблеми внутрішньої термомодернізації історичних будівель та обгрунтувати рекомендації щодо вибору утеплювальних матеріалів з урахуванням вимог енергоефективності та збереження архітектурної спадщини.

**Матеріал і результати досліджень.** Історичні будівлі як об'єкти дослідження у сфері енергоефективності характеризуються специфічними конструктивними та експлуатаційними особливостями, що формувалися в умовах відсутності регламентованих вимог до теплозахисту. Для такого будівельного фонду типовими є огорожувальні конструкції з цегли або каменю, виконані на мінеральних розчинах, які за класифікацією ДСТУ 9191:2022 [14] відповідають категоріям «важкі» або «дуже важкі» (за тепловою інерцією), забезпечують значну теплоємність і згладжування температурних коливань, проте характеризуються недостатніми значеннями приведенного опору теплопередачі відносно чинних нормативних вимог. Експлуатація історичних будівель у сучасних умовах, зокрема при використанні їх для громадських, адміністративних або житлових функцій, передбачає підтримання належних умов внутрішнього мікроклімату в період перебування користувачів, що визначає актуальність заходів з підвищення теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій.

Особливістю історичних будівель є поєднання матеріалів із різними теплофізичними властивостями, зокрема високою паропроникністю та капілярною активністю мінеральних основ, що формує специфічний тепловологісний режим стін. У попередніх наукових дослідженнях показано, що для коректного аналізу енергоефективності таких об'єктів доцільно застосовувати розрахункові методи, засновані на сучасних засадах будівельної фізики. При цьому використовуються теплофізичні характеристики матеріалів, визначені для реальних умов експлуатації, та кліматичні параметри, що відповідають географічному регіону розташування об'єкта. Саме такий підхід забезпечує перехід від формального дотримання стандартів до обгрунтованого інженерного оцінювання (табл. 1).

У межах даного дослідження такий підхід реалізується через розрахунки опору теплопередачі огорожувальних конструкцій та аналіз їхнього тепловологісного стану. Оцінювання проводиться з урахуванням нормативних методик теплотехнічного аналізу та вимог щодо гіротермічної надійності внутрішньо утеплених стін. Такий аналіз дозволяє перевірити відповідність конструкції критеріям енергоефективності та підтвердити відсутність ризиків критичного накопичення вологи в зоні контакту утеплювача з історичною кладкою.

У сучасній практиці термомодернізації історичних будівель наведені конструктивні та експлуатаційні особливості враховуються шляхом поєднання методів будівельної фізики та адаптованих інженерних рішень. Важкі цегляні й кам'яні стіни, завдяки високій теплоємності, здатні акумулювати теплову енергію та згладжувати добові коливання зовнішньої температури, що на практиці проявляється у більш стабільному мікрокліматі приміщень порівняно з легкими сучасними конструкціями. Разом з тим відсутність теплоізоляційних шарів зумовлює значні питомі тепловтрати, які можуть бути кількісно

оцінені шляхом визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій з урахуванням товщини шарів та їх теплофізичних характеристик.

Таблиця 1. Конструктивні, експлуатаційні та історико-архітектурні чинники, що визначають специфіку внутрішнього утеплення історичних будівель

Характеристика	Узагальнений опис	Значення для вибору внутрішнього утеплення
Статус об'єкта культурної спадщини	Охорона історичного фасаду та архітектурного вигляду	Унеможливорює або суттєво обмежує застосування зовнішнього утеплення
Тип огорожувальних конструкцій	Цегляні або кам'яні огорожувальні конструкції, що за ДСТУ 9190:2022 належать до категорій «важкі» та «дуже важкі»	Зумовлюють високу теплову інерцію та чутливість до зміни гіротермічного режиму при внутрішньому утепленні
Відсутність теплоізоляційного шару	Первинна конструкція стін без теплоізоляції	Формує низькі значення приведенного опору теплопередачі за чинними нормативами
Неможливість зміни зовнішнього вигляду	Заборона втручання у фасадні рішення	Внутрішнє утеплення розглядається як єдино допустимий варіант термомодернізації
Функціональне призначення	Громадські будівлі	Вимоги до теплового комфорту та збереження автентичності будівлі

З урахуванням зазначеного подальший аналіз ґрунтується на нормативних розрахунках опору теплопередачі та перевірці умов відсутності міжшарової конденсації водяної пари в товщі огорожувальних конструкцій для різних варіантів внутрішнього утеплення. Застосування таких підходів у практиці реконструкції дозволяє не лише формально оцінити рівень теплозахисту огорожувальних конструкцій, але й коректно порівнювати різні інженерні рішення з урахуванням специфіки історичних матеріалів.

У процесі проектування внутрішньої теплоізоляції історичних будівель розрахункові моделі дають змогу оцінити зміну температурного профілю в товщі стіни, вплив товщини та теплоємності утеплювального шару на теплову інерцію, а також очікуваний ефект від зменшення тепловтрат упродовж опалювального періоду. Такий підхід широко застосовується у сучасних проєктах реновації історичної забудови, оскільки він забезпечує науково обґрунтовану основу для прийняття інженерних рішень і створює передумови для подальшого аналізу сумісності теплоізоляційних матеріалів із традиційними огорожувальними конструкціями в реальних умовах експлуатації [9].

Виконання теплотехнічних і тепловологічних розрахунків огорожувальних конструкцій при внутрішньому утепленні історичних будівель є необхідним етапом наукового обґрунтування ефективності та коректності інженерних рішень. Такі розрахунки спрямовані не лише на визначення приведенного опору теплопередачі конструкції після утеплення, а й на оцінювання зміни температурно-вологісного режиму в товщі стіни протягом опалювального періоду.

У дослідженні розглянуто декілька конструктивних сценаріїв огорожувальних конструкцій, зокрема варіант без утеплення та варіанти внутрішнього утеплення з використанням різних теплоізоляційних матеріалів. Один із підходів передбачає застосування волокнистого конопляного утеплювача, змонтованого з внутрішнього боку стіни без улаштування суцільного паробар'єрного шару, з метою збереження дифузійної відкритості системи та забезпечення регульованого вологообміну між утеплювачем і мінеральною кладкою. У межах даного дослідження під конопляним утеплювачем розуміється теплоізоляційний матеріал на основі конопляної костри (подрібненого стебла технічних конопель) з використанням вапняного в'язучого, що формується у вигляді пористого композиту природного походження. За технологією виробника матеріал складається з костри технічних конопель, спеціалізованого вапняного в'язучого «5 Елемент» та води, без додавання синтетичних смол або полімерних зв'язуючих. Така структура забезпечує поєднання низької теплопровідності з високою відкритою пористістю та дифузійною проникністю для водяної пари, що є принципово важливим для внутрішнього утеплення масивних мінеральних стін історичних будівель. Вапняне в'язуче виконує не лише конструктивну, але й регулюючу функцію, сприяючи капілярному транспорту та тимчасовому акумулюванню вологи з подальшим її виведенням у сприятливих кліматичних умовах. Опис складу та принципів формування матеріалу прийнято за даними виробника та галузевих технічних джерел [15]. Інший підхід базується на використанні мінеральної вати як теплоізоляційного матеріалу, що

є типовим інженерним рішенням внутрішнього утеплення огорожувальних конструкцій у сучасній практиці реконструкції. Мінеральна вата являє собою волокнистий неорганічний матеріал, отриманий шляхом розплавлення мінеральної сировини з формуванням хаотично орієнтованої волокнистої структури, що забезпечує низьку теплопровідність і відносно високу повітропроникність. Водночас матеріал характеризується обмеженою капілярною активністю та низькою вологемністю, що зумовлює його чутливість до умов зволоження та необхідність контролю дифузії водяної пари при застосуванні в системах внутрішнього утеплення масивних мінеральних стін. За умов внутрішнього утеплення історичних будівель це потребує особливої уваги до формування температурно-вологісного режиму в зоні контакту утеплювача з кладкою з метою запобігання накопиченню вологи в товщі огорожувальної конструкції. Третій підхід передбачає використання плитного піноскла. Це жорсткий неорганічний теплоізоляційний матеріал із замкненою комірчастою структурою, що характеризується абсолютною паро- та водонепроникністю, високою міцністю на стиск та стабільністю геометричних розмірів. Завдяки своїй структурі піноскло виконує функцію не лише утеплювача, а й пароізоляційного бар'єру, що унеможливує проникнення водяної пари з приміщення в товщу конструкції.

