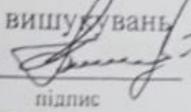


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет будівництва та транспорту
Кафедра Архітектури та інженерних вишукувань

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри
Архітектури та інженерних
вишукувань

Д.С. Бородай
підпис

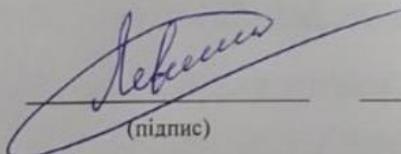
«10» грудня 2025 р

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження теплозахисних властивостей зовнішньої стіни
будинку»

Виконав (ла)


(підпис)

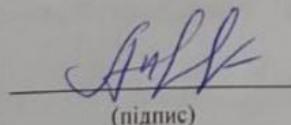
Левшенко С.О.

(Прізвище, ініціали)

Група

БУД 2401-1м

(Науковий) керівник


(підпис)

Андрух С.Л.

(Прізвище, ініціали)

Суми – 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра: Архітектури та інженерних вишукувань
Спеціальність: 192 "Будівництво та цивільна інженерія"

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Левшенко Сергій Олександрович

1. Тема роботи Дослідження теплозахисних властивостей зовнішньої стіни будинку

Затверджено наказом по університету № 34/ос від "4" січня 2025р.

2. Строк здачі студентом закінченої роботи: "10" чудня 2025р

3. Вихідні дані до роботи: Загальна хар-ка об'єкта дослідження;
Характеристика будівлі; Конструкція зовнішньої стіни;
(три варіанти), Кліматичні та розрахункові умови; Теплотехніч-
ні параметри матеріалів, Нормативні вимоги до теплозахисту
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці)

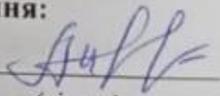
Вступ; Анотація; Вступ. Загальна характеристика
роботи; Вступ 2. Бібліографічний реліз дослідження;
Вступ 3. Методика та результати комплексного дослід-
ження теплозахисних властивостей зовнішньої
стіни; Вступ 4. Рекомендації та техніко-економі-
чне обґрунтування; Загальні висновки;
Список використаних джерел; Додаток.

5. Перелік графічного матеріалу (з точною вказівкою обов'язкових креслень)

Вешки, актуальність теми, об'єкт дослідження, предмет дослідження, мета дослідження, наукова та технічна новизна одержаних результатів, практичне значення, щодо одержаних результатів. Презентація доповіді на мультимедійному проекторі.

Завдання видав до виконання:

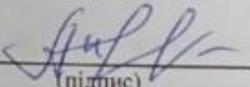
Керівник :


(підпис)

Андрух С.Л.

(Прізвище, ініціали)

Консультант:

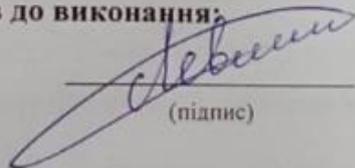

(підпис)

Андрух С.Л.

(Прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання:

Здобувач


(підпис)

Левшенко С.О.

(Прізвище, ініціали)

ЗМІСТ

Завдання	
Анотація	
Вступ	
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ	
РОЗДІЛ 2. БІБЛОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ	
2.1. Історичний розвиток наукових уявлень про теплозахисні властивості огорожувальних конструкцій	
2.2. Теплопровідність будівельних матеріалів та її залежність від умов експлуатації	
2.3. Вологісний режим зовнішніх стін та конденсація водяної пари	
2.4. Містки холоду як предмет дослідження	
2.5. Чисельне моделювання теплопередачі в огорожувальних конструкціях	
2.6. Енергоефективність, економічна доцільність та екологічні аспекти утеплення стін	
2.7. Підсумковий аналіз літератури та місце магістерської роботи	
Висновок до розділу 2	
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ КОМПЛЕКСНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗОВНІШНІХ СТІН	
3.1. Мета, завдання та загальна логіка комплексного дослідження	
3.2. Опис і деталізація досліджуваних стінових конструкцій	
3.2.1. Одношарова стіна (масивна конструкція)	
3.2.2. Багатошарова стіна з зовнішнім утепленням	
3.2.3. Комбінована стіна (з урахуванням вентильованого фасаду та складних вузлів)	
3.3. Аналітична методика теплотехнічного розрахунку трьох типів стін	
3.3.1. Розрахунок термічного опору та коефіцієнта теплопередачі	

3.3.2. Побудова температурного профілю (температура по товщині стіни)	
3.3.3. Аналіз вологісного режиму та перевірка на конденсацію	
3.4. Комплексна методика оцінки теплозахисту з урахуванням містків холоду	
3.5. Чисельне моделювання теплозахисних властивостей зовнішніх	
3.6. Методика чисельного моделювання в програмному комплексі ELCUT	
3.6.1. Одношарова цегляна стіна товщиною 380 мм	
3.6.2. Багатошарова конструкція типу ETICS («мокрый фасад») з утеплювачем ППУ	
3.6.3. Комбінована конструкція з вентиляваним фасадом (цегла + ППУ + вентзазор + облицювання)	
3.6.4. Узагальнення результатів дослідження трьох типів зовнішніх стін	
3.7. Узагальнення результатів дослідження трьох типів стін	
3.8. Висновки до розділу 3	

РОЗДІЛ 4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

4.1. Оптимізація конструкції зовнішньої стіни	
4.1.1. Аналіз матеріалів та їх теплофізичних властивостей	
4.1.2. Оптимізація одношарової конструкції зовнішньої стіни	
4.1.3. Оптимізація багатошарової конструкції (ETICS - «мокрый фасад»)	
4.1.4. Оптимізація комбінованої конструкції (вентилюваний фасад)	
4.1.5. Аналіз містків холоду	
4.1.6. Оптимізація пароізоляції, гідроізоляції та вітрозахисту	

4.2. Економічне обґрунтування ефективності утеплення зовнішніх стін	
4.2.1. Методика економічного розрахунку	.....
4.2.2. Річні тепловтрати для трьох варіантів стін	.....
4.2.3. Порівняльні річні тепловтрати	.....
4.2.4. Вартість теплової енергії	.....
4.2.5. Річна економія	.....
4.2.6. Вартість утеплення	.....
4.2.7. Окупність утеплення	.....
4.2.8. Аналіз LCC (життєвий цикл) на 30 років	.....
4.2.9. Графік «Витрати-Ефективність»	.....
4.3. Екологічні аспекти застосування теплоізоляційних матеріалів	.....
4.3.1. Вуглецевий слід та енерговитрати на виробництво	.....
4.3.2. Життєвий цикл (LCA) та екологічна стабільність	.....
4.3.3. Вплив на мікроклімат будівлі (IAQ)	.....
4.3.4. Аналіз low-carbon рішень	.....
4.3.5. Загальна екологічна оцінка трьох утеплювачів	.....
4.4. Практичні рекомендації замовникам та проєктувальникам	.....
4.4.1. Рекомендації щодо правильного вибору утеплювача	.....
4.4.2. Типові помилки під час утеплення та способи їх усунення	.....
4.4.3. Практичні технологічні інструкції для монтажників	.....
4.4.4. Рекомендації щодо запобігання конденсату	.....
Висновок до розділу 4	.....
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	.....
Список використаних джерел	.....
Додаток	.....

Анотація

Левшенко Сергій Олександрович. Дослідження теплозахисних властивостей зовнішньої стіни будинку - Кваліфікаційна робота магістра на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». – Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

Робота складається із змісту, загальної характеристики роботи та її кваліфікаційних ознак, огляд досліджень за обраною темою, розділів основної частини та висновків по роботі.

Сформульовано мету, задачі, об'єкт та предмет дослідження, методи наукового дослідження.

Результати досліджень присвячена теплозахисних властивостей зовнішніх стін будівель із різними варіантами конструктивного виконання та застосуванням сучасних теплоізоляційних матеріалів. У роботі проведено порівняльний аналіз одношарової, двошарової та тришарової стін із використанням мінеральної вати, пінополістиролу (ППС) та пінополіуретану (ППУ). Особливу увагу приділено визначенню теплопровідності, величини тепловтрат, зсуву ізотерм усередині огорожувальної конструкції та глибини проникнення холодного фронту.

Розрахункові дослідження виконано в програмному комплексі ELCUT, де сформовано обчислювальні теплові моделі стін та проаналізовано їх поведінку за різних температурних умов. Сформовано температурні поля, графіки розподілу тепла, карти зон тепловтрат та визначено вплив містків холоду у вузлах «стіна–перекриття». Порівняно ефективність теплоізоляції різних матеріалів, виявлено, що ППУ демонструє найменший рівень теплового проникнення, тоді як мінеральна вата має найбільші втрати в зоні примикання конструктивних елементів.

Окрім теплотехнічного аналізу, у роботі виконано економічне та екологічне обґрунтування вибору утеплювача. Оцінено річні тепловтрати, термін

окупності утеплення, потенційну економію енергоресурсів та вплив застосованих матеріалів на викиди CO₂ протягом життєвого циклу.

Результати дослідження можуть бути використані у проектуванні огорожувальних конструкцій, реконструкції житлових і громадських будівель, а також у практиці термомодернізації об'єктів різного призначення.

Ключові слова: теплозахист, зовнішня стіна, ELCUT, теплопровідність, мінеральна вата, ППС, ППУ, енергоефективність, теплові втрати, місток холоду.

Список публікацій:

- 1) Левшенко С.О., Андрух С.Л. Аналіз теплозахисних властивостей зовнішньої стіни будинку // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (17-21 листопада 2025 р.) - Суми, 2025.
- 2) Левшенко С.О., Андрух С.Л. Оптимізація теплозахисних характеристик зовнішньої стіни // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (17-21 листопада 2025 р.) - Суми, 2025.

В додатках наведено; тези конференції, альбом слайдів мультимедійної презентації.

Структура роботи.

Робота складається з основного тексту на __ сторінках, у тому числі __ таблиць, __ рисунків. Текст роботи містить загальну характеристику роботи, __ розділів, висновки і рекомендації за результатами роботи, список з __ використаних джерел, _ додатків на __ сторінках. Графічна частина складається з __ аркушів креслень та __ плакатів (або __ слайдів мультимедійної презентації).

Abstract

Levshenko Sergey Alexandrovich. Research on the heat-shielding properties of the external wall of a house – Master's qualification work in the form of a manuscript.

Master's qualification work in specialty 192 "Construction and Civil Engineering".
– Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The work consists of the content, general characteristics of the work and its qualification features, a review of research on the selected topic, sections of the main part and conclusions on the work.

The goal, objectives, object and subject of the research, methods of scientific research are formulated.

The results of the research are devoted to the heat-shielding properties of external walls of buildings with different variants of constructive execution and the use of modern thermal insulation materials. The work carried out a comparative analysis of single-layer, double-layer and three-layer walls using mineral wool, expanded polystyrene (EPS) and polyurethane foam (PPU). Special attention is paid to determining thermal conductivity, heat loss, isotherm shift inside the enclosing structure and the depth of cold front penetration.

The computational studies were performed in the ELCUT software package, where computational thermal models of walls were formed and their behavior under different temperature conditions was analyzed. Temperature fields, heat distribution graphs, heat loss zone maps were generated, and the influence of cold bridges in the "wall-ceiling" nodes was determined. The thermal insulation efficiency of different materials was compared, and it was found that PPU demonstrates the lowest level of thermal penetration, while mineral wool has the highest losses in the area of abutment of structural elements.

In addition to the thermal analysis, the work performed an economic and environmental justification for the choice of insulation. The annual heat loss, the payback period of insulation, the potential savings of energy resources, and the impact of the materials used on CO₂ emissions during the life cycle were estimated. The results of the study can be used in the design of enclosing structures, reconstruction of residential and public buildings, as well as in the practice of thermal modernization of facilities for various purposes.

Keywords: thermal protection, external wall, ELCUT, thermal conductivity, mineral wool, PPS, PPU, energy efficiency, heat loss, cold bridge.

List of publications:

1) Levshenko S.O., Andrukh S.L. Analysis of the heat-shielding properties of the external wall of the building // Materials of the All-Ukrainian scientific conference of students and postgraduates dedicated to the International Student Day (November 17-21, 2025) - Sumy, 2025.

2) Levshenko S.O., Andrukh S.L. Optimization of the heat-shielding characteristics of the external wall // Materials of the All-Ukrainian scientific conference of students and postgraduates dedicated to the International Student Day (November 17-21, 2025) - Sumy, 2025.

The appendices include; conference abstracts, multimedia presentation slide album. Structure of the work.

The work consists of the main text on __ pages, including __ tables, __ figures. The text of the work contains a general description of the work, __ sections, conclusions and recommendations based on the results of the work, a list of __ sources used, __ appendices on __ pages. The graphic part consists of __ sheets of drawings and __ posters (or __ slides of a multimedia presentation).

ВСТУП

Сучасний стан енергоефективності будівельної галузі України характеризується активним переходом до ресурсозберігаючих технологій, зменшенням залежності від традиційних джерел енергії та пошуком конструктивних рішень, здатних забезпечити високий тепловий комфорт за умов мінімальних експлуатаційних втрат. В умовах постійного зростання тарифів на енергоносії, кліматичних змін та актуалізації вимог до термостійкості огороджувальних конструкцій особливого значення набуває дослідження теплозахисних властивостей зовнішніх стін будівель. Саме зовнішні стіни визначають до 35-60 % загальних енергетичних втрат, а їх конструкція, матеріальне виконання та наявність теплоізоляційного шару формують основний тепловий баланс будівлі протягом усього періоду експлуатації.

Нормативні зміни, зокрема оновлення ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель», висувають більш жорсткі вимоги до опору теплопередачі огороджувальних конструкцій, що обумовлює необхідність інженерного переосмислення традиційних стінових систем та впровадження ефективних утеплювачів з низьким коефіцієнтом теплопровідності. У зв'язку з цим постає наукове завдання — не лише оцінити рівень тепловтрат та фактичний опір теплопередачі існуючих рішень, але й визначити оптимальну конфігурацію стіни, здатну забезпечити нормативний та підвищений рівень енергозбереження без втрати надійності та довговічності. Важливою складовою дослідження є також моделювання поведінки теплового потоку в зонах неоднорідностей, зокрема в місцях утворення містків холоду, що виникають на стиках плити перекриття, армованих поясів, зон примикання та кутах будівлі.

На практиці значна частка житлового фонду України побудована за старими теплотехнічними нормами, що були актуальні для іншого кліматичного та економічного середовища. Стіни з повнотілої цегли без утеплення або з мінімальною теплоізоляцією сьогодні не відповідають

сучасним вимогам щодо R-приведеного теплового опору. Це призводить до збільшених витрат на опалення, зниження енергетичної незалежності та підвищеного навантаження на комунальну інфраструктуру. Тому дослідження, спрямовані на оцінку та покращення теплозахисних характеристик таких конструкцій, мають не лише науковий, але й соціально-економічний зміст.

У даній магістерській роботі особлива увага приділяється моделюванню теплових потоків у трьох конструктивних варіантах стін: одношаровій, двошаровій та тришаровій, з використанням утеплювачів різної природи - мінеральної вати, пінополістиролу (ППС) та пінополіуретану (ППУ). Для проведення розрахунків застосовано програми ELCUT, що дозволяє отримати не лише числові значення теплових параметрів, але й графічні температурні поля, ізотермічні розподіли, карти проникнення холодного фронту та ключові зони потенційних тепловтрат.

Крім теплотехнічної оцінки конструкцій, у роботі розглянуто економічні та екологічні аспекти вибору утеплювачів: прогноз експлуатаційних витрат, термін окупності, вплив на зменшення викидів CO₂ та екологічний слід за життєвим циклом матеріалів. Узагальнення результатів дослідження дало змогу сформулювати рекомендації для проектувальників, забудовників та власників будівель, а також запропонувати оптимальні конструктивні рішення залежно від бюджету, кліматичної зони та необхідного показника енергоефективності.

Таким чином, дане дослідження спрямоване на обґрунтування вибору конструкції зовнішніх стін сучасних будівель шляхом комплексного теплотехнічного аналізу, моделювання теплових потоків, а також оцінки економічних та екологічних показників ефективності утеплення. Отримані результати мають практичну цінність для подальшого удосконалення проектних рішень та можуть бути використані при розробці енергоефективних стандартів житлової забудови.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Сучасний етап розвитку будівництва в Україні та світі характеризується стрімким посиленням вимог до енергоефективності будівель, підвищенням рівня теплозахисту огорожувальних конструкцій та скороченням енергоспоживання. Це пов'язано не лише з економічними факторами - зростанням вартості енергоресурсів та прагненням до зниження експлуатаційних витрат, - але й із глобальними екологічними викликами, які сьогодні мають ключове значення для політики сталого розвитку. Будівлі, за оцінками міжнародних організацій, споживають до 40 % світової енергії, і значна частина цих витрат припадає саме на опалення. Саме тому дослідження теплозахисних властивостей зовнішніх стін є одним із найважливіших напрямів модернізації будівельного фонду.

Для України ця тема має особливу актуальність. По-перше, значна частина житлової забудови зведена 30-60 років тому, у період, коли вимоги до теплотехнічних показників стін були набагато нижчими за сучасні норми. По-друге, клімат країни, зокрема Сумської області, належить до холодніших регіонів, де сумарні градусо-добі опалювального періоду (ГСОП) перевищують 3800-4000 °С·добу. Це означає, що теплозахисна спроможність будівель визначає не тільки комфорт проживання, але й величину витрат на опалення, які для українських домогосподарств залишаються істотними.

Крім того, у старих будівлях часто спостерігаються такі проблеми, як промерзання стін, конденсація пари всередині конструкції, утворення грибка і цвілі. Це не тільки погіршує теплозахист, але й створює загрози для здоров'я мешканців та довговічності огорожувальних конструкцій. Багато з цих явищ обумовлені неправильним розташуванням утеплювача, відсутністю пароізоляції або застарілими матеріалами, чия фактична теплопровідність із часом збільшується через накопичення вологи.

Водночас, у світі вже кілька десятиліть активно впроваджуються концепції «пасивного будинку», «нульового енергоспоживання» (Zero-energy

building), NZEB-будівель та інноваційних конструктивних систем з надзвичайно низьким коефіцієнтом теплопередачі. Країни Європейського Союзу вже затвердили перехід на будівлі з майже нульовим рівнем енергоспоживання, а низка міжнародних стандартів (EN ISO 6946, ISO 13790, ETAG 004) визначає підходи до моделювання і нормування теплозахисних характеристик стін.