У межах цього завдання розрахунки виконано з використанням фізичних характеристик матеріалів, визначених для умов експлуатації відповідно до вимог чинних ДСТУ, та розрахункових кліматичних параметрів типового року згідно з ДБН «Будівельна кліматологія». Для визначення теплотехнічних і паропроникних параметрів матеріалів, зокрема конопляного утеплювача, використано положення та табличні дані ДСТУ 9191:2022, що забезпечує коректність вихідних характеристик і їх відповідність національним стандартам [14]. Кліматичні параметри для розрахунків приймалися відповідно до регіону розташування будівель на основі даних типового року, що відповідають вимогам чинної нормативної бази ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [16].

У межах дослідження розглянуто декілька конструктивних сценаріїв огорожувальних конструкцій, що відрізняються наявністю та типом внутрішнього утеплення. Базовим сценарієм для порівняльного аналізу є зовнішня стіна без теплоізоляційного шару, яка відповідає первинному конструктивному рішенням історичної будівлі. Для розрахунків обрано цегляну кладку товщиною 510 мм (у дві цеглини). Її обрано як найбільш тонку стіну, що дозволяє розглянути найгірший експлуатаційний сценарій із найнижчим початковим опором теплопередачі. Такий підхід дозволяє виконати порівняльний аналіз тепловологісних режимів у найбільш жорстких умовах, формуючи надійну розрахункову базу для оцінювання інженерних рішень із внутрішнього утеплення, результати якої можуть бути екстрапольовані на масивніші історичні конструкції.

Окрім цього, проаналізовано три принципово відмінні схеми внутрішнього утеплення огорожувальних конструкцій. Перша схема передбачає застосування волокнистого конопляного утеплювача, змонтованого з внутрішнього боку стіни без улаштування суцільного паробар'єрного шару, з метою збереження дифузійної відкритості системи та забезпечення регульованого вологообміну між утеплювачем і мінеральною кладкою. Друга схема базується на використанні мінеральної вати як теплоізоляційного матеріалу, що відповідає поширеним інженерним рішенням внутрішнього утеплення і передбачає контроль дифузії водяної пари в товщу огорожувальної конструкції без застосування суцільного паробар'єрного шару в розрахунковій моделі. Третя схема базується на використанні піноскла, яке монтується на цементно-піщаний розчин. Особливістю цієї схеми є відсутність потреби в додатковому паробар'єрі, оскільки сам матеріал утеплювача має високий опір дифузії водяної пари.

Конструктивні відмінності зазначених сценаріїв та послідовність шарів огорожувальної конструкції наведено на рисунку 1.

Розрахунки виконано із використанням фізичних характеристик матеріалів, визначених для умов експлуатації відповідно до вимог чинних ДСТУ, та розрахункових кліматичних параметрів типового року згідно з ДБН «Будівельна кліматологія». Теплотехнічні та тепловологісні розрахунки огорожувальних конструкцій здійснювалися з використанням онлайн-платформи CADE.E. PRO [17], призначеної для нормативного аналізу теплоізоляційних властивостей будівельних огорожень та оцінювання їх гіротермічного режиму.

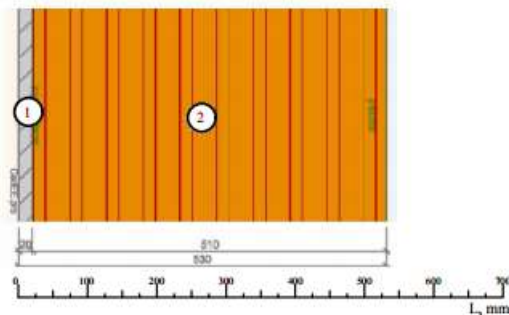
Для визначення теплотехнічних і паропроникних параметрів теплоізоляційних матеріалів, зокрема конопляного утеплювача, використано положення та табличні дані ДСТУ 9191:2022, що забезпечує коректність вихідних характеристик і їх відповідність національним стандартам [14]. Кліматичні параметри для розрахунків приймалися відповідно до регіону розташування будівлі на основі даних типового року згідно з додатком А ДБН В.2.6-31:2021 [18]. Усі розрахункові дані та графічні результати наведено для найхолоднішого місяця - січня, що відповідає умовам максимального ризику конденсації водяної пари в товщі огорожувальних конструкцій.

Опір теплопередачі огорожувальної конструкції визначали згідно з нормативною методикою, встановленою ДСТУ 9191:2022, за співвідношенням [14]:

$$R = \frac{1}{h_{si}} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_{se}} \quad (1)$$

де  $h_{si}$  та  $h_{se}$  - коефіцієнти тепловіддачі внутрішньої та зовнішньої поверхонь, відповідно, Вт/(м · К).  
 $d_i$  - товщина і-го шару конструкції, м.

$\lambda_i$  - теплопровідність матеріалу і-го шару конструкції за розрахункових умов експлуатації (розрахункова теплопровідність), Вт/(м · К).

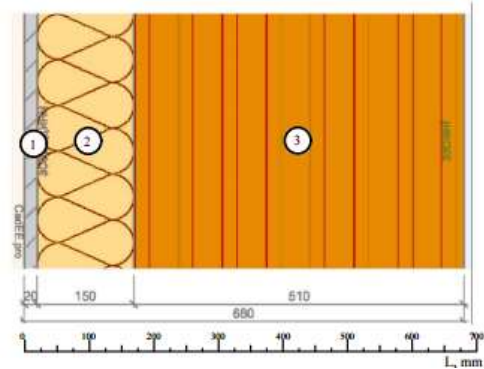


Продовження схеми 1

Схема 1 – стіна без утеплення

Шар №1 Розчин цементно-піщаний товщиною 0,020 м.,  $\lambda$ -0,93 Вт/(м\*К).

Шар №2 Кладка з цегли керамічної повнотілої звичайної на ц/п розчині з густиною 1800 кг/м<sup>3</sup> та товщиною 0,510 м.,  $\lambda$ -0,81 Вт/(м\*К)



Продовження схеми 2

Схема 2 – утеплення мінеральною ватою

Шар №1 Розчин цементно-піщаний товщиною 0,020 м.,  $\lambda$ -0,93 Вт/(м\*К).

Шар №2 Мінеральна вата з густиною 150 кг/м<sup>3</sup> та товщиною 0,150 м.,  $\lambda$ -0,05 Вт/(м\*К).

Шар №2 Кладка з цегли керамічної повнотілої звичайної на ц/п розчині з густиною 1800 кг/м<sup>3</sup> та товщиною 0,510 м.,  $\lambda$ -0,81 Вт/(м\*К)

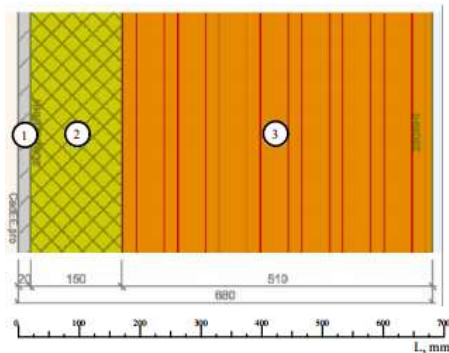


Схема 3 – конопляний утеплювач

Шар №1 Розчин цементно-піщаний та товщиною 0,020 м.,  $\lambda$ -0,93 Вт/(м\*К).

Шар №2 конопляним утеплювач з густиною 200 кг/м<sup>3</sup> та товщиною 0,150 м.,  $\lambda$ -0,048 Вт/(м\*К).