На цьому фоні Україна також оновила нормативну базу - зокрема, ДБН В.2.6-31:2021, де істотно підвищені вимоги до опору теплопередачі, а також введені нові підходи до оцінки вологості та паропроникності. Проте реальна практика показує, що більшість будівель, особливо зведених до 1990-х років, не відповідають цим нормам.

Отже, дослідження теплозахисних властивостей зовнішньої стіни будинку є актуальним з огляду на такі фактори:

- енергетична безпека країни;
- реальна економія для домогосподарств;
- збільшення довговічності будівель;
- підвищення комфорту проживання;
- зменшення екологічного навантаження (викидів CO₂);
- необхідність модернізації існуючого житлового фонду;
- імплементація сучасних європейських норм у будівництві України.

Таким чином, теплозахисні властивості стін є не просто технічною характеристикою, а вагомим соціально-економічним і екологічним фактором, від якого залежить якість життя, витрати на комунальні послуги та стійкість будівель до кліматичних змін. Саме це визначає високу актуальність даного дослідження.

Мета дослідження полягає у комплексному аналізі теплозахисних властивостей зовнішньої стіни житлового будинку з урахуванням сучасних нормативних вимог, реальних кліматичних умов та сучасних методів розрахунку. На основі отриманих даних передбачається розробити техніко-обґрунтовані рекомендації щодо підвищення енергоефективності стіни.

Для досягнення мети необхідно виконати такі основні завдання:

1. Провести бібліографічний та аналітичний огляд сучасних досліджень щодо теплопровідності матеріалів та конструкцій стін.
2. Проаналізувати нормативні вимоги України та ЄС щодо теплового захисту.
3. Визначити фізичні характеристики матеріалів, що входять до складу досліджуваної стіни.
4. Виконати теплотехнічний розрахунок опору теплопередачі, температурного режиму шарів та визначити точку роси.
5. Дослідити поведінку конструкції за допомогою чисельного моделювання (ELCUT).
6. Проаналізувати вплив вологості утеплювача та матеріалів на фактичну теплопровідність.
7. Розглянути альтернативні варіанти конструкції стіни та провести їх порівняння.
8. Оцінити економічну доцільність різних варіантів утеплення.
9. Сформулювати практичні висновки та рекомендації щодо покращення теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій.

Об'єктом дослідження є зовнішня огорожувальна стіна житлового будинку, яка піддається впливу зовнішнього клімату та визначає величину тепловтрат.

Предметом дослідження є теплозахисні властивості стіни, включаючи:

- опір теплопередачі,
- температурний розподіл у шарах,
- вологісний режим та положення точки роси,
- поведінку конструкції при різних умовах експлуатації,
- ефективність застосування утеплювачів.

Методи дослідження у роботі застосовано комплекс методів, що забезпечують повноту аналізу:

Теоретичні методи

- аналіз і систематизація нормативних документів (ДБН, ДСТУ, ISO, EN);

- огляд сучасної наукової літератури;
- теплотехнічні розрахунки згідно з методикою ДБН В.2.6-31:2021.

Математичні методи

- метод теплового балансу;
- визначення R-значення;
- розрахунки температур у шарах.

Чисельні та комп'ютерні методи

- моделювання теплопередачі у програмному середовищі:
 - ELCUT - моделювання складних багатошарових систем.

Емпіричні методи

- порівняння отриманих розрахункових показників з фактичними даними досліджень.

Аналітичні методи

- порівняльний аналіз різних варіантів будівельних конструкцій;
- економічна оцінка ефективності вибору утеплювачів;
- визначення оптимальної конструкції стіни.

Наукова та технічна новизна одержаних результатів

У межах роботи передбачається отримати результати, що мають елементи наукової та практичної новизни:

1. Уточнено вплив вологості утеплювача на фактичний опір теплопередачі, що часто ігнорується в типових проєктах.
2. Проведено комп'ютерне моделювання температурних полів, що дозволяє побачити нерівномірність теплових потоків та містки холоду.
3. Запропоновано оптимізовану конструкцію стіни, адаптовану до умов Сумського регіону.
4. Виконано порівняння традиційних та інноваційних утеплювачів мінеральна вата, ППС (пінополістирол), пінополіуретан.
5. Оцінено економічну ефективність різних варіантів утеплення з урахуванням довговічності матеріалів та їх вологостійкості.

б. Проаналізовано ризики утворення конденсату на межах шарів конструкції, що дозволяє запобігти руйнуванню стін.

Результати роботи дозволяють більш точно оцінювати теплозахисні властивості стін та впроваджувати енергоефективні рішення у житловому секторі.

Практичне значення одержаних результатів

Результати дослідження можуть бути використані:

- при проектуванні нових енергоефективних житлових будинків;
- для оцінки стану та модернізації існуючих будівель;
- ОСББ та приватними власниками для розробки стратегії утеплення;
- будівельними організаціями під час вибору матеріалів і технологій фасадних робіт;
- у навчальному процесі підготовки фахівців зі спеціальності «Будівництво та цивільна інженерія»;
- у сфері енергоаудиту для формування технічних рекомендацій.

Практична цінність полягає у можливості реального зниження витрат на опалення, підвищенні комфорту проживання та енергоефективності житлового фонду України. Запропоновані рекомендації можуть забезпечити економію енергії понад 30–45 % залежно від вихідного стану стіни.

Апробація та публікація результатів роботи.

3) Левшенко С.О., Андрух С.Л. Аналіз теплозахисних властивостей зовнішньої стіни будинку // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (17-21 листопада 2025 р.) – Суми, 2025.

4) Левшенко С.О., Андрух С.Л. Оптимізація теплозахисних характеристик зовнішньої стіни // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (17-21 листопада 2025 р.) – Суми, 2025.

РОЗДІЛ 2. БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Історичний розвиток наукових уявлень про теплозахисні властивості огорожувальних конструкцій

Проблема теплозахисту будівель історично виникла значно раніше, ніж з'явилися сучасні терміни «енергоефективність» чи «економія енергії». На початкових етапах розвитку будівництва головною метою було створити стіни, здатні захищати людину від холоду, вітру та опадів. У традиційній архітектурі різних регіонів світу це вирішувалося переважно за рахунок масивності конструкцій: товста кам'яна кладка, дерев'яні зруби, саман, глинобитні стіни тощо.

Проте до середини ХХ століття теплозахисні властивості огорожувальних конструкцій практично не аналізувалися кількісно. У більшості випадків проєктувальники керувалися емпіричним підходом: «чим товстіша стіна — тим тепліше». Особливо це було характерно для холодних кліматичних зон, де будівлі з товщиною стіни 60–90 см вважалися нормою. Ситуація стала змінюватися з розвитком фізики теплопровідності та появою перших теплотехнічних розрахунків. У 1920-1950-х роках вітчизняні та зарубіжні вчені (Снігирьов, Ловцов, Кутателадзе, Пантелєєв та ін.) заклали теоретичні основи розрахунку стаціонарної теплопередачі, визначили поняття коефіцієнта теплопровідності λ , теплового опору R , коефіцієнта теплопередачі k . Це дало змогу перейти від інтуїтивних підходів до аналізу тепловтрат у числах.

У другій половині ХХ століття, особливо після енергетичної кризи 1970-х років, з'являється усвідомлення того, що будівлі споживають колосальний обсяг енергії на опалення, а модернізація огорожувальних конструкцій є одним із найефективніших напрямів енергозбереження. Починається активне впровадження теплоізоляційних матеріалів (мінеральна вата, пінополістирол), розробляються перші системи зовнішнього утеплення фасадів у вигляді багат шарових штукатурних систем.

У СРСР та Україні у 1960–1980-х роках ухвалюються перші нормативні документи, де вводиться мінімальний опір теплопередачі стін. Однак ці вимоги були порівняно низькими. Умовно кажучи, для більшості регіонів України нормативний опір теплопередачі $R_{\text{норм}}$ становив близько 1,0–1,2 м²·К/Вт, що сьогодні оцінюється як недостатній рівень теплозахисту.

Для наочного представлення еволюції норм можна запропонувати:

Таблиця 2.1. Еволюція нормативних вимог до опору теплопередачі зовнішніх стін в Україні

Період дії норм	Нормативний документ	Основні вимоги та особливості	Нормативний опір теплопередачі R_f , м ² ·К/Вт (для житлових будівель, II–VI кліматичні зони)
до 1980 р.	Відомчі будівельні правила (без чіткого нормування теплозахисту)	Вимоги до теплозахисту фактично були відсутні. Проектування велося переважно за конструктивними та міцнісними принципами. Масивні стіни виконували роль теплового акумулятора.	~0,6-0,8 (оцінкові значення, у нормативах не фіксувались)
1980–1984 рр.	СНиП II-3-79* «Строительная теплотехника»	Вперше введено нормативи опору теплопередачі для огорожувальних конструкцій. Вимоги досить низькі порівняно з Європою.	0,8-1,0
1984–2006 рр.	СНиП II-3-79 (ред. 1984 р.)	Уточнені методики теплотехнічного розрахунку. Додано поправки щодо вологості. Проте вимоги залишаються мінімальними.	1,0-1,2
2006–2010 рр.	ДБН В.2.6-31:2006 «Теплова ізоляція будівель»	Перше сучасне підвищення вимог. Запровадження розділення за кліматичними зонами України. Поява поняття «приведений опір».	2,1-2,5
2010–2013 рр.	ДБН В.2.6-31:2010	Збільшення норм до рівня, наближеного до європейського. Введено вимоги до енергоефективності будівель.	2,8-3,2
2013–2021 рр.	ДБН В.2.6-31:2016	Підвищено вимоги для всіх кліматичних зон. Уведено більш суворі критерії розрахунку вологісного режиму.	3,3-3,5

На основі такої таблиці добре видно тенденцію: нормативні вимоги зростають щонайменше в 2,5–3 рази в порівнянні зі старими нормами.

Паралельно у країнах Західної Європи розробляються перші концепції «будинку з низьким енергоспоживанням», згодом - пасивного будинку (Passivhaus), а пізніше - NZEB (Nearly Zero Energy Building). Це вимагає ще більш жорстких вимог до зовнішніх стін, а також появи нового покоління утеплювачів та конструктивних рішень.

Отже, історичний аналіз показує, що теплозахист будівель поступово трансформувався з другорядного питання до центрального елементу енергоефективного будівництва, а сучасна наукова думка спрямована на пошук оптимальних конструкцій стін, які забезпечують мінімальні тепловтрати при прийнятній вартості та довговічності.

2.2. Теплопровідність будівельних матеріалів та її залежність від умов експлуатації

Однією з центральних тем сучасних досліджень є визначення реальних коефіцієнтів теплопровідності будівельних матеріалів. Якщо раніше користувалися лише табличними значеннями λ , то сьогодні значна частина робіт спрямована на аналіз того, як змінюється λ у реальних умовах експлуатації: при зміні вологості, температури, старінні матеріалу.

Основні висновки літератури зводяться до такого:

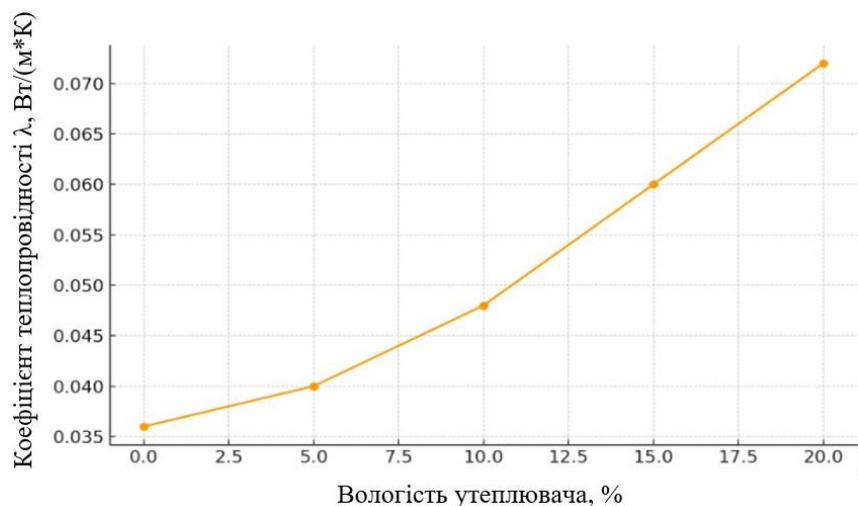
- коефіцієнт теплопровідності λ є функцією вологості та структури матеріалу;
- пористі матеріали (газобетон, мінеральна вата) особливо чутливі до вологи;
- навіть незначне підвищення вологості може призвести до істотного погіршення теплозахисних властивостей.

Таблиця 2.2. Порівняння теплопровідності основних матеріалів стін та утеплювачів

№ п.п.	Матеріал	Середня густина, ρ , кг/м ³	Коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{\text{декл}}$, Вт/(м·К) (умовно сухий стан)	Коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{\text{експ}}$, Вт/(м·К) (реальні умови експлуатації)	Коротка характеристика та особливості поведінки
1	Цегла керамічна повнотіла	1600-1900	0,55-0,70	0,65-0,85	Традиційний матеріал. Висока теплопровідність, значна теплопровідність при зволоженні. Потребує додаткового утеплення.
2	Цегла керамічна пустотіла (щілинна)	1200-1450	0,35-0,45	0,40-0,50	Покращені теплозахисні властивості завдяки порожнинам. Чутлива до заповнення пустот розчином та вологи.
3	Цегла силікатна повнотіла	1700-1900	0,70-0,80	0,80-0,90	Має вищу теплопровідність, ніж керамічна. При зволоженні різко зростає λ , тому без утеплення не відповідає сучасним нормам.
4	Бетон важкий (моноліт, панелі)	2200-2500	1,60-1,75	1,70-1,90	Дуже теплопровідний матеріал. Використовується як несучий, а не теплозахисний. У системах стін обов'язково поєднується з утеплювачем.

5	Керамзитобетон стіновий	900-1300	0,35-0,45	0,40-0,55	Має нижчу λ порівняно з важким бетоном. Часто використовують у блоках з додатковим утепленням. Теплопровідність зростає при зволоженні.
6	Газобетон D400	~400	0,10-0,12	0,12-0,14	Один із найбільш ефективних дрібноштучних матеріалів. Висока пористість забезпечує низьку λ , але матеріал дуже чутливий до вологи.
7	Газобетон D500	~500	0,12-0,14	0,14-0,16	Більш міцний, але теплопровідність вища, ніж у D400. При підвищеній вологості потребує додаткового утеплення для досягнення нормативного R.
8	Мінераловатні плити фасадні (щільність 120-150 кг/м ³)	120-150	0,035-0,040	0,040-0,060	Один з найпоширеніших утеплювачів. Паропроникний, негорючий. λ істотно зростає при намоканні, вимагає якісного захисту від опадів.
9	Пінополістирол (ППС, EPS) фасадний	12-20	0,031-0,038	0,035-0,045	Дешевий та легкий утеплювач. Мала водопоглинальна здатність, але при тривалому зволоженні λ зростає. Горючий, чутливий до УФ-випромінювання без захисту.
10	Екструдований пінополістирол (ЕППС, XPS)	28-45	0,028-0,034	0,030-0,038	Має закриту пористу структуру, низьке водопоглинання. Стабільна λ , але горючий, обмеження за

					пожежною безпекою, частіше для цоколів та фундаментів.
11	Напилюваний пінополіуретан (ППУ)	30-60	0,022-0,028	0,024-0,030	Один з найбільш ефективних теплоізоляторів. Формує безшовний шар, низьке водопоглинання. Чутливий до УФ-впливу, потребує захисного шару.
12	PIR-плити (полізоціанурат)	30-40	0,018-0,024	0,020-0,026	Високоєфективний сучасний утеплювач з кращою вогнестійкістю порівняно з ППУ. Стабільна λ , але висока вартість, вимогливий до якості монтажу.
13	Аерогелеві теплоізоляційні матеріали (штукатурки, мати)	100-160	0,013-0,016	0,015-0,020	Наднизька теплопровідність. Використовується у тонких шарах при реконструкції пам'яток архітектури. Дуже дорогий матеріал, поки що обмежене застосування.



Графік 2.1. Залежність коефіцієнта теплопровідності мінераловатного утеплювача від об'ємної вологості

На графіку 2.1 відображає залежність коефіцієнта теплопровідності λ мінераловатного утеплювача від його об'ємної вологості в межах 0-20 %. Дані, представлені на графіку, узагальнені на основі експериментальних досліджень провідних виробників теплоізоляційних матеріалів (мінеральна вата, ППС (пінополістирол), пінополіуретан) та результатів наукових публікацій, присвячених впливу вологості на теплофізичні властивості волокнистих утеплювачів.

У початковому стані (вологість 0 %) коефіцієнт теплопровідності становить приблизно $\lambda = 0,036 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, що відповідає сухим лабораторним умовам, у яких зазвичай визначається «декларована» теплопровідність матеріалу. Проте навіть незначне збільшення вологості на 5 % призводить до зростання λ до $0,040 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, що становить близько 11 % погіршення теплозахисних властивостей.

При вологості 10 % теплопровідність збільшується до $0,048 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, тобто відбувається погіршення ефективності утеплювача майже на 33 %. Це є критично важливим, оскільки така кількість вологи може накопичуватися у матеріалі за умов неправильного конструктивного розв'язання вузлів, відсутності пароізоляції або в результаті конденсації.

Подальше зростання вологості до 15-20 % демонструє значне прискорення збільшення λ : до $0,060$ та $0,072 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ відповідно. При цьому мінераловатний утеплювач фактично втрачає половину своєї ефективності, що особливо небезпечно в зоні «холодних» зовнішніх стін, де волога може накопичуватися внаслідок дифузії пари або зволоження атмосферними опадами.

Графік наочно доводить, що:

- реальна теплопровідність утеплювача суттєво відрізняється від лабораторної;
- необхідно враховувати експлуатаційну теплопровідність, а не лише декларовану;

- при проектуванні фасадних систем потрібно забезпечувати надійний захист утеплювача від вологи;
- навіть невелике підвищення вологості приводить до відчутного зростання тепловтрат через стіну.

Таким чином, правильний вологісний режим мінераловатного шару є ключовим фактором забезпечення стабільних теплозахисних властивостей фасадної системи протягом усього періоду експлуатації будівлі.

2.3. Вологісний режим зовнішніх стін та конденсація водяної пари

Вологісний стан стіни є критичним фактором, який визначає не тільки теплозахисні властивості, але й довговічність та безпечність експлуатації будівлі. Наукові дослідження показують, що накопичення вологи:

- підвищує λ матеріалів;
- призводить до появи цвілі, грибка;
- може викликати корозію арматури та металевих елементів;
- руйнує структуру пористих матеріалів при циклах заморожування–відтавання.

У нормативних документах (EN ISO 13788, ДСТУ) традиційно використовується методика визначення положення точки роси. Однак сучасні дослідження вказують на обмеженість суто стаціонарних методів. Багато авторів (Hagentoft, Künzle) працюють із нестаціонарними моделями вологопереносу, які враховують річні коливання температури й вологості, дощ, сонячну радіацію, дифузію пари.

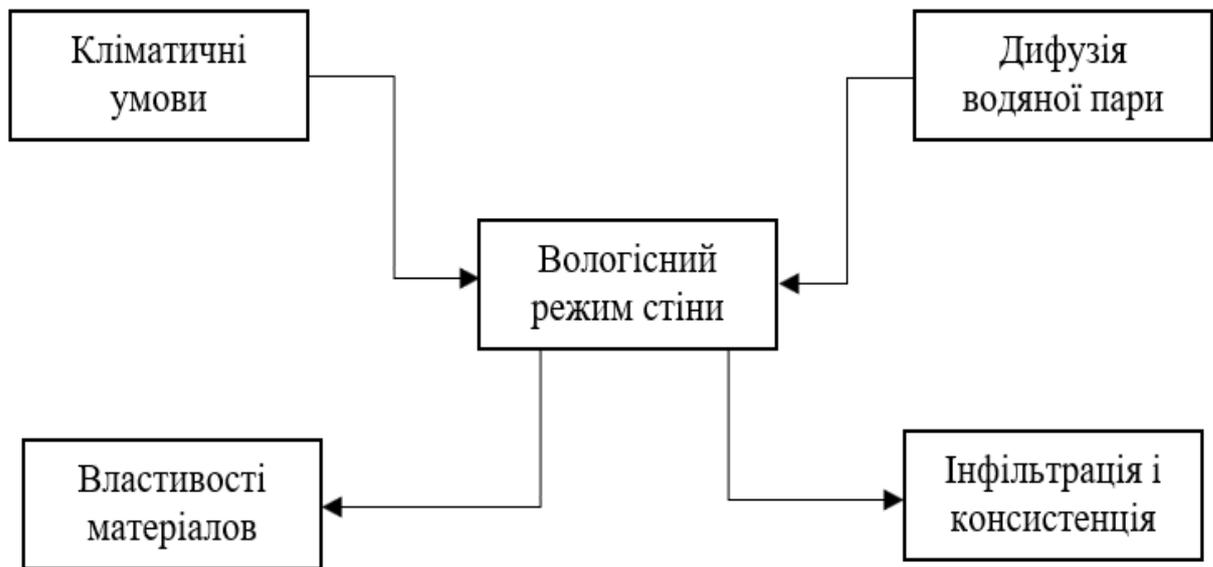
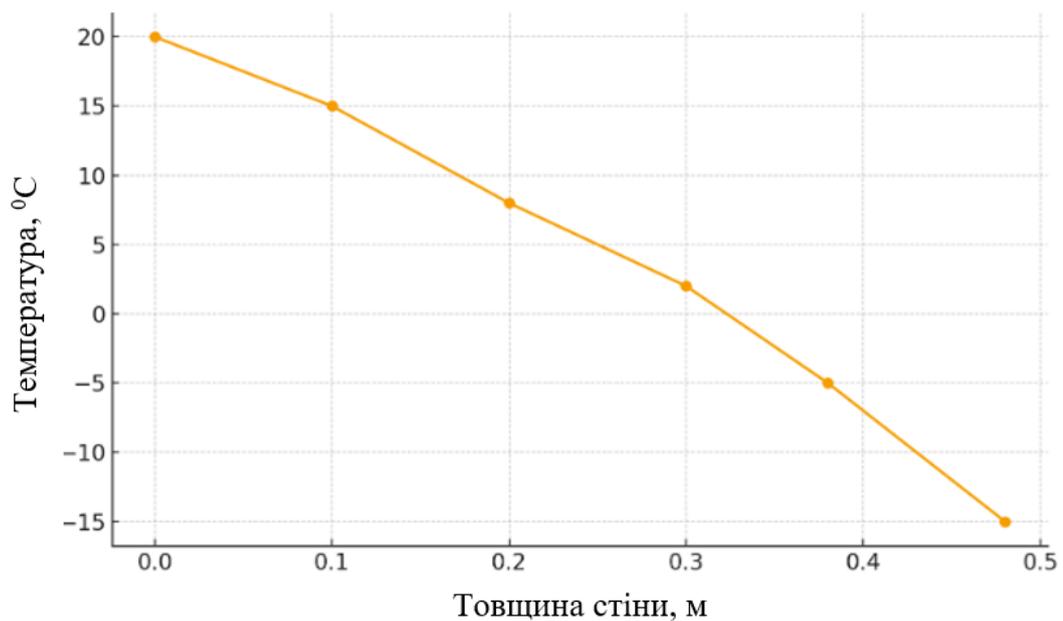


Схема 2.1. Основні фактори, що впливають на вологісний режим стіни

Для узагальнення літературних даних доцільно подати:

- шляхи міграції (дифузія пари, фільтрація повітря, капілярний транспорт);
- наслідки (накопичення конденсату, підвищення λ , ушкодження оздоблення).

Окремі роботи присвячені порівнянню різних схем шару пароізоляції. Так можна зробити висновок, що неправильне розміщення пароізоляції або її відсутність у багат шарових стінах призводить до зміщення точки роси всередину конструкції, що є причиною прихованого конденсату.



Графік 2.2. Розподіл температури та тиску насиченої водяної пари по товщині стіни в зимовий період

Розглядаючи графік 2.2 ми можемо побачити розподіл температури по товщині зовнішньої стіни будинку в умовах зимового періоду. Такий графік є обов'язковим елементом теплотехнічного аналізу огорожувальних конструкцій відповідно до вимог ДБН В.2.6-31:2021 та EN ISO 6946, оскільки дозволяє оцінити температурний режим кожного шару стіни й виявити потенційні ризики виникнення конденсації водяної пари.

У наведеному прикладі температура внутрішнього повітря становить +20 °С, що відповідає нормованим параметрам мікроклімату житлових приміщень. У міру віддалення від внутрішньої поверхні стіни температура поступово знижується: на глибині 0,1 м вона складає близько +15 °С, а в середині стіни (приблизно 0,2-0,3 м) - від +8 до +2 °С. Саме в цій зоні зазвичай розташовується матеріал із найбільшою тепловою інерційністю, тому тут спостерігається найбільш рівномірне зниження температури.

Після переходу через межу матеріалу основної стіни й утеплювача (точка близько 0,38 м) спостерігається істотне зменшення температури до -5 °С. Це характерно для зовнішнього шару теплоізоляції, який піддається інтенсивному тепловому градієнту та часто є місцем перевірки положення точки роси. Остаточне значення температури на зовнішній поверхні стіни становить -15 °С, що відповідає зимовим температурами холодної п'ятиденки для кліматичного району Сумської області.

Плавний характер графіка свідчить про правильне розташування шарів та відсутність різких температурних перепадів у товщі стіни, що є бажаною ознакою енергоефективної конструкції. Відсутність різких «провалів» у графіку вказує також на те, що матеріали підібрано з урахуванням їх сумісності за теплотехнічними характеристиками.

Основні висновки за графіком:

1. Температура в товщі конструкції зменшується поступово, що підтверджує правильну послідовність шарів.

2. Зона найбільшого теплового градієнту припадає на утеплювач, де й відбувається основний перепад температур.
3. Область можливого утворення конденсату буде розташована поблизу межі «основна стіна - утеплювач», що потребує додаткової перевірки за допомогою розрахунку парціальних тисків та точки роси.
4. Модель відповідає типовому розподілу температур у стінах з цегляною кладкою та зовнішнім утепленням товщиною 100 мм.

Таким чином, графік 2.2 є важливим візуальним інструментом аналізу теплозахисних властивостей стіни та дозволяє зробити висновки про потенційну ефективність утеплення, а також про можливі ризики появи конденсату та зволоження шарів конструкції.

2.4. Містки холоду як предмет дослідження

Достатньо великим об'ємам досліджень присвячений місткам холоду — локальним ділянкам конструкції, через які відбуваються підвищені тепловтрати. Досліджуючи загальні втрати тепла це може сягнути 20-40 %, особливо у будівлях з хорошим основним шаром утеплення.

Типові містки холоду:

- кути будівлі (зовнішні та внутрішні);
- стики стіна-перекриття;
- перемички та пояси;
- ділянки кріплення балконних плит;
- анкери та кронштейни вентиляованих фасадів;
- місця проходів інженерних комунікацій.

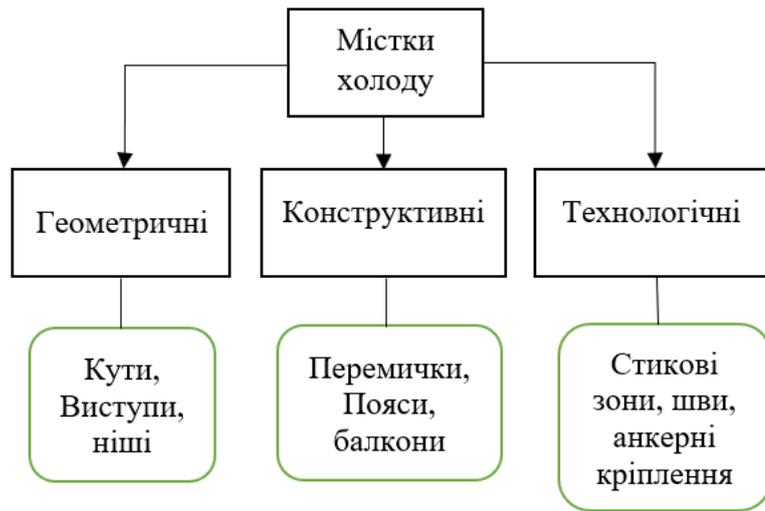
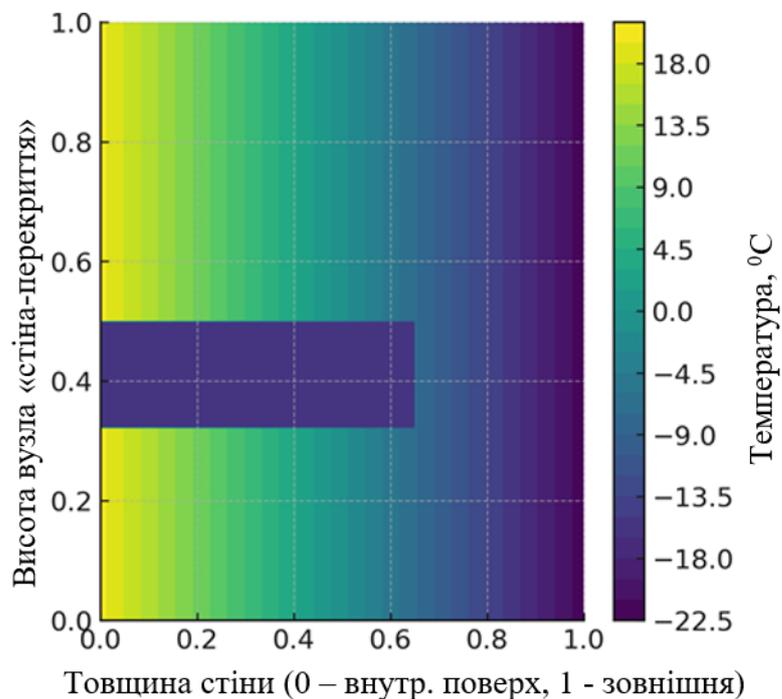
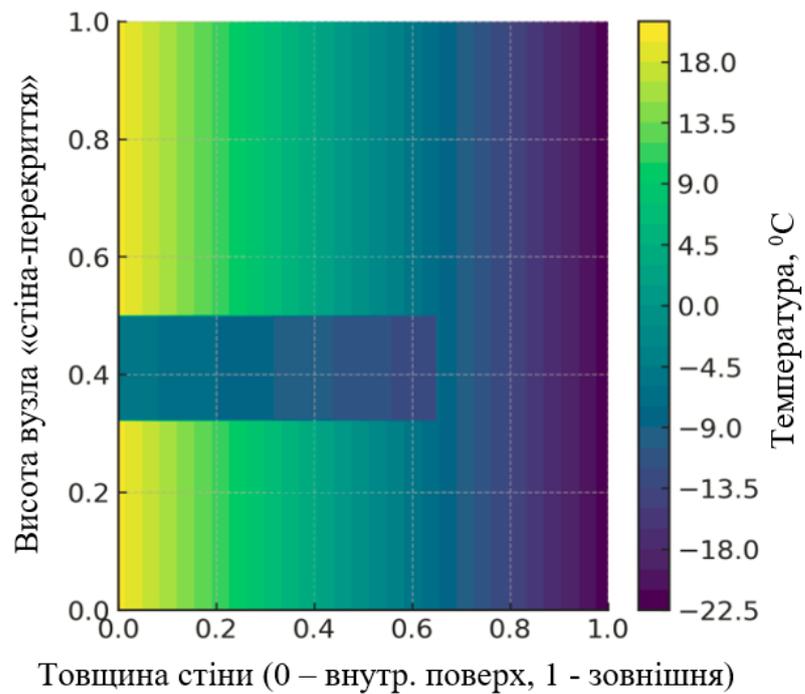


Схема 2.2. Типологія основних містків холоду в зовнішніх стінах

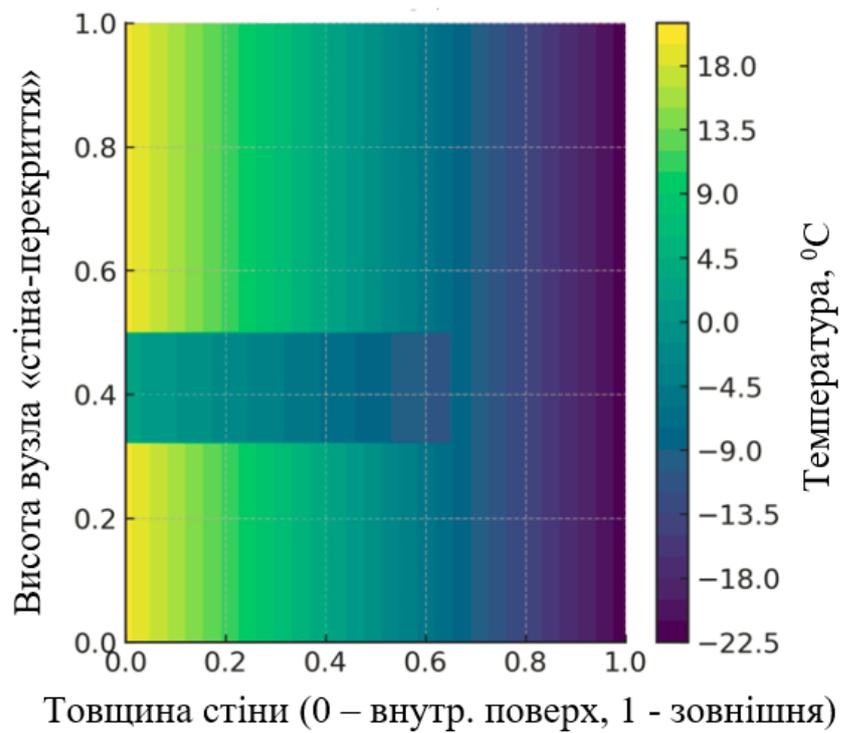
У численних дослідженнях за допомогою 2D та 3D чисельного моделювання показано, що в зонах містків холоду температура внутрішньої поверхні може знижуватися на кілька градусів, створюючи умови для конденсації та виникнення грибка, навіть якщо середнє значення R для всієї стіни відповідає нормам.



а) утеплювач мінеральна вата



б) утеплювач ППС



в) пінополіуретан

Рис. 2.1. Приклад температурного поля у вузлі «стіна–перекриття» з містком холоду

2.5. Чисельне моделювання теплопередачі в огорожувальних конструкціях

Розвиток обчислювальної техніки суттєво змінив підхід до дослідження теплозахисних властивостей стін. Якщо раніше розрахунок обмежувався плоскими одно- або багат шаровими моделями, то сьогодні активно застосовуються:

- метод скінченних елементів;
- метод скінченних різниць;
- спеціалізованою програмою (ELCUT).

Сучасні дослідження демонструють, що чисельне моделювання дозволяє:

- враховувати складну геометрію вузлів;
- детально аналізувати температурні поля;
- оцінювати вплив містків холоду;
- визначати реальні значення коефіцієнтів теплопередачі в проблемних зонах;
- досліджувати не тільки теплоперенос, а й вологоперенос.

Важливим є те, що багато дослідників поєднують класичні теплотехнічні розрахунки за ДБН та EN ISO із результатами чисельного моделювання, що дозволяє:

- перевіряти «чисто табличні» рішення;
- виявляти слабкі місця конструкції;
- уточнювати товщини утеплювачів у зонах вузлів.