Шар №3 Кладка з цегли керамічної повнотілої звичайної на ц/п розчині з густиною 1800 кг/м<sup>3</sup> та товщиною 0,510 м.,  $\lambda$ -0,81 Вт/(м\*К)

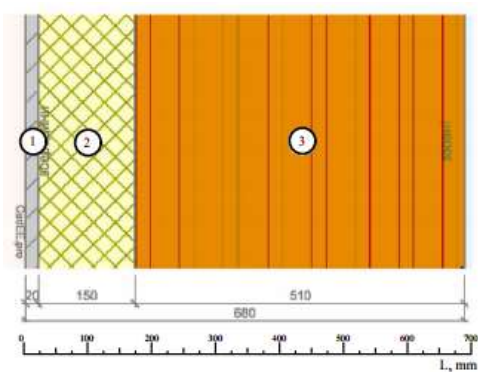


Схема 4 – піноскло

Шар №1 Розчин цементно-піщаний та товщиною 0,020 м.,  $\lambda$ -0,93 Вт/(м\*К).

Шар №2 піноскло з густиною 120 кг/м<sup>3</sup> та товщиною 0,150 м.,  $\lambda$ -0,054 Вт/(м\*К).

Шар №3 Кладка з цегли керамічної повнотілої звичайної на ц/п розчині з густиною 1800 кг/м<sup>3</sup> та товщиною 0,510 м.,  $\lambda$ -0,81 Вт/(м\*К).

Рисунок 1 – Розрахункові схеми внутрішнього утеплення стін історичної будівлі

Отримані значення опору теплопередачі порівнювали з мінімально допустимими нормативними значеннями відповідно до вимог ДБН В.2.6-31:2021 [18] за умовою:

$$R \geq R_{q, \min} \quad (2)$$

$R_{q, \min}$  - мінімально допустиме значення приведенного опору теплопередачі непрозорої огорожувальної конструкції чи непрозорої частини огорожувальної конструкції,  $m^2 \cdot K/Вт$ .

Оцінювання гіротермічного режиму огорожувальних конструкцій для чотирьох розрахункових сценаріїв (стіна без утеплення, внутрішнє утеплення мінеральною ватою, внутрішнє утеплення конопляним утеплювачем та внутрішнє утеплення піносклом) здійснювали на основі аналізу розподілу температури та парціального тиску водяної пари за товщиною конструкції відповідно до методики ДСТУ ДСТУ Б В.2.6-192:2013 [19]:

$$e = 0,01 \cdot \varphi \cdot E \quad (3)$$

де  $\varphi$  - відносна вологість повітря, %.

$E$  - тиск насиченої водяної пари при відповідній температурі, Па.

Міжшарову конденсацію водяної пари у товщі огорожувальної конструкції вважали відсутньою за виконання нерівності:

$$e \leq E \quad (4)$$

$E$  - парціальний тиск насиченої водяної пари згідно з ДСТУ Б В.2.6-192:2013 [18]

Розрахункова процедура передбачала поетапне визначення приведенного опору теплопередачі огорожувальної конструкції, побудову температурних і парціальних профілів водяної пари, а також оцінювання можливого сезонного вологонакопичення в утеплювальному шарі та річного балансу вологи. Для уніфікації та відтворюваності результатів розрахунку виконано із застосуванням спеціалізованої онлайн-платформи CAD E.E. PRO [17], яка реалізує алгоритми, узгоджені з вимогами чинних ДСТУ [14] та ДБН [18]. Розподіл температури та парціальних тисків водяної пари за товщиною огорожувальної конструкції для розрахункового періоду наведено на рисунку 2 та 3.

Результати теплотехнічних і тепловологісних розрахунків для двох варіантів внутрішнього утеплення огорожувальної конструкції наведено в таблиці 2. Розрахунки виконано за однакових геометричних, матеріальних і кліматичних умов, що забезпечує коректність порівняльного аналізу досліджуваних рішень.

Таблиця 2. Результати теплотехнічних і тепловологісних розрахунків огорожувальної конструкції при внутрішньому утепленні

Показник	Мінеральна вата	Конопляний утеплювач	Піноскло	Нормативно-допустимий критерій
Товщина утеплювального шару, мм	150	150	150	Задається проектом
Умови експлуатації утеплювача	A	A	A	Відповідно до ДСТУ 9190, ДСТУ 9191
Коефіцієнт теплопровідності утеплювача $\lambda$ , Вт/(м·К)	0,050	0,048*	0,054	Для умов експлуатації A
Коефіцієнт паропроникності $\delta$ , мг/(м·год·Па)	0,38	0,35	0,35	Довідкове значення
Опір теплопередачі огорожувальної конструкції після утеплення $R$ , $m^2 \cdot K/Вт$	3,80	3,92	3,58	Порівнюється з $R_{q, \min}$ за ДБН
Максимальне сезонне вологонакопичення в утеплювальному шарі, % мас.	4,67	2,94	0	Допускається за умови відсутності річного накопичення (ДСТУ EN ISO 13788)
Наявність річного залишкового вологонакопичення	Так	Ні	Ні	Не допускається

\* — за даними виробника / галузевих технічних джерел.

Дані таблиці 2 відображають порівняльні результати теплотехнічної та гіротермічної оцінки трьох варіантів внутрішнього утеплення. Отримані значення приведенного опору теплопередачі свідчать про суттєве зменшення тепловтрат порівняно з неутепленою стіною, однак залишаються близькими до мінімально допустимих нормативних рівнів, що є типовим для рішень внутрішнього утеплення історичних будівель.

Відмінності у величинах сезонного вологонакопичення зумовлені різною паропроникністю теплоізоляційних матеріалів і характером дифузійного вологообміну в системі “утеплювач – мінеральна кладка”, що безпосередньо впливає на формування річного балансу вологи в товщі огорожувальної конструкції.

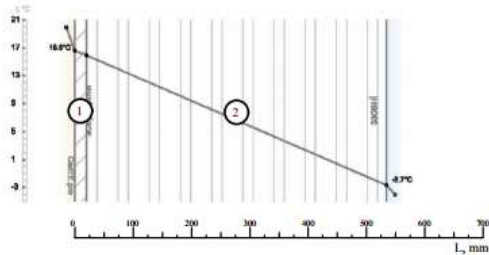


Схема 1 – Розподіл температур у товщині огорожжувальної конструкції - Стіна без утеплення (січень).

Шар №1 Розчин цементно-піщаний товщиною 0,020 м.,  $\lambda=0,93$  Вт/(м\*К).

Шар №2 Кладка з цегли керамічної повнотілої звичайної на ц/п розчині з густиною 1800 кг/м<sup>3</sup> та товщиною 0,510 м.,  $\lambda=0,81$  Вт/(м\*К).

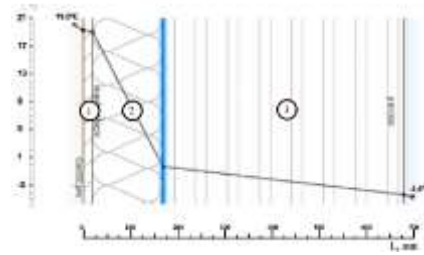


Схема 2 – Розподіл температур у товщині огорожжувальної конструкції при утепленні мінеральною ватою (січень).

Шар №1 Розчин цементно-піщаний товщиною 0,020 м.,  $\lambda=0,93$  Вт/(м\*К)..

Шар №2 Мінеральна вата з густиною 150 кг/м<sup>3</sup> та товщиною 0,150 м.,  $\lambda=0,05$  Вт/(м\*К)..

Шар №2 Кладка з цегли керамічної повнотілої звичайної на ц/п розчині з густиною 1800 кг/м<sup>3</sup> та товщиною 0,510 м.,  $\lambda=0,81$  Вт/(м\*К).