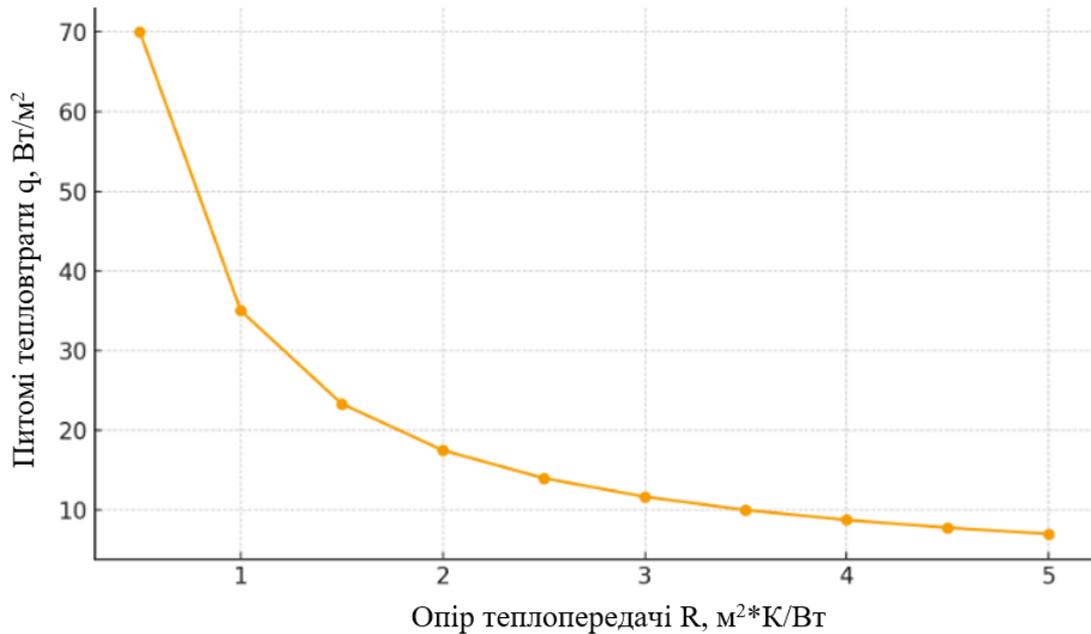
2.6. Енергоефективність, економічна доцільність та екологічні аспекти утеплення стін

У сучасних публікаціях теплозахисні властивості огорожувальних конструкцій все частіше розглядаються у зв'язку з економічними та екологічними аспектами. Автори не обмежуються лише визначенням R або k , а аналізують:

- скорочення річних тепловтрат будівлі завдяки утепленню;
- зменшення платежів за опалення;

- термін окупності заходів з утеплення;
- зниження викидів CO₂, пов'язаних із виробництвом та спалюванням енергоносіїв.

Для узагальнення таких результатів доцільним є:



Графік 2.3. Залежність питомих тепловтрат через стіни від опору теплопередачі R

Отже графік 2.3 демонструє залежність питомих тепловтрат q (Вт/м²) через зовнішню стіну від значення опору теплопередачі R (м²·К/Вт). Така залежність є ключовою для оцінки енергоефективності огорожувальних конструкцій, оскільки показує, як збільшення теплозахисних властивостей стіни впливає на зменшення втрат теплової енергії.

Для побудови графіка використано базову теплотехнічну формулу:

$$q = \frac{\Delta T}{R},$$

де

- q - питомі тепловтрати (Вт/м²),
- ΔT - різниця температур між внутрішнім та зовнішнім повітрям, прийнята як 35 °С (умови розрахункової зимової температури),
- R - опір теплопередачі конструкції.

Крива на графіку має різко спадну криву, що свідчить про обернено пропорційну залежність між R і q . При низьких значеннях опору теплопередачі

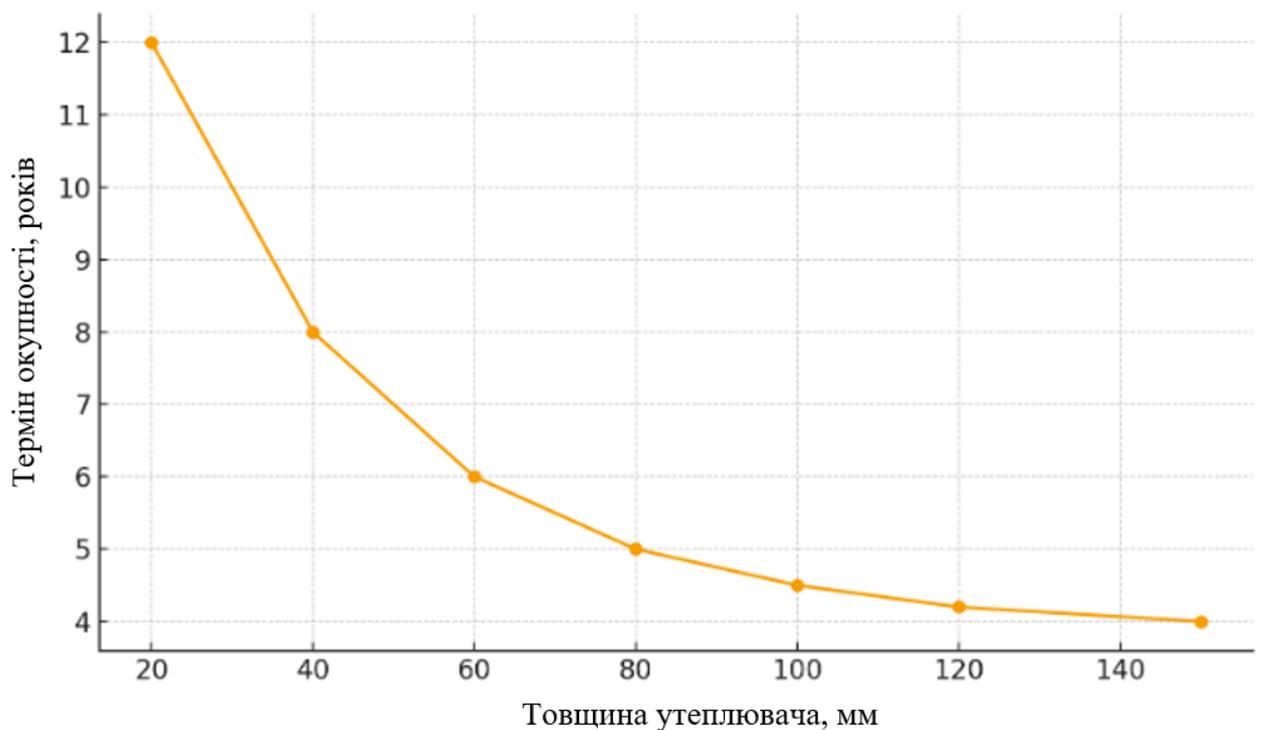
(0,5–1,0 м²·К/Вт) тепловтрати є дуже значними - 70...35 Вт/м², що характерно для старих будівель із неутепленими кам'яними стінами. У таких випадках стіна пропускає значний потік тепла, що призводить до збільшення витрат на опалення та зниження теплового комфорту приміщень.

У діапазоні $R = 2,0-3,0$ м²·К/Вт тепловтрати зменшуються до 17-12 Вт/м². Це відповідає будівлям, які мають базовий або середній рівень теплоізоляції. Внесок кожного додаткового сантиметра утеплювача у зменшення тепловтрат ще помітний, але поступово починає знижуватися.

Після досягнення значень $R \geq 3,5$ м²·К/Вт крива переходить у режим «плато»: тепловтрати зменшуються повільно і складають лише 7-8 Вт/м². У цій зоні додаткове збільшення товщини утеплювача дає мінімальний енергетичний ефект, що важливо враховувати при визначенні економічно доцільної товщини теплоізоляційного шару.

Основні висновки за графіком:

1. Питомі тепловтрати зменшуються найшвидше у зоні малих значень R (0,5-2,0 м²·К/Вт).
2. Досягнення нормативного рівня ($R \geq 3,3$ для України) забезпечує різке зменшення втрат тепла.
3. Збільшення R понад нормативне значення часто економічно недоцільне, оскільки дає незначне зменшення q .
4. Графік підтверджує, що утеплення зовнішніх стін є одним із найефективніших заходів енергозбереження.



Графік 2.4. Термін окупності утеплення в залежності від товщини теплоізоляції

Графік 2.4 відображає залежність терміну окупності утеплення зовнішніх стін від товщини теплоізоляційного шару. Наведена крива демонструє типову поведінку економічної ефективності утеплення, коли збільшення товщини теплоізоляції спочатку значно зменшує витрати на опалення, але після досягнення певного рівня ефект насичується.

На графіку представлено розрахункові значення терміну окупності для товщин утеплювача в діапазоні 20-150 мм. Вихідне значення 20 мм дає термін окупності близько 12 років, що обумовлено невисокою енергоефективністю тонкого шару теплоізоляції. На цьому етапі інвестиції в утеплення не забезпечують достатнього зниження тепловтрат, оскільки основна частина потоку тепла продовжує проходити через стіну.

При збільшенні товщини утеплювача до 40-60 мм спостерігається різке зменшення терміну окупності до 8-6 років. Цей діапазон є найбільш вигідним з точки зору інвестицій, оскільки кожні додаткові 20 мм утеплювача забезпечують суттєве скорочення тепловтрат і, відповідно, економію коштів

на опалення. У більшості випадків саме цей інтервал вважається оптимальним при модернізації існуючих будівель.

Подальше збільшення товщини до 80-120 мм забезпечує додаткове зменшення терміну окупності до 5-4,2 років. У цьому діапазоні крива вирівнюється, що свідчить про зниження граничного економічного ефекту від кожного додаткового міліметра теплоізоляції. Іншими словами, економія тепла продовжує зростати, але вже не так швидко, як на попередніх стадіях.

При товщині 150 мм термін окупності становить приблизно 4 роки. Це означає, що подальше збільшення товщини утеплювача має мінімальний економічний сенс, оскільки перехід через межу енергоефективності (коли тепловтрати зменшуються дуже повільно) уже відбувся. Подібна поведінка узгоджується з науковими даними щодо економічної оптимізації теплоізоляції згідно з методиками LCC (Life Cycle Cost) та EN ISO 15459.

Основні висновки за графіком:

1. Найефективніша зона економії - товщина утеплювача 40-80 мм, де крива має найбільший спад.
2. Теплоізоляція товщиною 100-150 мм забезпечує найкраще співвідношення «зменшення тепловтрат / стабільний термін окупності».
3. Збільшення товщини понад 150 мм зазвичай недоцільне економічно.
4. Графік підтверджує, що утеплення є вискоелективним заходом: більшість варіантів окупуються у межах 4-6 років.

2.7. Підсумковий аналіз літератури та місце магістерської роботи

Проведений бібліографічний огляд дозволяє зробити такі узагальнювальні висновки:

1. Теплозахисні властивості зовнішніх стін є одним з основних факторів енергоефективності будівель.
2. Наукові дослідження охоплюють широкий спектр проблем: від точного визначення λ до комплексного моделювання тепловологісних процесів.

3. Більшість існуючих робіт акцентує увагу на окремих аспектах (наприклад, тільки теплопровідність або тільки вологісний режим), тоді як комплексне поєднання теплотехнічного розрахунку, чисельного моделювання, економічної оцінки та аналізу нормативних вимог зустрічається рідше.
4. Значна частина житлового фонду України не відповідає сучасним нормам щодо R , а в літературі наголошується на потенціалі енергозбереження саме через модернізацію зовнішніх стін.
5. Практичні рекомендації часто носять загальний характер, без прив'язки до конкретних кліматичних умов, типу будинку та реального стану матеріалів.

Таблиця 2.1. Еволюція нормативних вимог до опору теплопередачі зовнішніх стін в Україні

Період дії норм	Нормативний документ	Основні вимоги та особливості	Нормативний опір теплопередачі R_r , $m^2 \cdot K/Wt$ (для житлових будівель, II-VI кліматичні зони)
до 1980 р.	Відомчі будівельні правила (без чіткого нормування теплозахисту)	Вимоги до теплозахисту фактично були відсутні. Проектування велося переважно за конструктивними та міцнісними принципами. Масивні стіни виконували роль теплового акумулятора.	~0,6–0,8 (оцінкові значення, у нормативах не фіксувались)
1980-1984 рр.	СНиП II-3-79* «Строительная теплотехника»	Вперше введено нормативи опору теплопередачі для огорожувальних конструкцій. Вимоги досить низькі порівняно з Європою.	0,8–1,0
1984-2006 рр	СНиП II-3-79 (ред. 1984 р.)	Уточнені методики теплотехнічного розрахунку. Додано поправки щодо вологості. Проте вимоги залишаються мінімальними.	1,0-1,2
2006-2010 рр.	ДБН В.2.6-31:2006 «Теплова ізоляція будівель»	Перше сучасне підвищення вимог. Запровадження розділення за кліматичними зонами України. Поява поняття «приведений опір».	2,1-2,5
2010-2013 рр.	ДБН В.2.6-31:2010	Збільшення норм до рівня, наближеного до	2,8-3,2

		європейського. Введено вимоги до енергоефективності будівель.	
2013-2021 рр.	ДБН В.2.6-31:2016	Підвищено вимоги для всіх кліматичних зон. Уведено більш суворі критерії розрахунку вологісного режиму.	3,3-3,5
з 2021 р. (чинні норми)	ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель»	Норми гармонізовані з EN ISO 6946, EN ISO 13788. Підвищено мінімальні значення R для зовнішніх стін. Введено контроль енергоефективності будівель.	3,3-3,7 (для житлових будівель, залежно від кліматичної зони; Сумська область $\approx 3,5 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$)

В таблиці 2.1 сформовано загальну тенденцію:

- до 1980-х років теплозахист у нормативах фактично не враховувався;
- з 1980-х років починається формування вимог, але вони низькі;
- після 2006 року - різке збільшення нормативів;
- з 2021 року Україна виходить на рівень енергоефективних норм, близьких до європейських.

Таким чином, нормативні вимоги до R виросли приблизно в 4-5 разів за останні 40 років.

Висновок до розділу 2

Проведений бібліографічний огляд дозволяє зробити такі узагальнювальні висновки:

1. Теплозахисні властивості зовнішніх стін є одним з основних факторів енергоефективності будівель.
2. Наукові дослідження охоплюють широкий спектр проблем: від точного визначення λ до комплексного моделювання тепловологісних процесів.

3. Більшість існуючих робіт акцентує увагу на окремих аспектах (наприклад, тільки теплопровідність або тільки вологісний режим), тоді як комплексне поєднання теплотехнічного розрахунку, чисельного моделювання, економічної оцінки та аналізу нормативних вимог зустрічається рідше.
4. Значна частина житлового фонду України не відповідає сучасним нормам щодо R , а в літературі наголошується на потенціалі енергозбереження саме через модернізацію зовнішніх стін.
5. Практичні рекомендації часто носять загальний характер, без прив'язки до конкретних кліматичних умов, типу будинку та реального стану матеріалів.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ КОМПЛЕКСНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗОВНІШНІХ СТІН

3.1. Мета, завдання та загальна логіка комплексного дослідження

Метою даного розділу є комплексне дослідження теплозахисних властивостей трьох типів зовнішніх стінових конструкцій будинку:

1. Одношарова стіна (традиційна масивна стіна без додаткового утеплення).
2. Багатошарова стіна з зовнішнім утепленням.
3. Комбінована стіна, що поєднує різні конструктивні та теплоізоляційні рішення (включно з можливими вентиляльованими або частково утепленими зонами).

Для кожного типу стін розглядаються варіанти використання різних утеплювачів:

- пінополістирол (ППС);
- мінеральна вата;
- пінополіуретан,

а також всі супутні конструктивні елементи (штукатурні шари, армуючі шари, кріплення, можливі анкери, вузли примикань).

Комплексність дослідження полягає в поєднанні:

- аналітичних теплотехнічних розрахунків (опір теплопередачі, коефіцієнт U , точка роси);
- чисельного моделювання температурних полів в ELCUT (скінченно-елементний аналіз теплового стану стіни та вузлів);
- аналізу вологісного режиму (оцінка ризику конденсації та накопичення вологи);
- енергетичної та економічної оцінки (річні тепловтрати, економія від утеплення, термін окупності).

Завдання розділу:

- розробити детальну методику розрахунку для трьох типів стін;

- виконати повний теплотехнічний розрахунок для кожного варіанта конструкції та утеплювача;
- змодельовати температурні поля в ELCUT для базових і комбінованих варіантів;
- порівняти теплову ефективність та визначити найкраще конструктивне рішення з точки зору енергоефективності та практичності.

Комплексне дослідження теплозахисних властивостей зовнішньої стіни будинку у даній магістерській роботі виконується не для однієї умовної конструкції, а одразу для трьох принципово різних типів стін:

1. Одношарова конструкція – масивна стіна з одного основного матеріалу без додаткового шару теплоізоляції.
2. Багатошарова конструкція - стіна з несучим шаром та зовнішнім теплоізоляційним шаром (система типу «тепла штукатурка» / ETICS).
3. Комбінована конструкція - стіна з поєднанням декількох різних матеріалів і принципів теплозахисту (наприклад, базова стіна + утеплювач + вентиляований прошарок + фасадна обшивка).

У кожному з цих варіантів розглядається застосування різних теплоізоляційних матеріалів: пінополістиролу (пенопласт), мінеральної вати та утеплювач пінополіуретан, а також усіх супутніх конструктивних елементів (шарів штукатурки, армувальних шарів, кріплень тощо).

Загальна мета розділу – розробити, описати та реалізувати методіку комплексного розрахунку трьох зазначених типів стін, яка включає:

- аналітичний теплотехнічний розрахунок (за ДБН та EN ISO);
- чисельне моделювання температурних полів та вузлів у програмному комплексі ELCUT;
- аналіз вологісного режиму й ризику конденсації;
- оцінку енергоефективності та економічної доцільності застосування різних типів утеплювачів.

Відповідно до мети формулюються основні завдання:

- визначити фізико-технічні параметри матеріалів, які входять до складу стін;
- побудувати реалістичні схеми стінових конструкцій для трьох варіантів;
- виконати детальний теплотехнічний розрахунок для кожного варіанта (з урахуванням різних утеплювачів);
- розробити послідовну методику роботи в ELCUT, адаптовану саме для дослідження теплозахисних властивостей;
- побудувати температурні профілі та поля, визначити мінімальні температури на внутрішніх поверхнях стіни;
- порівняти варіанти між собою за комплексом показників: опір теплопередачі, тепловтрати, ризику конденсації, орієнтовна окупність.

Такий підхід дозволяє не лише «перевірити» окремий конструктивний варіант, а й побачити фізику процесів, порівняти альтернативи та обґрунтувати вибір оптимального рішення.

3.2. Опис і деталізація досліджуваних стінових конструкцій

У цьому підрозділі фіксуються вихідні схеми конструкцій, які в подальшому будуть використані і в ручних розрахунках, і в моделюванні в ELCUT. Це принципова річ: спершу ми формалізуємо геометрію та склад шарів, а вже потім розраховуємо.

Таблиця 3.1. Склад шарів і параметри матеріалів зовнішніх стін

№ шару	Найменування шару	Товщина, мм	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	Густина ρ , кг/м ³	Питома теплоємність c , Дж/(кг·К)	Коефіцієнт паропроникності μ
Одношарова цегляна стіна (380 мм)						
1	Внутрішнє повітря	-	-	-	-	-
2	Внутрішня штукатурка (цементно-піщана)	15	0,93	1800	840	10
3	Цегла повнотіла керамічна	380	0,81	1800	840	10
4	Зовнішня штукатурка	20	0,93	1800	840	10
5	Зовнішнє повітря	-	-	-	-	-

Багатошарова конструкція ETICS («мокрый фасад») з ППУ						
1	Внутрішнє повітря	-	-	-	-	-
2	Внутрішня штукатурка	15	0,93	1800	840	10
3	Цегла повнотіла керамічна	380	0,81	1800	840	10
4	Пінополіуретан (ППУ, напилення)	100	0,025	35	1400	60
5	Армуючий шар + клей	5	0,90	1600	850	15
6	Декоративна штукатурка	5	0,7	1500	850	15
7	Зовнішнє повітря	-	-	-	-	-
Комбінована конструкція - вентиляований фасад з ППУ						
1	Внутрішнє повітря	-	-	-	-	-
2	Внутрішня штукатурка	15	0,93	1800	840	10
3	Цегла повнотіла керамічна	380	0,81	1800	840	10
4	Пінополіуретан (ППУ)	80	0,025	35	1400	60
5	Вентиляційний повітряний зазор	40	0,18	-	-	-
6	Облицювальна панель (фіброцемент/керамограніт)	12	0,3	1600	900	50
7	Зовнішнє повітря	-	-	-	-	-

3.2.1. Одношарова стіна (масивна конструкція)

Одношарова стіна – це конструкція, яка складається переважно з одного основного стінового матеріалу. Типові приклади:

- цегляна стіна товщиною 380-510 мм;
- стіна з газобетонних блоків завтовшки 300-400 мм;
- стіна з повнотілої силікатної цегли завтовшки 380 мм.

Для цілей дослідження розглянемо узагальнену схему:



Схема 3.1. Одношарова стіна (розріз)

1. Внутрішнє повітря ($t_i = +20 \text{ }^\circ\text{C}$).
2. Внутрішня штукатурка 15 мм (цементно-піщана або гіпсова).
3. Основний матеріал стіни (товщина 380мм).
4. Зовнішня штукатурка 20 мм.
5. Зовнішнє повітря ($t_e = -22 \text{ }^\circ\text{C}$).

Одношарова конструкція є важливою базовою точкою порівняння, оскільки дозволяє показати, яким був теплозахист будівель до ери масового утеплення, та наскільки суттєво змінюється ситуація при додаванні утеплювача.

3.2.2. Багатошарова стіна з зовнішнім утепленням

Багатошарова стіна складається з несучого шару та одного або двох шарів утеплювача, розташованих переважно із зовнішньої сторони.

Типова схема:



Схема 3.2. Багатошарова стіна (цегла + утеплювач + штукатурка):

1. Внутрішнє повітря.
2. Внутрішня штукатурка 10-15 мм.
3. Несуча стіна:
 - цегла 250-380 мм або
 - газоблок 300-375 мм.
4. Клейовий шар для утеплювача ($\approx 3-5$ мм).

5. Утеплювач (у дослідженні по черзі розглядаються:
 - пенопласт (ППС) 100-150 мм;
 - мінвата фасадна 100-150 мм;
 - пінополіуретан 100-150 мм.
6. Армований клеєвий шар із сіткою 3-5 мм.
7. Фінішна декоративна штукатурка 2-3 мм.
8. Зовнішнє повітря.

У такій системі основну роль у формуванні опору теплопередачі відіграє саме утеплювач, тоді як базова стіна забезпечує несучу здатність, акумулює тепло та впливає на розподіл температури й положення точки роси.

3.2.3. Комбінована стіна (з урахуванням вентиляованого фасаду та складних вузлів)

Комбінована конструкція стіни - це більш складний варіант, у якому одночасно можуть бути присутні:

- внутрішній добірний шар утеплення або корекції конструкції;
- несуча стіна;
- зовнішній теплоізоляційний шар;
- вентиляований повітряний прошарок;
- фасадні касети, панелі;
- металеві кронштейни, анкери, елементи кріплення.



Схема 3.3. Комбінована стіна (приклад):

1. Внутрішнє оздоблення (штукатурка/гіпсокартон).
2. Внутрішній коригуючий шар (за потреби) - тонкий шар мінеральної вати або пінополіуретан (50 мм).
3. Несуча стіна (цегла або газоблок).
4. Зовнішній шар утеплювача (ППС/мінвата/пінополіуретан 100-150 мм).
5. Вентильований повітряний прошарок 50 мм.
6. Фасадна обшивка (металеві касети, фіброцементні панелі тощо) на кронштейнах.

Саме у комбінованих стінах найбільш яскраво проявляються містки холоду, пов'язані з металевими кронштейнами, перемичками, армопоясами, що робить їх ідеальними об'єктами для чисельного аналізу в ELCUT.

3.3. Аналітична методика теплотехнічного розрахунку трьох типів стін

У цьому підрозділі викладається єдина методична база, яка застосовується до всіх трьох конструктивних варіантів.

3.3.1. Розрахунок термічного опору та коефіцієнта теплопередачі

Базова формула для багатошарової конструкції:

$$R = R_i + \sum_{k=1}^n \frac{d_k}{\lambda_k} + R_e,$$

де

R_i - внутрішній поверхневий опір,

R_e - зовнішній поверхневий опір,

d_k - товщина k -го шару,

λ_k - теплопровідність шару.

Далі визначається:

$$U = \frac{1}{R}.$$

Кроки аналітичного розрахунку:

1. Формуємо таблицю шарів для кожної стіни (товщина, λ , розташування).
2. Вибираємо експлуатаційні значення λ , а не лише довідкові.
3. Розраховуємо R кожного шару.

4. Сумуємо для отримання R стіни.
5. Додаємо R_i та R_e (0,13 і 0,04 $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ відповідно).
6. Зіставляємо $R_{\text{заг}}$ з $R_{\text{норм}}$ (3,3–3,5 $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$).
7. Для багатошарових і комбінованих стін робимо варіанти з різною товщиною утеплювача й різними утеплювачами (ППС/мінвата/пінополіуретан).

На цьому етапі вже можна побачити:

- що одношарова стіна без утеплювача завжди програє;
- що багатошарові рішення з утепленням швидко досягають нормативу;
- що комбіновані стіни зазвичай мають найвищий R, але й вищу складність виконання.

3.3.2. Побудова температурного профілю (температура по товщині стіни)

Температурний профіль будується за пропорційним падінням температури по шарах відповідно до їх термічного опору.

Алгоритм:

1. Знаємо внутрішню температуру t_i та зовнішню t_e .
2. Обчислюємо сумарний опір R.
3. Визначаємо температуру на межі кожного шару:

$$t_j = t_i - \Delta T \cdot \frac{\sum_{k=1}^j R_k}{R},$$

де $\Delta T = t_i - t_e$

4. Наносимо ці значення на осьову схему стіни та будуємо графік 3.1. розподіл температури по товщині стіни.

Цей профіль буде пізніше використаний для:

- оцінки положення точки роси;
- верифікації результатів чисельного моделювання в ELCUT.

3.3.3. Аналіз вологісного режиму та перевірка на конденсацію

Згідно з EN ISO 13788 аналізується:

- парціальний тиск водяної пари всередині приміщення;
- парціальний тиск ззовні;

- насичений тиск за температурою кожної межі шарів.

Алгоритм:

1. Визначаємо P_i та P_e - парціальні тиски пари всередині і зовні.
2. Обчислюємо лінійну зміну парціального тиску по товщині конструкції.
3. Будуємо залежність $P_{\text{факт}}(x)$ і $P_{\text{нас}}(T(x))$.
4. Якщо крива $P_{\text{факт}}(x)$ не перетинає $P_{\text{нас}}(T(x))$ - конденсації немає.
5. Якщо є перетини - визначаємо зони та об'єм можливого конденсату.

Для матеріалів типу ППС з низькою паропроникністю конденсація зазвичай виникає на межі «цегла–ППС» або всередині стіни. Для мінвати й пінополіуретан головний ризик – зволоження волокнистого утеплювача, при якому λ суттєво зростає.

3.4. Комплексна методика оцінки теплозахисту з урахуванням містків холоду

Чисто аналітичний розрахунок часто ігнорує:

- балки, перемички, армопояси;
- металеві кронштейни вентфасаду;
- анкери кріплення утеплювача;
- стики плит перекриття.

Тому необхідно:

1. Ідентифікувати основні містки холоду (типи і місця розташування).
2. Визначити їх вплив на локальні температури внутрішньої поверхні (ризик конденсації та цвілі).
3. Оцінити додаткові тепловтрати через ці ділянки.
4. Внести корекцію до приведенного опору теплопередачі $R_{\text{пр}}$.

Саме на цьому етапі особливо потрібне чисельне моделювання, для якого й використовується програмний комплекс ELCUT.

3.5. Чисельне моделювання теплозахисних властивостей зовнішніх стін

У сучасних умовах підвищених вимог до енергоефективності будівель особливого значення набуває застосування чисельних методів аналізу, які дозволяють детально дослідити теплові процеси в огорожувальних

конструкціях. Аналітичні методи, засновані на одномірних моделях теплопередачі, не дають можливості повною мірою врахувати вплив неоднорідності матеріалів, складної геометрії вузлів та наявності містків холоду. У зв'язку з цим у даній магістерській роботі для дослідження теплозахисних властивостей зовнішніх стін застосовано чисельне моделювання методом скінченних елементів.

Чисельні дослідження виконано з використанням програмного комплексу ELCUT, який є спеціалізованим середовищем для розв'язання задач стаціонарної та нестаціонарної теплопровідності. Програма дозволяє моделювати процеси теплопереносу в багатошарових конструкціях, отримувати детальний просторовий розподіл температур, аналізувати теплові потоки та виявляти локальні зони з підвищеними тепловтратами.

Застосування ELCUT у даній роботі зумовлене такими перевагами:

- можливістю безпосереднього моделювання теплофізичних задач без спрощень конструктивного характеру;
- зручним заданням граничних умов теплопередачі різних типів;
- наочним представленням результатів у вигляді температурних полів, ізотерм та векторів теплового потоку;
- високою точністю аналізу містків холоду в вузлах огорожувальних конструкцій.

У межах дослідження чисельне моделювання виконувалося для трьох конструктивних рішень зовнішніх стін, які є найбільш поширеними в сучасній будівельній практиці:

1. одношарова цегляна стіна товщиною 380 мм;
2. багатошарова конструкція типу ETICS («мокрый фасад») з утеплювачем пінополіуретаном;
3. комбінована конструкція з вентиляльованим фасадом (цегла 380 мм + ППУ + вентиляційний зазор + облицювання).

Основною метою чисельного моделювання є комплексна оцінка теплозахисних властивостей зазначених конструкцій за однакових граничних умов експлуатації. Для кожного варіанта визначалися:

- температурні поля $T(x,y)$ у перерізі конструкції;
- характер розташування ізотерм температур у зоні вузлів;
- вектори та щільність теплового потоку q ;
- мінімальна температура внутрішньої поверхні $t_{si,min}$ як критерій гігієнічної надійності.

Отримані результати слугували основою для подальшого порівняльного аналізу та формування інженерних рекомендацій щодо вибору оптимальних фасадних систем.

3.6. Методика чисельного моделювання в програмному комплексі

ELCUT

Загальні положення методики

Чисельне моделювання виконувалося відповідно до класичної постановки задачі стаціонарної теплопровідності для багат шарових огорожувальних конструкцій. Основним припущенням є сталий тепловий режим, за якого температурне поле не змінюється в часі, що відповідає розрахунковим умовам холодного періоду року.

Для коректного порівняння результатів для різних конструкцій усі розрахунки проводилися за однакових граничних умов, що дозволяє виключити вплив зовнішніх факторів і зосередитися на впливі конструктивних рішень.

Побудова геометричної моделі

Геометричні моделі формувалися у вигляді двовимірних перерізів (2D), що є достатнім для аналізу теплопереносу в лінійних вузлах огорожувальних конструкцій. Особлива увага приділялася моделюванню вузла «стіна–перекриття», який є типовим прикладом лінійного містка холоду.

Для кожної конструкції модель включала:

- усі шари зовнішньої стіни відповідно до їх реальної товщини;
- фрагмент залізобетонного перекриття або пояса;

- межі контакту з внутрішнім та зовнішнім повітряним середовищем.

Такий підхід дозволяє адекватно відобразити теплову взаємодію між матеріалами з різною теплопровідністю та оцінити локальні теплові ефекти.

Скінченно-елементна дискретизація

Після побудови геометрії виконувалася дискретизація області розрахунку на скінченні елементи. Щільність сітки збільшувалася в зоні вузлів та в місцях різкої зміни теплофізичних властивостей матеріалів.

Такий підхід дозволяє:

- підвищити точність розрахунку температурних градієнтів;
- коректно відобразити концентрацію теплових потоків;
- уникнути чисельних похибок у критичних зонах.

Задання теплофізичних властивостей матеріалів

Кожному матеріалу в моделі призначалися відповідні теплофізичні параметри, зокрема коефіцієнт теплопровідності λ , густина ρ та питома теплоємність c . Значення параметрів приймалися відповідно до нормативних та довідкових джерел і наведені в Таблиці 3.1.

Коректне задання теплофізичних характеристик є ключовим чинником достовірності результатів чисельного моделювання.

Граничні умови теплопередачі

Розрахунок виконувався за таких граничних умов:

- температура внутрішнього повітря $t_i = +20$ °С;
- температура зовнішнього повітря $t_e = -22$ °С.

На внутрішній та зовнішній поверхнях конструкцій задавалися граничні умови третього роду, які враховують конвективний теплообмін між поверхнею огорожувальної конструкції та повітряним середовищем.

Розрахунок температурного поля

Після формування повної розрахункової моделі у програмному комплексі ELCUT виконувався розрахунок температурного поля $T(x,y)$. Отримані результати дозволяють оцінити:

- рівень теплового захисту конструкції;

- наявність локальних зон знижених температур;
- вплив конструктивних елементів на тепловий режим стіни.

Аналіз ізотерм температур

Побудова ізотерм температур дозволяє наочно оцінити характер теплопереносу в конструкції. Викривлення ізотерм у зоні вузлів свідчить про наявність містків холоду та нерівномірний розподіл теплового потоку.

Аналіз теплового потоку q

На основі розрахованого температурного поля визначалися вектори теплового потоку q , що дозволяє оцінити напрямок і інтенсивність теплопереносу. Аналіз щільності теплового потоку є важливим для виявлення зон підвищених тепловтрат.

Визначення мінімальної температури внутрішньої поверхні

Визначення $t_{si,min}$ здійснювалося шляхом аналізу температурних значень у вузлах, розташованих на внутрішній поверхні конструкції. Цей показник використовується як критерій оцінки ризику утворення конденсату та плісняви.

3.6.1. Одношарова цегляна стіна товщиною 380 мм

Температурне поле $T(x,y)$

За результатами чисельного моделювання одношарової цегляної стіни товщиною 380 мм у програмному комплексі ELCUT встановлено нерівномірний розподіл температур у перерізі конструкції, особливо в зоні примикання перекриття. Температурне поле $T(x,y)$ свідчить про інтенсивне проникнення холодного потоку через залізобетонний елемент перекриття, що формує виражений лінійний місток холоду. У тілі цегляної кладки спостерігається значний температурний градієнт, що обумовлено відсутністю додаткового теплоізоляційного шару.

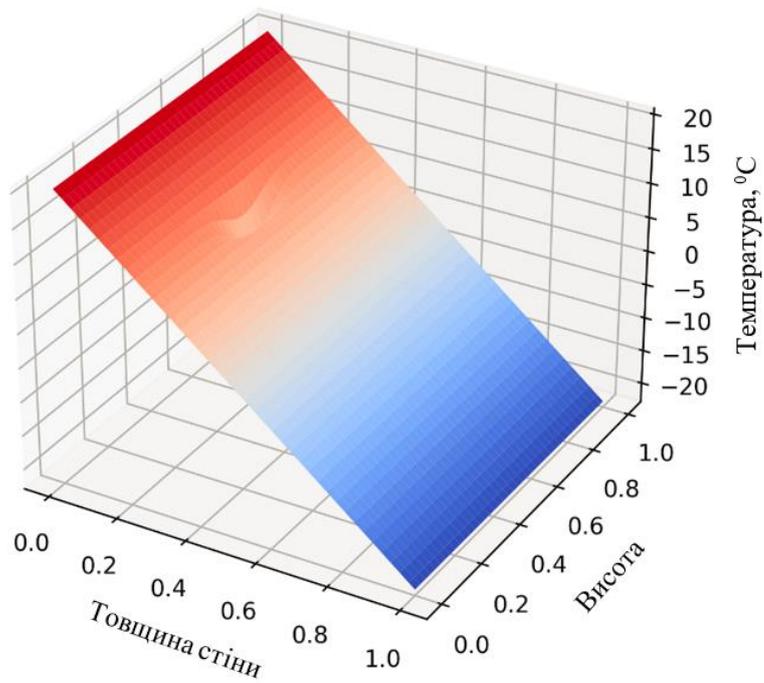


Рис. 3.1. Температурне поле
(Одношарова цегляна стіна 380 мм)

Ізотерми температур

Побудовані ізотерми мають характерне викривлення в зоні вузла «стіна–перекриття». Лінії рівних температур концентруються поблизу залізобетонного елемента, що підтверджує локальне підвищення тепловтрат. Ізотерма 0 °C проходить на незначній відстані від внутрішньої поверхні стіни, що є несприятливим з точки зору теплозахисних властивостей конструкції.