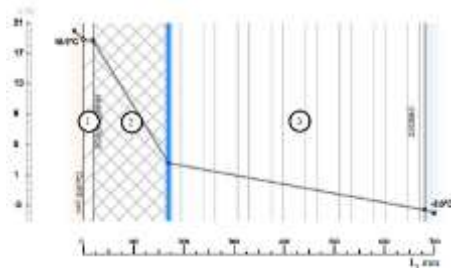


Схема 3 – Розподіл температур у товщині огорожжувальної конструкції з конопляним утеплювачем (січень).

Шар №1 Розчин цементно-піщаний та товщиною 0,020 м.,  $\lambda=0,93$  Вт/(м\*К)..

Шар №2 конопляним утеплювач з густиною 200 кг/м<sup>3</sup> та товщиною 0,150 м.,  $\lambda=0,048$  Вт/(м\*К).

Шар №3 Кладка з цегли керамічної повнотілої звичайної на ц/п розчині з густиною 1800 кг/м<sup>3</sup> та товщиною 0,510 м.,  $\lambda=0,81$  Вт/(м\*К).

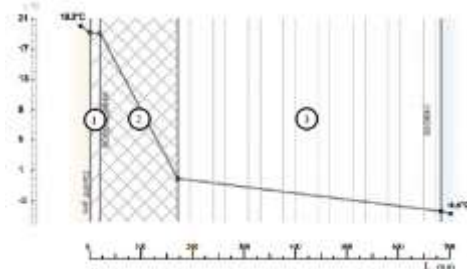


Схема 4 – Розподіл температур у товщині огорожжувальної конструкції з піносклом (січень).

Шар №1 Розчин цементно-піщаний та товщиною 0,020 м.,  $\lambda=0,93$  Вт/(м\*К)..

Шар №2 піноскло з густиною 120 кг/м<sup>3</sup> та товщиною 0,150 м.  $\lambda=0,054$  Вт/(м\*К).

Шар №3 Кладка з цегли керамічної повнотілої звичайної на ц/п розчині з густиною 1800 кг/м<sup>3</sup> та товщиною 0,510 м.,  $\lambda=0,81$  Вт/(м\*К).

Рисунок 2 – Розподіл температури по товщині огорожжувальної конструкції при внутрішньому утепненні

Наведені результати отримано для зовнішньої огорожжувальної конструкції історичної будівлі з цегляною кладкою товщиною 500 мм, виконаною на цементно-піщаному розчині, з урахуванням внутрішнього вирівнювального шару цементно-піщаного розчину товщиною 20 мм, що відповідає типовим конструктивним рішенням забудови кінця XIX – початку XX століття.

Приведений опір теплопередачі неутепленої стіни становив близько  $R \approx 0,9-1,1$  м<sup>2</sup>·К/Вт, що зумовлює значні тепловтрати в опалювальний період. Влаштування внутрішнього теплоізоляційного шару

товщиною 150 мм у всіх розглянутих варіантах забезпечує істотне підвищення опору теплопередачі огорожувальної конструкції, однак не гарантує повної відповідності мінімальним нормативним вимогам, що є характерною особливістю внутрішнього утеплення історичних будівель.

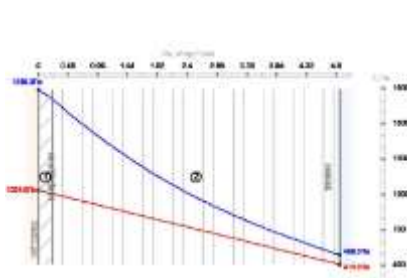


Схема 1 – Розподіл парціальних тисків у товщині огорожувальної конструкції - Стіна без утеплення (січень)

Шар №1 Розчин цементно-піщаний товщиною 0,020 м.,  $\lambda=0,93$  Вт/(м\*К)..

Шар №2 Кладка з цегли керамічної повнотілої звичайної на ц/п розчині з густиною 1800 кг/м<sup>3</sup> та товщиною 0,510 м.,  $\lambda=0,81$  Вт/(м\*К).

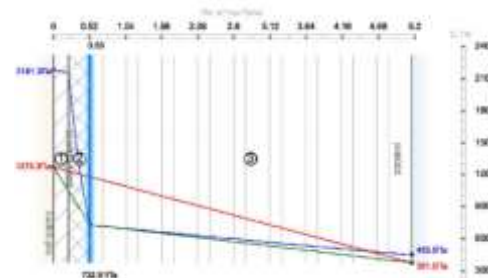


Схема 2 – Розподіл парціальних тисків у товщині огорожувальної конструкції при утепненні мінеральною ватою (січень).

Шар №1 Розчин цементно-піщаний товщиною 0,020 м.,  $\lambda=0,93$  Вт/(м\*К).

Шар №2 Мінеральна вата з густиною 150 кг/м<sup>3</sup> та товщиною 0,150 м.,  $\lambda=0,05$  Вт/(м\*К).

Шар №3 Кладка з цегли керамічної повнотілої звичайної на ц/п розчині з густиною 1800 кг/м<sup>3</sup> та товщиною 0,510 м.,  $\lambda=0,81$  Вт/(м\*К).

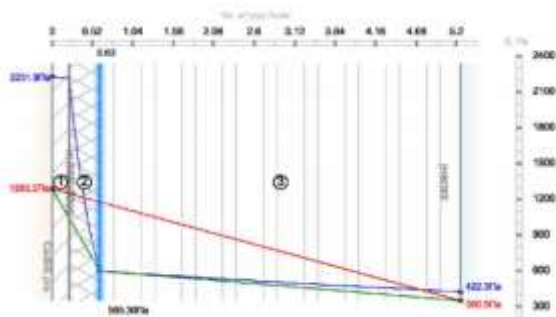


Схема 3 – Розподіл парціальних тисків у товщині огорожувальної конструкції з конопляним утеплювачем (січень).

Шар №1 Розчин цементно-піщаний та товщиною 0,020 м.,  $\lambda=0,93$  Вт/(м\*К)..

Шар №2 конопляним утеплювач з густиною 200 кг/м<sup>3</sup> та товщиною 0,150 м.  $\lambda=0,048$  Вт/(м\*К)

Шар №3 Кладка з цегли керамічної повнотілої звичайної на ц/п розчині з густиною 1800 кг/м<sup>3</sup> товщиною 0,510 м.,  $\lambda=0,81$  Вт/(м\*К).

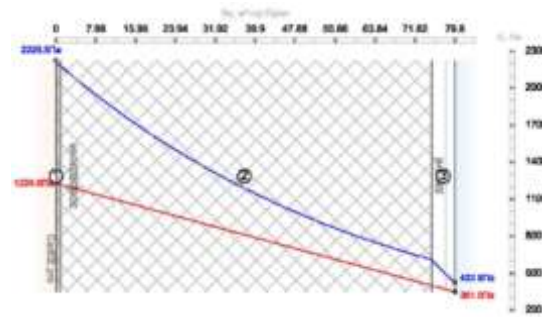


Схема 4 – Розподіл температур у товщині огорожувальної конструкції з піносклом (січень).

Шар №1 Розчин цементно-піщаний та товщиною 0,020 м.,  $\lambda=0,93$  Вт/(м\*К)..

Шар №2 піноскло з густиною 120 кг/м<sup>3</sup> та товщиною 0,150 м.,  $\lambda=0,054$  Вт/(м\*К).

Шар №3 Кладка з цегли керамічної повнотілої звичайної на ц/п розчині з густиною 1800 кг/м<sup>3</sup> товщиною 0,510 м.,  $\lambda=0,81$  Вт/(м\*К).

Рисунок 3 – Розподіл парціальних тисків по товщині огорожувальної конструкції при внутрішньому утепненні.

На графіку синя - графік розподілу парціального тиску насиченої водою пари (E), червона - допоміжна лінія для оцінки наявності конденсації пари (e), зелена - допоміжна лінія для оцінки кількості вологи що надходить/випаровується з конструкції.