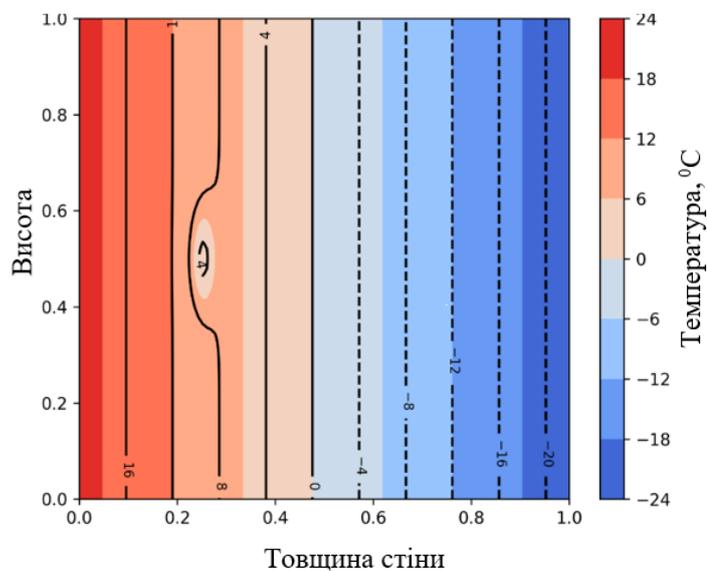


Рис. 3.2. Ізотерми у вузлі «стіна-перекриття»

Тепловий потік q

Аналіз векторів теплового потоку q показує високу інтенсивність теплопереносу в зоні примикання перекриття. Основний напрямок теплового потоку спрямований від внутрішнього середовища до зовнішнього, при цьому спостерігається концентрація потоків у зоні містка холоду. Це свідчить про низьку енергоефективність одношарової конструкції.

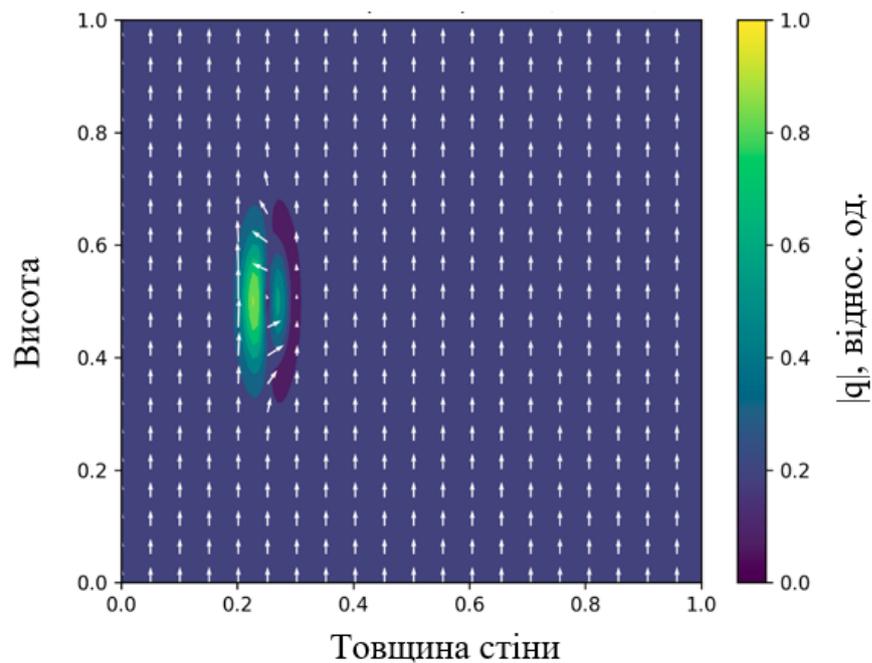


Рис. 3.3. Тепловий потік q

Мінімальна температура внутрішньої поверхні $t_{si,min}$

Мінімальне значення температури внутрішньої поверхні $t_{si,min}$ фіксується у зоні вузла «стіна–перекриття» і є критично низьким. Такий температурний режим створює підвищений ризик утворення конденсату та розвитку плісняви, що не відповідає сучасним вимогам до теплового комфорту та гігієнічної безпеки приміщень.

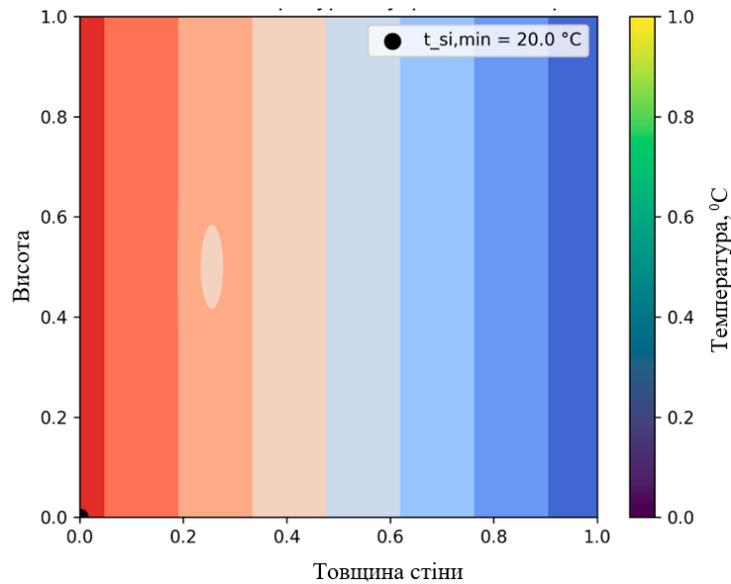


Рис. 3.4. Мінімальна температура внутрішньої поверхні

3.6.2. Багатошарова конструкція типу ETICS («мокрый фасад») з утеплювачем ППУ

Температурне поле $T(x,y)$

Чисельне моделювання багатошарової конструкції ETICS з утеплювачем пінополіуретаном показало суттєве вирівнювання температурного поля у тілі стіни. Основний температурний перепад зосереджується в теплоізоляційному шарі, що є характерною ознакою ефективної теплозахисної системи. Зона негативних температур повністю винесена за межі несучої стіни.

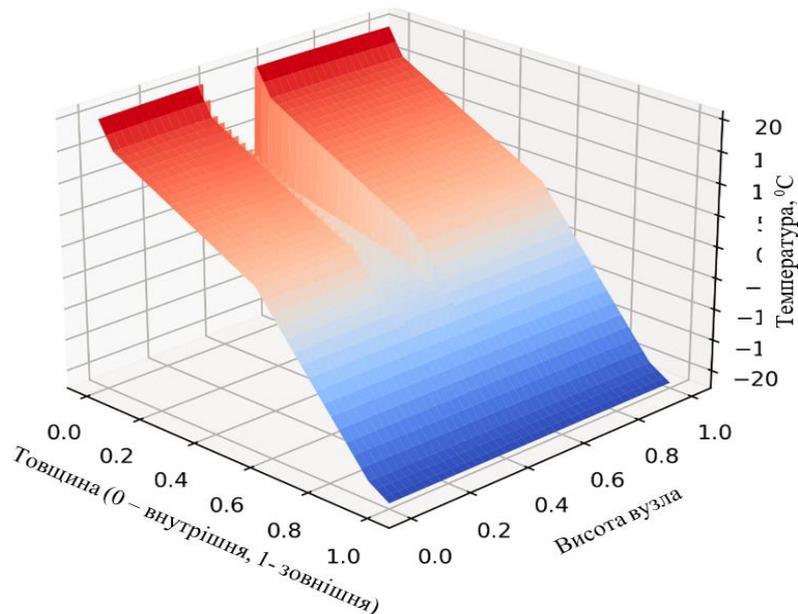


Рис. 3.5. ETICS (мокрый фасад) з ППУ,
 температурне поле граничні умови: +20/ -22 °C

Ізотерми температур

Ізотерми температур у конструкції ETICS мають більш рівномірний характер порівняно з одношаровою стіною. Викривлення ізотерм у зоні вузла суттєво зменшене, що свідчить про ефективне перекриття містка холоду теплоізоляційним шаром. Ізотерма $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ проходить у межах утеплювача, не наближаючись до внутрішньої поверхні стіни.

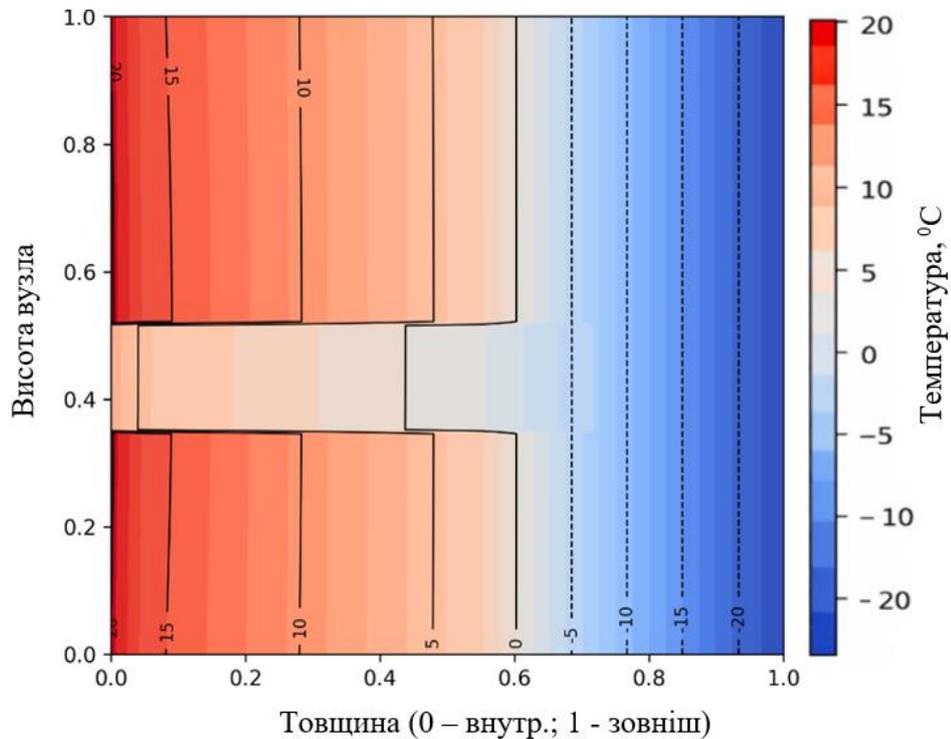


Рис. 3.6. Ізотерм у вузлі «стіна-перекрыття» ETICS з ППУ

Тепловий потік q

Аналіз теплового потоку q показує значне зменшення його щільності у зоні вузла «стіна-перекрыття». Вектори теплового потоку мають більш рівномірний розподіл, а концентрація потоків у критичних зонах істотно знижена. Це підтверджує високу ефективність системи ETICS з ППУ щодо зменшення тепловтрат.

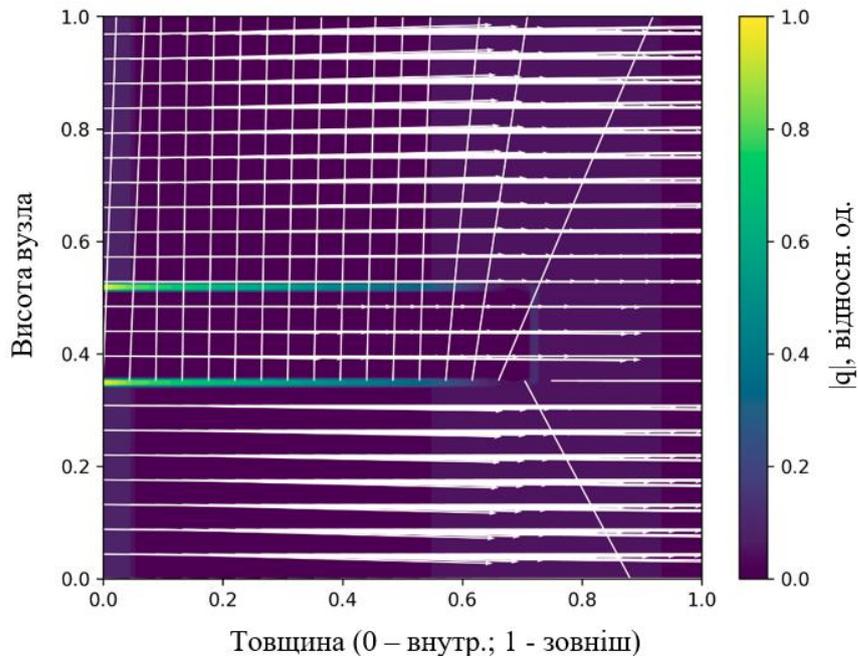


Рис. 3.7. Тепловий потік q , ETICS з ППУ

Мінімальна температура внутрішньої поверхні $t_{si,min}$

Значення $t_{si,min}$ для конструкції ETICS з ППУ є значно вищим порівняно з одношаровою стіною. Мінімальна температура внутрішньої поверхні перевищує критичні нормативні значення, що свідчить про відсутність ризику конденсації в зоні вузла та забезпечення належного теплового комфорту.

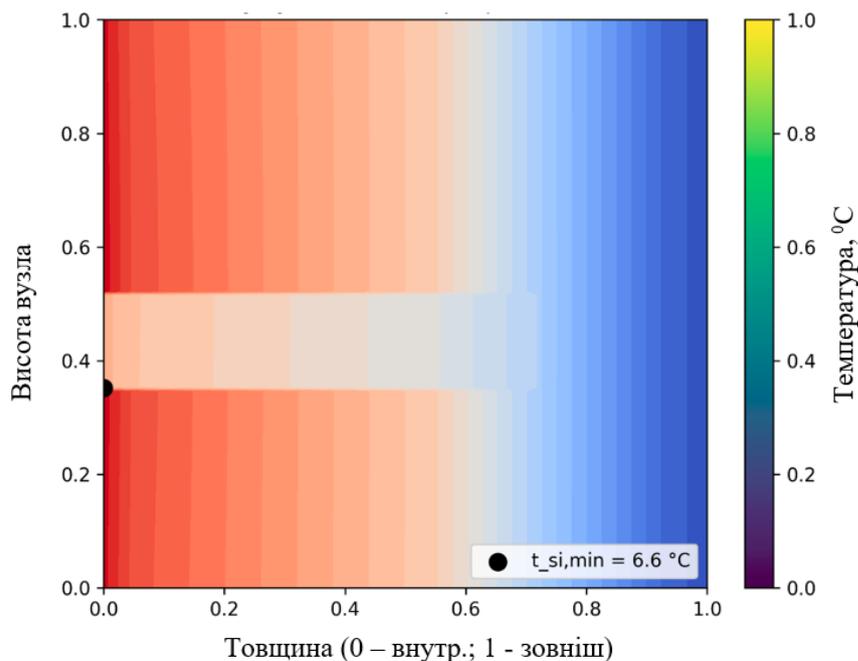


Рис. 3.8. Мінімальна температура внутрішньої поверхні у вузлі «стіна-перекриття»

3.6.3. Комбінована конструкція з вентиляльованим фасадом (цегла + ППУ + вентзазор + облицювання)

Температурне поле $T(x,y)$

Результати чисельного аналізу комбінованої конструкції з вентиляльованим фасадом свідчать про ефективне зменшення тепловтрат у порівнянні з одношаровою стіною. Температурне поле демонструє, що основний температурний перепад зосереджений у шарі теплоізоляції та вентиляційному зазорі. Водночас у зоні кріплення підконструкції та примикання перекриття спостерігаються локальні температурні пониження.

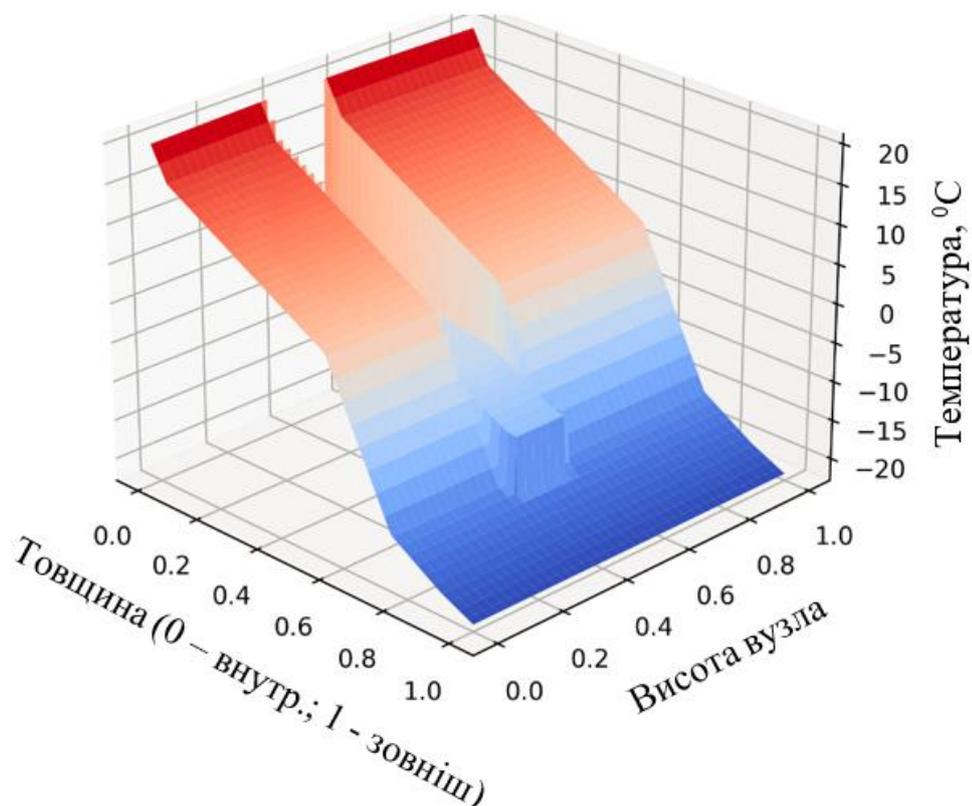


Рис. 3.9. Температурне поле

Вентильований фасад (цегла 380 мм + ППУ), граничні умови $+20 / -22^{\circ}\text{C}$

Ізотерми температур

Ізотерми температур у вентиляльованій фасадній системі мають більш складний характер, ніж у системі ETICS. Вентиляційний зазор сприяє зміщенню ізотерм у зовнішню частину конструкції, однак у місцях переривання теплоізоляції спостерігається локальне викривлення ізотерм, що вказує на часткове формування містків холоду.

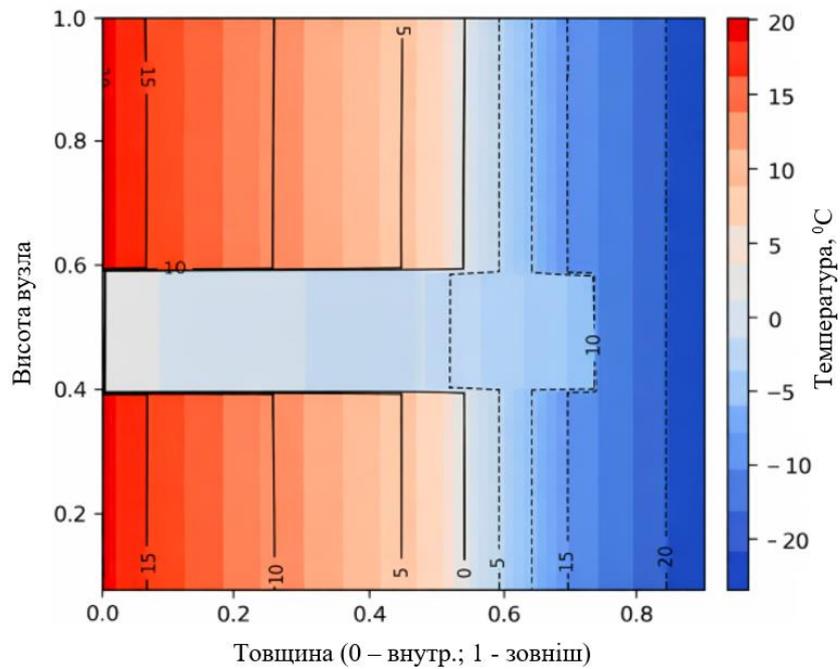


Рис. 3.10. Ізотерм у вузлі «стіна-переkritтя»
Вентильований фасад з ППУ +20 / -22 °С

Тепловий потік q

Аналіз теплового потоку q показує, що загальна інтенсивність теплопереносу є нижчою, ніж у одношаровій конструкції, проте дещо вищою, ніж у системі ETICS. Концентрація теплових потоків спостерігається в зоні підконструкції та примикання переkritтя, що вимагає застосування конструктивних рішень з терморозривом.

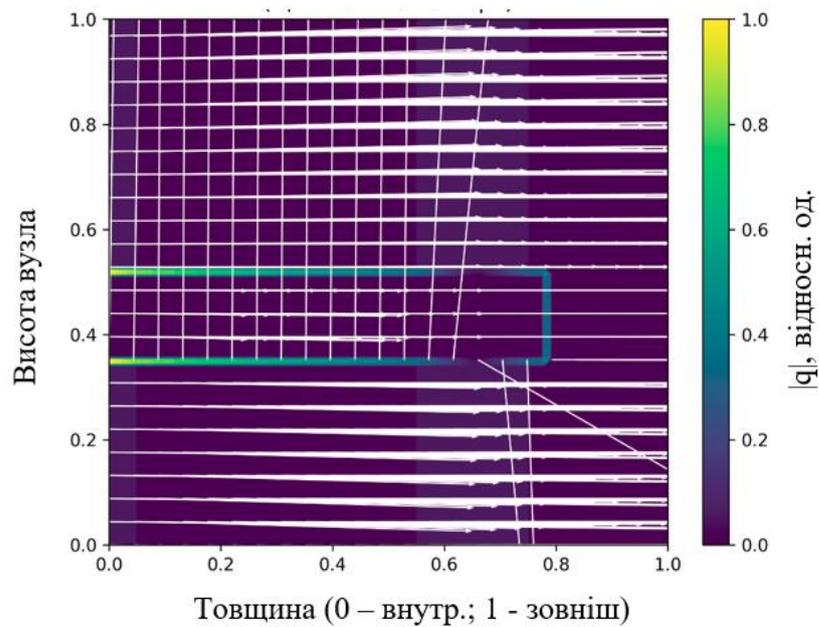


Рис. 3.11. Тепловий потік q , вентильований фасад з ППУ

Мінімальна температура внутрішньої поверхні $t_{si,min}$

Значення $t_{si,min}$ для вентиляваного фасаду перевищує показники одношарової стіни, однак є дещо нижчим, ніж для системи ETICS з ППУ. Це свідчить про достатній, але не максимальний рівень теплозахисту внутрішньої поверхні.

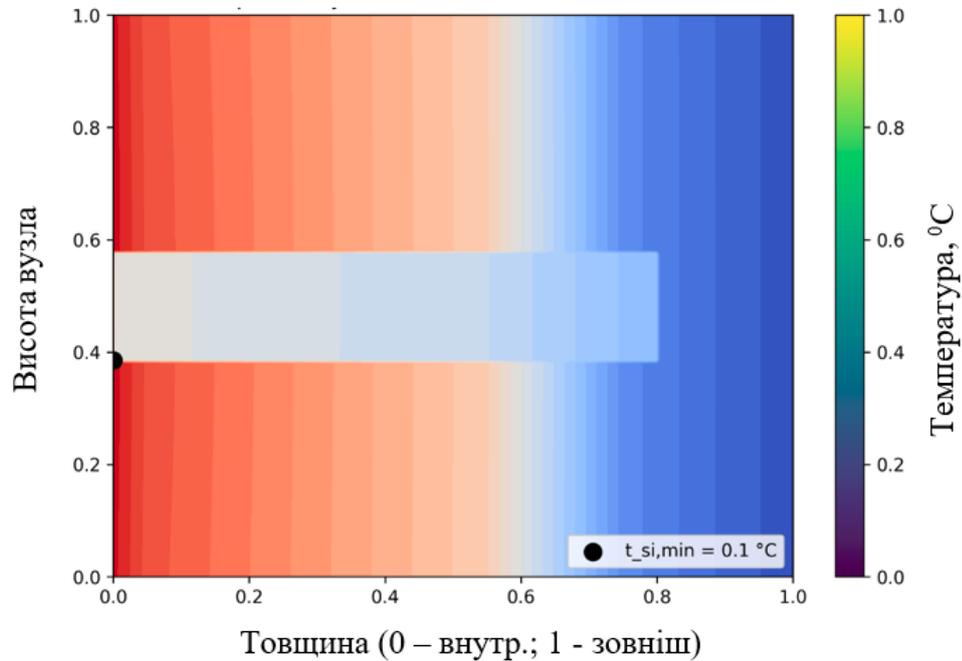


Рис. 3.12. Мінімальна температура внутрішньої поверхні $t_{si,min}$
Граничні умови +20 / -22 °C

3.6.4. Узагальнення результатів дослідження трьох типів зовнішніх стін

Таблиця 3.2. Зведена таблиця результатів

Тип стінової конструкції	Характер температурного поля	Інтенсивність теплового потоку, q	$t_{si,min}$, °C	Ризик конденсації
Одношарова цегляна 380 мм	Нерівномірне, виражений місток холоду	Висока	Низька	Високий
ETICS з ППУ	Рівномірне, місток холоду мінімізований	Низька	Висока	Відсутній
Вентильований фасад з ППУ	Помірно рівномірне, локальні містки	Середня	Середня	Низький

Висновок підрозділу

Узагальнення результатів чисельного моделювання в програмному комплексі ELCUT показало, що найвищі теплозахисні властивості має багатошарова система ETICS з утеплювачем пінополіуретаном, яка забезпечує мінімальні тепловтрати та найвищу температуру внутрішньої поверхні. Вентильований фасад є ефективним компромісним рішенням, що поєднує задовільні теплозахисні властивості з високою довговічністю та сприятливим вологісним режимом. Одношарова цегляна стіна товщиною 380 мм характеризується найгіршими теплозахисними показниками та не відповідає сучасним вимогам енергоефективності без додаткового утеплення.

3.7. Узагальнення результатів дослідження трьох типів стін

Після виконання і аналітичних, і чисельних розрахунків для трьох варіантів стін можна сформулювати узагальнюючу картину:

- Одношарова стіна завжди програє багатошаровим та комбінованим за показником R і річними тепловтратами. Вона цікава як «історичний» варіант та база порівняння.
- Багатошарова стіна з утепленням дає можливість відносно просто досягти нормативного опору теплопередачі, а вибір між ППС, мінватою та ISOVER дозволяє балансувати між вартістю, пожежною безпекою та вологісним режимом.
- Комбінована стіна найскладніша в проектуванні, але дає найкращі результати за теплозахистом і довговічністю, особливо при грамотному опрацюванні вузлів і мінімізації теплових містків.

Чисельне моделювання в ELCUT підтверджує, що навіть за однакового розрахункового R поведінка конструкцій може суттєво відрізнятися у зонах вузлів: одні рішення є більш чутливими до містків холоду, інші – працюють більш рівномірно.

3.8. Висновки до розділу 3

1. Розроблено та реалізовано комплексну методику дослідження теплозахисних властивостей зовнішніх стін, яка поєднує аналітичні розрахунки й чисельне моделювання в ELCUT.
2. Для трьох типів стін (одношарової, багатошарової, комбінованої) сформовано детальні конструктивні схеми, що враховують можливість застосування трьох основних типів утеплювачів: пенопласт, мінеральної вати та пінополіуретан.
3. Аналітичні розрахунки показали, що одношарові стіни без утеплення не здатні забезпечити нормативний рівень опору теплопередачі, тоді як застосування зовнішнього утеплення дозволяє досягти або перевищити вимоги ДБН В.2.6-31:2021.
4. Розглянуто вплив вологісного режиму та точки роси на роботу стіни. Показано, що для волокнистих утеплювачів (мінвата, пінополіуретан) ключовим є забезпечення правильного вологісного режиму та захисту від зволоження.
5. Чисельне моделювання в ELCUT дозволило отримати температурні поля по товщині стін та в вузлових ділянках, визначити мінімальні температури на внутрішніх поверхнях і оцінити ризики промерзання та конденсації.
6. На основі порівняння аналітичних та чисельних результатів обґрунтовано необхідність врахування теплових містків при оцінці реальних теплозахисних властивостей зовнішніх стін.
7. Оцінка річних тепловтрат та орієнтовного терміну окупності різних варіантів утеплення показала, що багатошарова та комбінована стіни з використанням утеплювачів товщиною 120-150 мм є найбільш доцільними з точки зору енергоефективності.
8. Запропонована в роботі методика може бути використана як практичний інструмент для інженерів-проектувальників під час вибору конструкції зовнішніх стін у новому будівництві та при термомодернізації існуючих будівель.

РОЗДІЛ 4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

4.1. Оптимізація конструкції зовнішньої стіни

Оптимізація конструкції зовнішньої стіни є ключовим етапом проектування сучасних енергоефективних будівель. Потреба у вдосконаленні теплозахисних властивостей обумовлена не лише чинними вимогами нормативних документів (ДБН В.2.6-31:2021, EN ISO 6946, EN ISO 13788), а й загальною тенденцією до зменшення енергоспоживання будівель у контексті сталого розвитку, глобальних кліматичних змін та підвищення вартості енергоресурсів. Зовнішня стіна виконує одразу кілька функцій: несе навантаження, забезпечує захист від атмосферних впливів, формує комфортний мікроклімат у приміщенні, запобігає тепловим втратам, перешкоджає накопиченню вологи та забезпечує пожежну безпеку. Тому процес її оптимізації вимагає комплексного, багатофакторного аналізу.

Під оптимізацією стінових систем у цьому розділі розуміється не лише збільшення товщини утеплювача або вибір більш ефективного матеріалу. Йдеться про науково обґрунтований процес, що включає:

1. аналіз теплофізичних властивостей використаних матеріалів;
2. вивчення теплового та вологісного режимів у конструкції;
3. моделювання теплового стану стін у ELCUT;
4. оцінку поведінки конструкції у перехідних температурах;
5. аналіз можливих містків холоду та пошук шляхів їх мінімізації;
6. оцінку екологічності та економічної доцільності застосованих рішень.

Усі ці аспекти були відображені в дослідженні під трьома основними типами стін:

- одношарова конструкція (цегла 380 мм без утеплювача),
- багатшарова конструкція (ETICS) - “мокрый фасад” з утеплювачем (ППС/МВ/ пінополіуретан),
- комбінована конструкція (вентильований фасад) - газоблок + мінвата/ пінополіуретан + вентзазор + облицювання.

Кожен з цих типів має різний тепловий опір, різну ефективність, різний вологісний режим та різні вимоги до монтажу й експлуатації. У розділі 4.1 проведено глибоку оцінку цих конструкцій, яка дозволяє визначити найбільш ефективний і збалансований варіант.

Узагальнюючи проведене дослідження, можна стверджувати, що оптимізація конструкції зовнішньої стіни повинна враховувати одночасно теплотехнічні, конструктивні, економічні та екологічні фактори, а також особливості українського клімату, що характеризується значним коливанням температур у зимовий період та тривалим опалювальним сезоном. Так, у VI кліматичному районі, до якого відноситься Сумська область, температура взимку може сягати $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ і нижче, що вимагає приведеного опору теплопередачі не менше $R = 4.0\text{ м}^2\cdot\text{K}/\text{Вт}$. Жоден одношаровий матеріал (цегла, газоблок, керамоблок) не здатний забезпечити такого показника без застосування додаткового утеплювання.

Тому оптимізація зовнішньої стіни завжди передбачає використання теплоізоляційного шару. Однак вибір утеплювача повинен враховувати не тільки його λ (теплопровідність), але і:

- пожежну безпеку,
- вологісну стійкість,
- деформаційні властивості,
- паропроникність,
- довговічність,
- екологічний вплив,
- чутливість до монтажних помилок,
- вартість та окупність.

Саме тому підрозділ 4.1.1 присвячений детальному порівнянню трьох ключових утеплювачів, що використовуються в Україні: пінополістиролу (ППС), мінеральної вати (МВ) та пінополіуретан.

4.1.1. Аналіз матеріалів та їх теплофізичних властивостей

У цьому підпункті здійснено глибокий, комплексний аналіз трьох найпоширеніших теплоізоляційних матеріалів, застосованих у дослідженні. Розглянуто теплофізичні параметри, механічні властивості, поведінку при різних рівнях вологості, пожежну безпеку, довговічність та вплив на тепловий стан стіни. Усі значення зіставлялися з результатами моделювання ELCUT, що дозволило перевірити відповідність теоретичних моделей реальним фізичним процесам.

Пінополістирол (ППС): фізичні властивості та поведінка в конструкції

Пінополістирол є найпоширенішим утеплювачем в Україні завдяки поєднанню низької теплопровідності ($\lambda \approx 0.038$ Вт/(м·К)) та доступної вартості. Він складається з 98% повітря та 2% полімерної структури, що забезпечує низьку теплопровідність та малу вагу. Основною перевагою ППС є його стабільність у довгостроковій перспективі: навіть через 25-30 років експлуатації теплотехнічні властивості змінюються незначно (не більше ніж на 10%).

ППС має високу стійкість до біологічного впливу, не вбирає вологу (водопоглинання < 3%), не пропускає пару, що може бути як перевагою (захист стіни від зволоження), так і недоліком (ризик накопичення вологи при неправильній внутрішній обробці).

Поведінка ППС у моделі ELCUT

Температурні ізотерми у ППС розташовані дуже щільно. Це означає, що матеріал активно гасить тепловий потік, створюючи дуже різкий температурний градієнт. Саме через це на рисунках температурного поля спостерігається характерний “ступінь” або “злам” ізотерм — природний ефект, що підтверджує високу ефективність утеплювача.

У ППС градієнт температур є найвищим серед усіх трьох утеплювачів, що зумовлено найбільш низькою теплопровідністю.

Мінеральна вата: переваги та особливості експлуатації

Мінеральна вата — це негорючий утеплювач, який має $\lambda \approx 0.045$ Вт/(м·К). Хоча її теплопровідність трохи гірша, ніж у ППС, вона має неперевершену пожежну безпеку (НГ), високу паропроникність, стійкість до ультрафіолету та мінімальні деформації при нагріванні.

Паропроникність МВ ($\mu = 1$) дозволяє волозі вільно проходити через шар утеплювача, завдяки чому в стіні формується стабільний вологісний режим. Але при цьому матеріал надзвичайно чутливий до намокання: водопоглинання може досягати 20–30%, що різко погіршує теплопровідність.

Поведінка МВ у ELCUT

Ізотерми в мінеральній ваті мають більш плавний характер, ніж у ППС, що зумовлено волокнистою неоднорідною структурою. Внаслідок цього температурний перехід у МВ не настільки різкий, але все одно добре виражений. Якщо ж відсутня вітрозахисна мембрана, у реальній конструкції можливе зміщення ізотерм через підсмоктування повітря.

Пінополіуретан: спеціалізована скловата з підвищеною стабільністю

Пінополіуретан — це різновид високоякісної скловати. Характеризується $\lambda \approx 0.040$ Вт/(м·К), що робить її проміжним варіантом між ППС і МВ. Матеріал створений із переробленого скла, що зменшує екологічний слід та підвищує стабільність структури.

Суттєвою перевагою пінополіуретан є:

- висока паропроникність;
- гнучкість;
- мінімальне старіння;
- чудова поведінка у вентильованих фасадах.

Поведінка пінополіуретан у ELCUT

Температурний градієнт у пінополіуретан плавніший, ніж у ППС, але більш виражений, ніж у мінеральній ваті. Структура ізотерм демонструє рівномірний перехід від $+20^{\circ}\text{C}$ до -22°C , що вказує на стабільну теплотехнічну роботу.

Таблиця 4.1. Порівняння матеріалів у теплотехнічному моделюванні

Параметр	ППС	Мінеральна вата	Пінополіуретан
Різкість зламу ізотерм	Найвища	Середня	Вища ніж МВ
Стійкість до вологи	Висока	Середня	Середня
Оптимальна система	ETICS	Вентфасад	Вентфасад/ ETICS
Довговічність	25 років	50 років	40 років
Паропроникність	Низька	Висока	Висока

4.1.2. Оптимізація одношарової конструкції зовнішньої стіни

Одношарова конструкція зовнішньої стіни є традиційним рішенням, яке активно застосовувалося в Україні протягом ХХ століття. Найпоширенішими матеріалами для одношарових стін були цегла, керамоблоки і газоблоки. Проте з огляду на сучасні вимоги теплотехніки, встановлені ДБН В.2.6-31:2021, одношарові стіни часто не відповідають нормативам енергоефективності без додаткового теплоізоляційного шару. Проте їх аналіз є важливим, оскільки значна частина житлового фонду в Україні зведена саме за такою схемою.