Оцінювання гіротермічної надійності огорожувальної конструкції виконувалося на основі аналізу сезонного вологонакопичення в утеплювальному шарі та річного балансу вологи. Динаміку сезонного вологонакопичення для двох варіантів внутрішнього утеплення наведено на рисунку 4.

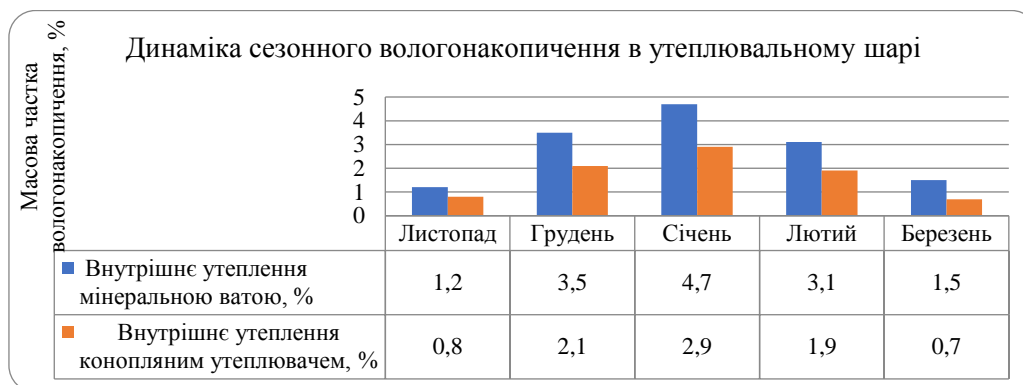


Рисунок 4 – Динаміка сезонного вологонакопичення в утеплювальному шарі огорожувальної конструкції для двох варіантів внутрішнього утеплення.

Для системи внутрішнього утеплення з мінеральною ватою встановлено формування річного залишкового вологонакопичення, що свідчить про нерівноважний характер вологообміну та підвищений ризик деградації теплоізоляційного шару і прилеглої мінеральної кладки в умовах тривалої експлуатації. Натомість система з конопляним утеплювачем характеризується нижчими значеннями максимального сезонного вологонакопичення та відсутністю річного накопичення вологи, що вказує на більш збалансований гіротермічний режим огорожувальної конструкції. Для системи внутрішнього утеплення з використанням піноскла розрахунки показали повну відсутність зони конденсації в товщі конструкції (лінії парціального тиску пари та тиску насичення не перетинаються). Це пояснюється високим опором паропроникненню самого матеріалу, який ефективно блокує дифузію вологи з приміщення в холодну зону стіни. Відсутність вологонакопичення (0 %) свідчить про високу експлуатаційну надійність такого рішення для історичних будівель, де ризик замокання старої кладки є критичним.

Теплофізичні та паропроникні характеристики конопляного утеплювача для розрахунків приймалися з урахуванням чинних нормативних підходів до визначення властивостей теплоізоляційних матеріалів, а також уточнювалися за даними виробників і галузевих технічних джерел, що є типовою практикою при аналізі сучасних біосумісних матеріалів у наукових дослідженнях.

Порівняльна оцінка результатів теплотехнічних і гіротермічних розрахунків виконана відповідно до методики тепловологісного аналізу огорожувальних конструкцій, описаної в розділі «Матеріали і методи досліджень», із використанням показників, отриманих у ході чисельного аналізу внутрішнього утеплення історичних будівель. Аналіз зосереджено на інтерпретації інженерного змісту отриманих результатів, зокрема з точки зору теплозахисних властивостей, характеру паро- та вологообміну і формування річного балансу вологи в конструкції.

Такий підхід дає змогу обґрунтовано оцінити придатність теплоізоляційних матеріалів для застосування в історичних будівлях, де визначальним є поєднання підвищення опору теплопередачі з забезпеченням стабільного та збалансованого гіротермічного режиму огорожувальних елементів.

Узагальнені результати порівняльної оцінки внутрішнього утеплення за теплотехнічними та тепловологісними критеріями наведено в узагальнювальній таблиці 3.

Узагальнені критерії оцінювання сформовано на основі результатів теплотехнічних і гіротермічних розрахунків, а також аналізу температурно-вологісних профілів огорожувальної конструкції. Якісні показники сумісності утеплювальних матеріалів з мінеральною кладкою відображають характер річного балансу вологи та здатність конструкції до висихання в теплий період року, що є визначальним для оцінювання експлуатаційної надійності внутрішнього утеплення.

Існуюча цегляна кладка історичних будівель належить до важких мінеральних огорожувальних конструкцій і характеризується відносно високою паропроникністю та капілярною активністю, що забезпечує її здатність до сезонного вологообміну та природного висихання. Умови внутрішнього утеплення істотно змінюють температурно-вологісний режим такої стіни, зсуваючи зону можливого утворення конденсату в бік внутрішніх шарів конструкції, тому гіротермічна сумісність утеплювача з мінеральною кладкою є визначальним чинником експлуатаційної надійності.

Результати розрахунків свідчать, що обидва варіанти внутрішнього утеплення забезпечують близький рівень підвищення теплозахисних властивостей огорожувальної конструкції. З позицій теплозахисту різниця між варіантами є незначною і не може розглядатися як визначальний критерій вибору утеплювального матеріалу для історичних будівель.

Таблиця 3. Порівняльна оцінка результатів внутрішнього утеплення за теплотехнічними та тепловологісними критеріями

Критерій оцінювання	Мінеральна вата	Конопляний утеплювач	Піноскло
Приведений опір теплопередачі огорожувальної конструкції після утеплення, R, м <sup>2</sup> ·К/Вт	3,80	3,92	3,58
Максимальне сезонне вологонакопичення в утеплювальному шарі за опалювальний період, % мас.	4,67	2,94	0,00
Річний баланс вологи в утеплювальному шарі	Виявлено залишкове накопичення	Залишкове накопичення не виявлено	Накопичення відсутнє
Узгодженість з паропроникними властивостями мінеральної кладки	Обмежена, потребує контролю вологообміну	Сприятлива	Специфічна (пароізолююча)
Інженерна доцільність застосування для внутрішнього утеплення історичних будівель (за критерієм гіротермічної надійності)	Обмежена: Існує високий ризик накопичення вологи. Рішення потребує обов'язкових додаткових заходів: облаштування пароізоляції або примусової вентиляції.	Обґрунтована: Матеріал підтримує стабільний річний баланс вологи. Це мінімізує загрозу зволоження та руйнування історичної мінеральної кладки.	Висока: В конструкції повністю відсутні зони конденсації. Це забезпечує максимальну надійність та довговічність огорожувальних конструкцій.

Водночас аналіз тепло-вологісних режимів виявляє принципові відмінності в роботі систем внутрішнього утеплення. Для системи з мінеральною ватою характерне формування негативного річного балансу вологи, що проявляється у накопиченні вологи в холодний період без її повної компенсації в теплий період року. Така поведінка створює передумови для поступового зростання вологовмісту утеплювального шару при повторенні річних циклів експлуатації, що може призводити до погіршення теплоізоляційних властивостей матеріалу та несприятливого впливу на суміжні шари мінеральної кладки.

Для системи з конопляним утеплювачем характерні нижчі значення сезонного вологонакопичення та відсутність залишкового накопичення вологи за підсумком річного циклу. Це свідчить про здатність огорожувальної конструкції до висихання в межах експлуатаційного циклу та формування більш збалансованого тепловологісного режиму.

Характер зміни вологонакопичення в утеплювальному шарі протягом опалювального періоду для обох варіантів внутрішнього утеплення подано на рисунку 3, що дозволяє наочно оцінити відмінності у динаміці процесів зволоження та висихання матеріалів.

У нормативному сенсі допустимість внутрішнього утеплення визначається не абсолютною величиною сезонного вологонакопичення, а відсутністю залишкового накопичення вологи за підсумком річного циклу. З цієї позиції застосування конопляного утеплювача забезпечує більш стабільний тепловологісний режим огорожувальної конструкції та вищу гіротермічну надійність порівняно з традиційними рішеннями внутрішнього утеплення.

Таким чином, порівняльна оцінка підтверджує, що за умов внутрішнього утеплення історичних будівель вибір утеплювального матеріалу має ґрунтуватися на комплексному аналізі теплотехнічних і тепловологісних показників, а не лише на досягненні підвищеного рівня теплозахисту, що дозволяє забезпечити інженерну доцільність і довготривалу експлуатаційну стабільність прийнятих рішень.

Внутрішнє утеплення історичних будівель, незважаючи на його потенціал щодо зниження тепловтрат, супроводжується комплексом науково-практичних проблем, зумовлених принциповою відмінністю фізичної поведінки сучасних теплоізоляційних матеріалів і традиційних мінеральних огорожувальних конструкцій. Відповідно до результатів виконаних теплотехнічних і гіротермічних розрахунків встановлено, що ключовою проблемою є порушення сформованого впродовж тривалого періоду гіротермічного балансу масивних стін, які в неутепленому стані функціонують як інерційні системи з природним сезонним вологообміном.

Улаштування внутрішнього теплоізоляційного шару змінює температурний градієнт у товщі стіни та зміщує зони потенційного утворення конденсату водяної пари в бік контакту утеплювача з мінеральною кладкою, що створює передумови для накопичення вологи в критичних зонах конструкції. Такий ефект узгоджується з результатами попередніх досліджень і підтверджується виконаними розрахунками [10].

Особливої актуальності набуває проблема невідповідності паропроникності сучасних утеплювачів властивостям традиційних матеріалів стін. Порівняльний аналіз розрахункових даних показує, що навіть

за близьких значень коефіцієнтів теплопровідності різні теплоізоляційні матеріали демонструють принципово відмінні тепло-вологісні характеристики, яка визначає їхню реальну експлуатаційну придатність. У випадках, коли утеплювальний матеріал не забезпечує ефективний дифузійний вологообмін із мінеральною кладкою, формується сезонне вологонакопичення, яке не компенсується процесами висихання в теплий період року. Це створює передумови для поступового зростання вологовмісту як утеплювача, так і прилеглих шарів стіни, що супроводжується зниженням теплозахисних властивостей та зміною фізико-механічних характеристик матеріалів.

Додатковою науково-практичною проблемою, є обмежена прогнозованість довготривалої роботи внутрішнього утеплення в умовах змінного мікроклімату приміщень, характерного для історичних будівель. Коливання внутрішньої температури та вологості, зумовлені режимами опалення, вентиляції та фактичного використання приміщень, посилюють нерівноважність тепловологісних процесів у конструкціях. У поєднанні з обмеженими можливостями зовнішнього висихання стін це підвищує ризик латентних пошкоджень, які не проявляються на початкових етапах експлуатації, але мають кумулятивний характер і можуть призводити до поступової деградації історичних матеріалів кладки [13].

У подальших дослідженнях планується проведення комплексу довготривалих експериментальних вимірювань градієнта температури (*grad T*) за товщиною та висотою стіни з внутрішнім утепленням на основі конопляно-вапняного утеплювача. Це дасть змогу здійснювати моніторинг теплофізичних характеристик історичної конструкції з урахуванням впливу коливань внутрішньої температури та вологості, зумовлених режимами опалення, вентиляції та фактичного використання приміщень.

Суттєвою проблемою залишається також відсутність у чинній нормативній базі спеціалізованих критеріїв оцінювання внутрішнього утеплення саме для історичних будівель. Результати виконаних розрахунків свідчать, що застосування загальних нормативних вимог, орієнтованих на сучасні огорожувальні конструкції, не враховує інерційність масивних стін, їх капілярну активність і обмежені можливості регенерації вологи. Унаслідок цього інженерні рішення, які формально відповідають нормативам за показником опору теплопередачі, можуть виявлятися неприйнятними з позицій довготривалої збереженості історичних огорожувальних конструкцій.

Таким чином, на основі отриманих теплотехнічних і гіротермічних результатів встановлено, що основні проблеми внутрішнього утеплення історичних будівель мають системний характер і пов'язані з поєднанням теплотехнічних, гіротермічних і матеріалознавчих чинників. Ігнорування хоча б одного з цих аспектів призводить до формування рішень, які забезпечують короткостроковий енергетичний ефект, але створюють підвищені ризики для експлуатаційної надійності та збереження історичних огорожувальних конструкцій у довготривалій перспективі.

Рекомендації щодо внутрішньої термомодернізації історичних будівель мають ґрунтуватися на поєднанні вимог енергоефективності та збереження фізичної цілісності й матеріальної автентичності огорожувальних конструкцій. Вибір утеплювального матеріалу доцільно здійснювати з урахуванням не лише його теплопровідності, але й гіротермічної сумісності з традиційними мінеральними матеріалами стін.

При проектуванні внутрішнього утеплення рекомендовано застосовувати розрахункові методи, що дозволяють оцінювати опір теплопередачі огорожувальної конструкції після утеплення та річний баланс вологи в її товщі з урахуванням нормативно визначених кліматичних параметрів і умов експлуатації. Критерієм допустимості внутрішнього утеплення слід вважати відсутність річного залишкового вологонакопичення, а не лише досягнення нормативних значень теплозахисту.

Внутрішнє утеплення доцільно розглядати як цілісну систему, у межах якої утеплювальний матеріал, основна стіна та внутрішнє повітря приміщення взаємодіють у межах єдиного тепловологісного режиму. У цьому контексті рекомендованим є використання матеріалів із достатньою паропроникністю та вологоємністю, здатних забезпечувати сезонне акумулювання й подальше виведення вологи без формування зон критичного її накопичення в товщі конструкції.

З позицій охорони архітектурної спадщини внутрішнє утеплення слід виконувати з дотриманням принципів мінімальної інвазивності та оборотності інженерних рішень. Рекомендовано застосовувати теплоізоляційні системи, які не потребують жорсткого пароізоляційного відсікання мінеральної кладки від внутрішнього середовища та не порушують її здатності до природного висихання. Демонтаж або заміна утеплювального шару мають бути можливими без пошкодження історичної стіни та зміни її фізико-механічних і тепловологісних властивостей.

Таким чином, результати теплотехнічного та гіротермічного аналізу внутрішнього утеплення історичних будівель дозволяють розглядати вибір теплоізоляційного матеріалу не лише з позицій досягнення нормативного рівня теплозахисту, але й у ширшому інженерному контексті довготривалої експлуатації огорожувальної конструкції. Гіротермічна сумісність утеплювального матеріалу з мінеральною кладкою безпосередньо впливає на стабільність конструкції впродовж життєвого циклу, а отже - на тривалість її ефективного функціонування без потреби передчасних ремонтних втручань.

У цьому зв'язку застосування теплоізоляційних матеріалів на основі органічної сировини, які поєднують паропроникність, вологоємність і здатність до регульованого вологообміну, може розглядатися як інженерно та екологічно обґрунтоване рішення, оскільки довготривала стабільність тепловологісного режиму конструкції корелює зі зменшенням сумарних ресурсних і матеріальних витрат протягом експлуатації. Крім того, біогенне походження таких матеріалів та карбонізаційні процеси вапняного в'язучого створюють передумови для формування сприятливого вуглецевого балансу теплоізоляційної системи, що набуває особливої актуальності в контексті сучасних вимог декарбонізації будівельного фонду.

Порівняльний аналіз демонструє два ефективні, але принципово різні підходи до внутрішнього утеплення. Конопляний утеплювач працює за принципом "дифузійно відкритої" системи, регулюючи вологість завдяки природним властивостям волокон. Натомість піноскло реалізує стратегію "абсолютного бар'єру", повністю відсікаючи вологу від конструкції. Обидва варіанти, на відміну від мінеральної вати без належної пароізоляції, забезпечують відсутність річного накопичення вологи, проте піноскло гарантує найвищий рівень захисту від зволоження навіть в умовах підвищеної вологості приміщень.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження встановлено, що внутрішня термомодернізація історичних будівель є інженерно складною задачею, ефективність якої визначається не лише підвищенням рівня теплосахисту, а насамперед здатністю огорожувальних конструкцій зберігати стабільний тепловологісний режим у межах річного циклу експлуатації. Показано, що важкі мінеральні стіни історичних будівель функціонують як інерційні системи з природним сезонним вологообміном, тоді як улаштування внутрішнього утеплення істотно змінює умови теплопередачі та дифузії водяної пари в товщі конструкції.

На основі теплотехнічних і тепло-вологісних розрахунків доведено, що утеплювальні матеріали з близькими значеннями коефіцієнта теплопровідності можуть демонструвати принципово відмінні тепло-вологісні характеристики, що підтверджує недостатність оцінювання внутрішнього утеплення виключно за показником опору теплопередачі. Застосування матеріалів із обмеженою здатністю до регульованого вологообміну супроводжується сезонним накопиченням вологи та формуванням нерівноважного тепловологісного режиму, що знижує прогнозованість довготривалої експлуатації систем внутрішнього утеплення.

Водночас встановлено, що використання утеплювальних матеріалів із достатньою паропроникністю та вологоємністю забезпечує формування більш збалансованого тепло-вологісного режиму огорожувальної конструкції та відсутність річного залишкового вологонакопичення, що підвищує експлуатаційну надійність таких рішень. У цьому контексті застосування теплоізоляційних матеріалів на основі органічної сировини є перспективним не лише з інженерних, але й з екологічних позицій, оскільки поєднує тепло-вологісну сумісність з потенціалом зменшення вуглецевого навантаження теплоізоляційної системи протягом її життєвого циклу.

Обґрунтовано доцільність комплексного підходу до внутрішньої термомодернізації історичних будівель, який поєднує теплотехнічний аналіз із обов'язковою оцінкою тепло-вологісної сумісності утеплювального матеріалу та існуючої огорожувальної конструкції. Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням методик тепло-вологісного аналізу з урахуванням інерційних властивостей масивних стін, розвитком нормативної бази для історичних будівель і залученням даних довготривалого моніторингу реальних об'єктів. Водночас встановлено, що використання утеплювальних матеріалів із достатньою паропроникністю (конопля) або ж матеріалів із закритою комірчастою структурою (піноскло) забезпечує відсутність річного залишкового вологонакопичення. Зокрема, піноскло демонструє повну відсутність конденсації, що робить його технічно безпечним рішенням для внутрішнього утеплення, хоча і з дещо нижчим термічним опором порівняно з волокнистими аналогами аналогічної товщини. Як логічне продовження цього напрямку, у подальших дослідженнях планується проведення комплексу довготривалих експериментальних вимірювань температури по товщині та висоті стіни з внутрішнім утепленням на основі конопляно-вапняного утеплювача. Це дасть змогу здійснювати моніторинг теплофізичних характеристик історичної конструкції з урахуванням впливу коливань внутрішньої температури та вологості, зумовлених режимами опалення, вентиляції та фактичного використання приміщень.

#### **Список використаної літератури**

1. Білоус І. Ю., Гетманчук Г. О., Крамаренко С. О., Гавриш А. В. Будівлі з близьким до нульового споживанням енергії в сучасних та історичних будівлях: виклики та рішення. *Refrigeration Engineering & Technology*. 2025. Вип. 61, № 2. DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v61i2.3173>.
2. Dickson T., Pavia S. Energy performance, environmental impact and cost of a range of insulation materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 140. Article 110752. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110752>.
3. Erzen B., Karataş M., Orhan R., Aydoğmuş E. Innovative Insulation Materials: A Comprehensive Review of Current Trends, Challenges, and Future Directions in Sustainable Building Technologies. *Polymer-*

*Plastics Technology and Materials*. 2025. Vol. 64, № 10. P. 1538–1561. DOI: <https://doi.org/10.1080/25740881.2025.2472378>.

4. Kosiński P., Brzyski P., Duliasz B. Moisture and wetting properties of thermal insulation materials based on hemp fiber, cellulose and mineral wool in a loose state. *Journal of Natural Fibers*. 2020. Vol. 17, № 2. P. 199–213. DOI: <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1477086>.

5. Hasan S., Khan S., Akhtar I., Kirmani S. Study of natural insulation materials and compared it with no insulation building. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 46. P. 10692–10697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.452>.

6. Mazur K. E., Wardal W. J., Barwicki J., Tseyko M. Thermal insulation of agricultural buildings using different biomass materials. *Energies*. 2025. Vol. 18, № 3. Article 636. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18030636>.

7. Dlimi M., Agounoun R., Kadiri I., Sbai K., Rahmani A. Effect of the integration of hemp wool as an insulation material for the construction of the roof and external walls of a typical Moroccan building. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 783, № 1. Article 012013. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/783/1/012013>.

8. Hult M., Karlsmo S. Life cycle environmental and cost analysis of building insulated with hemp fibre compared to alternative conventional insulations – a Swedish case study. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*. 2022. Vol. 30, № 1. P. 106–120. DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.sace.30.1.30357>.

9. Streimikiene D., Skulskis V., Balezentis T., Agnusdei G. P. Uncertain multi-criteria sustainability assessment of green building insulation materials. *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 219. Article 110021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110021>.

10. Danaci H. M., Akin N. Thermal insulation materials in architecture: A comparative test study with aerogel and rock wool. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29, № 48. P. 72979–72990. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20927-2>.

11. Kosiński P., Brzyski P., Suchorab Z., Łagód G. Heat losses caused by the temporary influence of wind in timber frame walls insulated with fibrous materials. *Materials*. 2020. Vol. 13, № 23. Article 5514. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13235514>.

12. Dong Y., Kong J., Mousavi S., Rismanchi B., Yap P. S. Wall insulation materials in different climate zones: A review on challenges and opportunities of available alternatives. *Thermo*. 2023. Vol. 3, № 1. P. 38–65. DOI: <https://doi.org/10.3390/thermo3010003>.

13. Karanafti A., Theodosiou T., Tsikaloudaki K. Assessment of buildings' dynamic thermal insulation technologies: A review. *Applied Energy*. 2022. Vol. 326. Article 119985. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119985>.

14. ДСТУ 9191:2022. Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. *Budstandart Online: вебсайт*. 2022. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=98996](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98996) (дата звернення: 17.12.2025).

15. Hempire. Конопляний утеплювач «5 Елемент»: склад та принцип формування матеріалу. *Hempire: вебсайт*. URL: <https://www.hempire.com.ua/products/5-element/> (дата звернення: 17.12.2025).

16. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. *Budstandart Online: вебсайт*. 2010. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=26655](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=26655) (дата звернення: 17.12.2025).

17. CAD E.E. PRO – онлайн-платформа для теплотехнічних і тепловологісних розрахунків огорожувальних конструкцій. *Cadee pro: вебсайт*. 2024. URL: <https://cadee.pro/> (дата звернення: 17.12.2025).

18. ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель». *Dream Dim: вебсайт*. 2022. URL: [https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2022/08/DBN-V\\_2\\_6-31-2021.pdf](https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2022/08/DBN-V_2_6-31-2021.pdf) DREAMDIM | Yuriy Brukaylo (дата звернення: 17.12.2025).

19. ДСТУ Б В.2.6-192:2013. Настанова з розрахункової оцінки тепловологісного стану огорожувальних конструкцій. *Budstandart Online: вебсайт*. 2013. URL: <https://teplovizor-plus.lviv.ua/wp-content/uploads/2019/11/dstu-v-2-6-192.pdf> (дата звернення: 03.02.2026).

I. Bilous<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-6640-103X

V. Deshko<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-8218-3933

O. Shevchenko<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), senior teacher, ORCID 0000-0001-9304-5432

N. Buyak<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), senior teacher, ORCID 0000-0003-0597-6945

A. Gavrysh<sup>1</sup>, Ph. D. student, ORCID 0009-0000-1728-1169

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## RESEARCH ON THERMAL INSULATION ISSUES OF HISTORIC BUILDINGS

*The relevance of this study is driven by increasing energy efficiency requirements for the existing building stock alongside the necessity to preserve historic and architectural heritage. Historic buildings are typically characterized by massive masonry envelopes with high thermal inertia and moisture buffering capacity, which limits the applicability of conventional insulation solutions developed for modern lightweight constructions. Consequently, internal wall insulation of historic buildings requires scientifically substantiated approaches based on comprehensive thermal and hygrothermal assessment of envelope performance and material compatibility.*

*Objective. The objective of this study is to substantiate approaches to the selection and application of insulation materials for internal insulation of historic masonry walls based on a combined thermal and hygrothermal analysis, with particular emphasis on energy efficiency and long-term hygrothermal stability of the building envelope.*

*Methods. The study is based on methods of building physics, normative thermal resistance calculation, and hygrothermal analysis of building envelopes in accordance with the current regulatory framework. Comparative thermal and moisture calculations were performed for internal insulation systems using mineral wool, hemp-based insulation, and cellular foam glass under identical climatic and operating conditions. Material properties were adopted in accordance with national standards, and specialized engineering software was used to ensure consistency and reproducibility of the calculation results.*

*Results. The influence of internal insulation on the thermal and hygrothermal behavior of massive masonry walls typical of historic buildings was analyzed. The results show that insulation materials with comparable thermal resistance values may exhibit fundamentally different hygrothermal performance. Insulation systems with limited moisture-regulating capacity were found to be associated with seasonal moisture accumulation and the formation of an unbalanced annual moisture regime, whereas bio-based insulation materials demonstrated lower moisture accumulation and a more balanced hygrothermal behavior of the envelope. Furthermore, the application of cellular foam glass demonstrated a complete absence of interstitial condensation and zero seasonal moisture accumulation due to its closed-cell structure and high vapor diffusion resistance.*

*Conclusions. The findings indicate that the effectiveness of internal insulation in historic buildings is determined not only by thermal resistance but primarily by the compatibility of insulation materials with the hygrothermal characteristics of traditional masonry. A comprehensive approach to internal thermal retrofitting is substantiated, combining energy efficiency requirements with hygrothermal reliability to ensure durability and long-term preservation of historic building structures.*

**Keywords:** *building energy efficiency, internal thermal insulation, hygrothermal performance, hygrothermal regime of building envelopes, insulation materials, architectural heritage preservation.*

### References:

1. I. Yu. Bilous, H. O. Hetmanchuk, S. O. Kramarenko, and A. V. Havrysh, “Budivli z blyzkym do nul'ovoho spozhyvannia enerhii v suchasnykh ta istorychnykh budivliakh: vyklyky ta rishennia [Nearly zero-energy buildings in modern and historical buildings: Challenges and solutions],” *Refrigeration Engineering & Technology*, vol. 61, no. 2, 2025, DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v61i2.3173>.

2. T. Dickson and S. Pavia, “Energy performance, environmental impact and cost of a range of insulation materials,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 140, Art. no. 110752, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110752>.

3. B. Erzen, M. Karataş, R. Orhan, and E. Aydoğmuş, “Innovative insulation materials: A comprehensive review of current trends, challenges, and future directions in sustainable building technologies,” *Polymer-Plastics Technology and Materials*, vol. 64, no. 10, pp. 1538–1561, 2025, DOI: <https://doi.org/10.1080/25740881.2025.2472378>.

4. P. Kosiński, P. Brzyski, and B. Duliasz, “Moisture and wetting properties of thermal insulation materials based on hemp fiber, cellulose and mineral wool in a loose state,” *Journal of Natural Fibers*, vol. 17, no. 2, pp. 199–213, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1477086>.
5. S. Hasan, S. Khan, I. Akhtar, and S. Kirmani, “Study of natural insulation materials and compared it with no insulation building,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 10692–10697, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.452>.
6. K. E. Mazur, W. J. Wardal, J. Barwicki, and M. Tseyko, “Thermal insulation of agricultural buildings using different biomass materials,” *Energies*, vol. 18, no. 3, Art. no. 636, 2025, DOI: <https://doi.org/10.3390/en18030636>.
7. M. Dlimi, R. Agounoun, I. Kadiri, K. Sbai, and A. Rahmani, “Effect of the integration of hemp wool as an insulation material for the construction of the roof and external walls of a typical Moroccan building,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 783, no. 1, Art. no. 012013, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/783/1/012013>.
8. M. Hult and S. Karlsmo, “Life cycle environmental and cost analysis of building insulated with hemp fibre compared to alternative conventional insulations – a Swedish case study,” *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 106–120, 2022, DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.sace.30.1.30357>.
9. D. Streimikiene, V. Skulskis, T. Balezentis, and G. P. Agnusdei, “Uncertain multi-criteria sustainability assessment of green building insulation materials,” *Energy and Buildings*, vol. 219, Art. no. 110021, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110021>.
10. H. M. Danaci and N. Akin, “Thermal insulation materials in architecture: A comparative test study with aerogel and rock wool,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 48, pp. 72979–72990, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20927-2>.
11. P. Kosiński, P. Brzyski, Z. Suchorab, and G. Łagód, “Heat losses caused by the temporary influence of wind in timber frame walls insulated with fibrous materials,” *Materials*, vol. 13, no. 23, Art. no. 5514, 2020, DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13235514>.
12. Y. Dong, J. Kong, S. Mousavi, B. Rismanchi, and P. S. Yap, “Wall insulation materials in different climate zones: A review on challenges and opportunities of available alternatives,” *Thermo*, vol. 3, no. 1, pp. 38–65, 2023, DOI: <https://doi.org/10.3390/thermo3010003>.
13. A. Karanafti, T. Theodosiou, and K. Tsikaloudaki, “Assessment of buildings’ dynamic thermal insulation technologies: A review,” *Applied Energy*, vol. 326, Art. no. 119985, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119985>.
14. DSTU 9191:2022, “Теплоізоляційні будівельні матеріали. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель [Thermal insulation of buildings. Method for selecting thermal insulation materials for building insulation],” Budstandart Online, 2022. [Online]. Available at: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=98996](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98996). Accessed: Dec. 17, 2025.
15. Hempire, “Hemp insulation material ‘5 Element’: composition and material formation principles,” *Hempire*, 2026. [Online]. Available: <https://www.hempire.com.ua/products/5-element/>. Accessed: Dec. 17, 2025.
16. DSTU-N B V.1.1-27:2010, “Будівельна кліматологія [Building climatology],” Budstandart Online, 2010. [Online]. Available at: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=26655](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=26655). Accessed: Dec. 17, 2025.
17. “CAD E.E. PRO – online platform for thermal and hygrothermal calculations of building envelope structures,” *Cadee Pro*, 2024. [Online]. Available at: <https://cadee.pro/>. Accessed: Dec. 17, 2025.
18. DBN V.2.6-31:2021, *Thermal insulation and energy efficiency of buildings*. DreamDim: website. 2022. Available at: [https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2022/08/DBN-V\\_2\\_6-31-2021.pdf](https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2022/08/DBN-V_2_6-31-2021.pdf)DREAMDIM | Yuriy Brykaylo. Accessed: Dec. 17, 2025.
19. DSTU B V.2.6-192:2013, “Настанова з розрахункової оцінки теплового стану об’єкту будівництва [Guidelines for the calculation assessment of the hygrothermal state of building envelopes],” Teplovizor-plus: website, 2013. [Online]. Available at: <https://teplovizor-plus.lviv.ua/wp-content/uploads/2019/11/dstu-v-2-6-192.pdf>. Accessed: Feb. 03, 2026.

Надійшла: 08.02.2026  
Received: 08.02.2026

Прийнята: 24.03.2026  
Accepted: 24.03.2026