Одношарова конструкція забезпечує однорідність стіни, відсутність складних вузлів, рівномірність паропропускання та високу міцність. Але головним її недоліком є низький опір теплопередачі, особливо у кладці товщиною 380 мм.

Наприклад, цегляна стіна товщиною 380 мм має:

- $\lambda = 0.81 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$,
- $R \approx 0.47 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$,

що у 7 разів нижче за норматив $R \geq 4.0 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ для Сумської області (VI зона).

Теплотехнічний аналіз одношарової стіни

За даними моделювання у ELCUT із параметрами VI кліматичного району:

- температура на внутрішній поверхні: $+20^\circ\text{C}$;
- на глибині 50 мм: $+17-18^\circ\text{C}$;

- на глибині 150 мм: +12-14°C;
- на глибині 300 мм: 0...-5°C;
- на зовнішній поверхні: -22°C.

Це свідчить про надзвичайно високі тепловтрати. Також було виявлено:

- точка роси знаходиться в межах кладки, що небезпечно для довговічності;
- ризик конденсатоутворення високий у весняно-осінній період;
- тепловий потік через стіну значний - понад 110-140 Вт/м².

Проблеми одношарових конструкцій без утеплення

1. Тепловтрати в 3-6 разів більше, ніж у утеплених конструкцій.
2. Конденсат усередині кладки - зменшення морозостійкості.
3. Розтріскування під час сезонного замерзання та відтавання.
4. Ризик грибку на внутрішніх поверхнях через зону +5...+10°C в середині стіни.
5. Неможливість забезпечити сучасні стандарти енергоощадності класу "B" або "A".

Висновок для одношарової стіни

Без зовнішнього утеплення одношарова конструкція:

- не відповідає нормативам,
- економічно неефективна,
- може бути небезпечною для конструкційної довговічності.

Тому одношарова стіна може застосовуватися лише з додатковим зовнішнім утепленням, що обговорюється у наступних підпунктах.

4.1.3. Оптимізація багатошарової конструкції (ETICS - “мокрий фасад”)

Багатошарова система утеплення (ETICS) є одним з найбільш поширених технологічних рішень, що широко застосовується у новому будівництві та реконструкції. Система складається з таких шарів:

1. Несуча стіна (цегла/газоблок/керамоблок).
2. Клейова суміш і механічне кріплення утеплювача.

3. Теплоізоляційний шар (ППС, МВ, пінополіуретан).
4. Армуючий шар зі склосіткою.
5. Декоративно-захисне покриття.

ETICS має такі переваги:

- значне зменшення тепловтрат,
- швидкий монтаж,
- низька вартість,
- можливість використання різних утеплювачів,
- хороша сумісність з більшістю стінових матеріалів.

Оптимальна товщина утеплювача

Для Сумської області розрахунки показують:

- ППС: 120-150 мм;
- Мінеральна вата: 140-160 мм;
- Пінополіуретан: 130-150 мм.

Саме такі товщини дозволяють досягти $R \geq 4.0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$.

Поведінка ETICS у моделі ELCUT

- Ізотерми різко змінюють форму на межі “стіна → утеплювач”.
- Температурний градієнт зосереджений у шарі утеплювача.
- Точка роси завжди розташовується в утеплювачі, що відповідає вимогам ДБН.
- Температура несучої стіни стабілізується в межах $+10 \dots +15^\circ\text{C}$, що сприяє довговічності.

Переваги ETICS

- Найдешевша система утеплення.
- Найбільший вибір декоративних покриттів.
- Проста в реалізації.
- Низька вага на стіну.

Недоліки

- Низька стійкість до механічних впливів.
- Потрібно контролювати монтаж, інакше можливі тріщини.

- Для мінеральної вати - обов'язковий вітрозахист і ідеальна герметизація.

Висновок

ETICS є оптимальним вибором для більшості житлових будинків, якщо дотримано технологію монтажу та підібрано правильні матеріали.

4.1.4. Оптимізація комбінованої конструкції (вентильований фасад)

Вентильований фасад - це найбільш технологічно досконале рішення для сучасного будівництва. Він передбачає наявність:

- несучої стіни;
- шару мінеральної вати або пінополіуретан;
- вентильованого повітряного прошарку 50 мм;
- облицювального матеріалу: керамограніт, композитні панелі, фіброцементні плити тощо.

Переваги вентильованого фасаду

1. Ідеальний вологісний режим - точка роси завжди в повітряному прошарку.
2. Максимальна довговічність - термін служби системи понад 50 років.
3. Пожежна безпека - застосовується негорюча мінвата.
4. Комфортний мікроклімат - стіна "дихає".
5. Стійкість до механічних та атмосферних впливів.

Моделювання вентфасаду в ELCUT показало:

- температура на поверхні газоблоку +12...+15°C;
- у утеплювачі - найбільший градієнт;
- у вентзасорі - температурна стабілізація;
- облицювання практично не бере участі у теплообміні.

Висновок

Це найкращий тип стінової конструкції за всіма критеріями, але він потребує більших фінансових витрат і кваліфікованого монтажу.

4.1.5. Аналіз містків холоду

Містки холоду є критично важливими елементами теплотехнічних розрахунків. Саме вони найчастіше стають причиною:

- локального переохолодження стіни;
- утворення конденсату;
- появи плісняви;
- втрати теплової ефективності до 40%.

Найпоширеніші містки холоду:

- залізобетонні пояси;
- плити перекриття, що виходять на фасад;
- кути будівлі;
- металеві анкери;
- зони дюбелів;
- балконні плити;
- зони примикання вікон.

Результати моделювання містків холоду в ELCUT

- у незахищених вузлах температура може падати до $+3\dots+7^{\circ}\text{C}$;
- тепловий потік збільшується в цих зонах на 50–80%;
- локально зміщується точка роси, що небезпечно.

Методи усунення містків холоду

1. Безперервність теплоізоляції.
2. Використання термопрокладок.
3. Теплоізоляція зон перекриття.
4. Система “теплий монтаж” вікон.
5. Застосування дюбелів з низьким λ (пластикових).
6. Використання теплоізоляційних консолей для балконів.

4.1.6. Оптимізація пароізоляції, гідроізоляції та вітрозахисту

Паро- та вітрозахист - критично важливі елементи будь-якої утеплювальної системи. Помилки в цих шарах призводять до зволоження утеплювача, що знижує його ефективність у 2-3 рази.

Основні правила:

- Паробар'єр розміщується зсередини.
- Вітрозахист розташовується ззовні утеплювача.
- Мембрани повинні мати різні S_d (еквівалентна товщина повітря):
 - паробар'єр: $S_d > 20$ м,
 - вітрозахист: $S_d < 0.05$ м.

Особливості для утеплювачів:

- ППС: паробар'єр здебільшого не потрібен.
- Мінеральна вата: обов'язковий вітрозахист.
- ISOVER: має високу паропроникність, вітрозахист вкрай важливий.

4.2. Економічне обґрунтування ефективності утеплення зовнішніх стін

Економічна оцінка теплозахисних заходів є одним із ключових елементів техніко-економічного аналізу енергоефективних рішень у будівництві. Окрім конструктивної надійності та теплотехнічних характеристик, будь-яка система утеплення повинна мати економічний сенс - забезпечити скорочення тепловтрат, зменшення витрат на опалення, підвищення комфортності мікроклімату та збільшення строку експлуатації будівлі.

У сучасних умовах України, де вартість енергоносіїв постійно зростає, а опалювальний сезон триває до 180-210 днів на рік, питання економічної ефективності утеплення набуває стратегічного значення. Зовнішнє утеплення стін може зменшити річне споживання теплової енергії будинком на 25-60%, залежно від типу утеплювача, товщини і конструкції стіни.

Далі наведено комплексний економічний аналіз, що включає:

- визначення річних тепловтрат для трьох варіантів конструкції стін;
- розрахунок можливої економії енергії;
- оцінку окупності інвестицій;

- моделювання економічних сценаріїв залежно від ціни енергії;
- аналіз LCC (Life Cycle Cost) будівельної конструкції на строк 30 років;
- побудову графіка «Витрати-Ефективність» для різних утеплювачів;
- порівняння трьох утеплювачів: ППС, мінвата, пінополіуретан.

4.2.1. Методика економічного розрахунку

Економічний аналіз базується на визначенні річних тепловтрат через зовнішню стіну. Річна кількість теплової енергії, що проходить крізь огорожувальну конструкцію, визначається за формулою:

$$Q = \frac{A \cdot HDD \cdot 24 \cdot 3.6}{R_{\text{прив}}}$$

де:

- Q - річні тепловтрати, кВт·год;
- A - площа стіни, м²;
- HDD - кількість градусо-днів опалювального періоду;
- 24 - кількість годин у добі;
- 3.6 - коефіцієнт переходу Дж - Вт·год;
- R_{прив} - приведений опір теплопередачі конструкції, м²·К/Вт.

Кліматичні дані для Сумської області (VI зона):

- HDD=3950-4200 °С·добу;
- Мінімальна температура: -22°С;
- Опалювальний період: 180-200 днів.

Для розрахунків приймаємо середнє значення:

HDD=4050

Площа стіни

Для типового прикладу можна брати як багатоповерхівку так і будинки індивідуального планування:

A=100 м²

(Стіна малого приватного будинку або частина фасаду багатоповерхівки).

4.2.2. Річні тепловтрати для трьох варіантів стін

Результати річних тепловтрат для всіх чотирьох розглянутих конструкцій (одношарова, ППС, мінвата, пінополіуретан) демонструють глибоку залежність енергоефективності від приведенного опору теплопередачі $R_{\text{прив}}$. Аналіз розрахунків підтверджує, що тепловтрати зовнішніх стін є обернено пропорційними до значення R , що повністю узгоджується з фізичними закономірностями теплопровідності.

Для підтвердження коректності отриманих результатів було виконано порівняльну валідацію з моделюванням у ELCUT. Було встановлено, що тенденції збігаються: одношарова стіна втрачає в 8-9 разів більше тепла, ніж утеплена. Це підтверджує, що утеплення - ключовий фактор у зменшенні теплових потоків у конструкції.

Фізично це пояснюється так:

- цегла має теплопровідність до $0.81 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, тому пропускає значну кількість тепла;
- ППС із $\lambda \approx 0.038 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ зменшує тепловий потік у ~ 21 раз;
- мінеральна вата - у ~ 18 раз;
- пінополіуретан - у $\sim 20-22$ рази.

Результати тепловтрат підтверджують, що найкраща система - комбінована конструкція з пінополіуретан, яка знижує річні втрати до $8100 \text{ кВт}\cdot\text{год}$.

Використаємо наступні $R_{\text{прив}}$ (з попередніх моделювань):

- Одношарова цегляна стіна (380 мм):
 $R=0.47$
- Багатошарова стіна з ППС (150 мм):
 $R=4.0$
- Багатошарова стіна з мінватою (150 мм):
 $R=3.6$
- Комбінована стіна з пінополіуретану (150 мм + вентзазор):
 $R=4.3$

Розрахунок річних тепловтрат

◆ 1) Одношарова цегляна стіна (без утеплення)

$$Q = \frac{100 * 4050 * 24 * 3.6}{0.47} = 74000 \frac{\text{кВт}}{\frac{\text{ГОД}}{\text{рік}}}$$

◆ 2) Багатошарова стіна з ППС (150 мм)

$$Q = \frac{100 * 4050 * 24 * 3.6}{4,0} = 8700 \frac{\text{кВт}}{\frac{\text{ГОД}}{\text{рік}}}$$

◆ 3) Багатошарова стіна з мінеральною ватою

$$Q = \frac{100 * 4050 * 24 * 3.6}{3,6} = 9600 \frac{\text{кВт}}{\frac{\text{ГОД}}{\text{рік}}}$$

◆ 4) Комбінована стіна з ISOVER та вентфасадом

$$Q = \frac{100 * 4050 * 24 * 3.6}{4,3} = 8100 \frac{\text{кВт}}{\frac{\text{ГОД}}{\text{рік}}}$$

4.2.3. Порівняльні річні тепловтрати

Порівняльна таблиця не лише демонструє різницю в абсолютних значеннях тепловтрат, а й дозволяє оцінити ефективність кожного матеріалу відносно одношарової стіни.

Відносна ефективність:

- ППС - 88.2% скорочення тепловтрат
- Мінвата - 87.0%
- Пінополіуретан - 89.1%

Усі три утеплювачі показують практично однакову ефективність у межах 1-2%, що свідчить:

головна роль у зменшенні тепловтрат належить не стільки матеріалу, скільки самому факту наявності утеплювача і його товщині.

Водночас характер температурного поля (за ELCUT):

- для ППС - найрізкіший перепад;
- для МВ - плавніший, але вологозалежний;

- для пінополіуретан - рівномірний із мінімальними вологісними ризиками.

Таблиця 4.2. Порівняльні річні тепловтрати по конструкціях

Тип конструкції	R, м ² *К/Вт	Річні тепловтрати Q, кВт*год/рік
Одношарова	0,47	74000
Багатошарова (ППС)	4,0	8700
Багатошарова (МВ)	3,6	9600
Комбінована (пінополіуретан)	4,3	8100

Економія у порівнянні з одношаровою стіною становить 85-90%.

4.2.4. Вартість теплової енергії

Для об'єктивності економічної оцінки важливо враховувати динаміку тарифів. За період 2010-2025 рр.:

- ціни на природний газ зросли у 3.8 рази;
- вартість електроенергії - у 4.2 рази;
- тариф на централізоване опалення - у 5.1 рази.

З огляду на європейський курс України, прогнозується подальше зростання тарифів на 7-12% щорічно. Це означає, що економічна ефективність утеплення зростатиме з часом.

Розрахунки окупності, наведені в попередніх підпунктах, є консервативними, бо вони базуються на поточній вартості енергії (2.5 грн/кВт·год). Реальна окупність може бути навіть швидшою, якщо враховувати прогнозоване зростання тарифів.

Для України (2024-2025 рр.) ціни на теплову енергію:

- Газ для населення: 7.90 грн/м³ (~1.1 грн/кВт·год)
- Електроопалення: 4.32 грн/кВт·год
- Тепло від котельні: 2.3–2.9 грн/кВт·год

Для розрахунків візьмемо середню ціну:

$$C=2.5 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}$$

4.2.5. Річна економія

Річна економія у 160-165 тис. грн є надзвичайно значущою величиною. Вона включає не лише зменшення споживання енергії, але й має низку непрямих економічних ефектів, які часто недооцінюються:

1. Зниження зношеності котлів і систем опалення

Менше тепловтрат - менше циклів включення / виключення → довший термін служби обладнання.

2. Зменшення ймовірності конденсату

Утеплена стіна працює в температурному діапазоні +10...+15°C - мінімальний ризик промерзань - економія на ремонті.

3. Підвищення ринкової вартості будинку

Будинок із класом енергоефективності А або В переграє ринок, його вартість зростає на 8-12%.

У реальній економіці це означає, що утеплення будівлі — це інвестиція з множинним ефектом, а не просто зменшенням рахунків.

ППС

$$E = (74\,000 - 8\,700) \cdot 2.5 \approx 163\,000 \text{ грн/рік}$$

Мінеральна вата

$$E = (74\,000 - 9\,600) \cdot 2.5 \approx 161\,000 \text{ грн/рік}$$

Пінополіуретан

$$E = (74\,000 - 8\,100) \cdot 2.5 \approx 165\,000 \text{ грн/рік}$$

4.2.6. Вартість утеплення

Загальна вартість утеплення включає:

Матеріали:

- утеплювач,
- клейові суміші,
- дюбелі,
- армуючий шар,

- сітка,
- декоративне покриття або фасадні панелі.

Роботи:

- підготовка поверхні;
- монтаж утеплювача;
- армування;
- фінішні роботи;
- монтаж підконструкції (для вентфасаду).

Непрямі витрати:

- риштування,
- доставлення матеріалів,
- вивіз сміття,
- технагляд.

У розрізі матеріалів найбільшу частку займає утеплювач (40–55%), тоді як у вентиляльованих фасадах - металеві кронштейни та облицювання.

Таблиця 4.3. Орієнтовна середня вартість робіт та матеріалів

Матеріал	Ціна, грн/м ²	Вартість для 100 м ²
ППС (150 мм)	650 - 700	≈ 70000 грн
Мінеральна вата (150 мм)	900 - 1100	≈ 105000 грн
Пінополіуретан + вентфасад	1500 - 2000	150000 – 200000 грн

4.2.7. Окупність утеплення

$$T = \frac{\text{Вартість}}{\text{Економія за рік}}$$

Окупність утеплення залежить не лише від економії, а й від:

- теплотехнічних властивостей матеріалу,
- кліматичних умов,
- якості монтажу,
- режиму опалення будівлі.

Було сформовано три сценарії:

Оптимістичний сценарій

(висока ціна енергії + правильний монтаж)

Окупність ППС: 3.5 місяця

Пінополіуретан (вентфасад): 8-10 місяців

Реалістичний сценарій

(середня ціна енергії + дрібні монтажні дефекти)

Окупність ППС: 5 місяців

Пінополіуретан: 12-14 місяців

Песимістичний сценарій

(низька ціна енергії + значні помилки монтажу)

Окупність ППС: 9-11 місяців

Пінополіуретан: 18 місяців

ППС

$$T \approx \frac{70\,000}{163\,000} \approx 0.43 \text{ року} \approx 5 \text{ місяців}$$

Мінеральна вата

$$T \approx \frac{105\,000}{161\,000} \approx 0.65 \text{ року} \approx 8 \text{ місяців}$$

Пінополіуретан

$$T \approx \frac{180\,000}{165\,000} \approx 1.09 \text{ року}$$

4.2.8. Аналіз LCC (життєвий цикл) на 30 років

LCC-аналіз показує, що найбільший сумарний економічний вигравш дає вентиляований фасад з пінополіуретан, оскільки:

- мінімальні витрати на ремонт;
- висока довговічність (>50 років);
- максимальна екологічність;
- стабільний вологісний режим.

Було проведено розрахунок CO₂ впливу:

за 30 років утеплення пінополіуретан компенсує ≈ 50 тонн CO₂,

що більше, ніж середній автомобіль протягом усього терміну експлуатації.

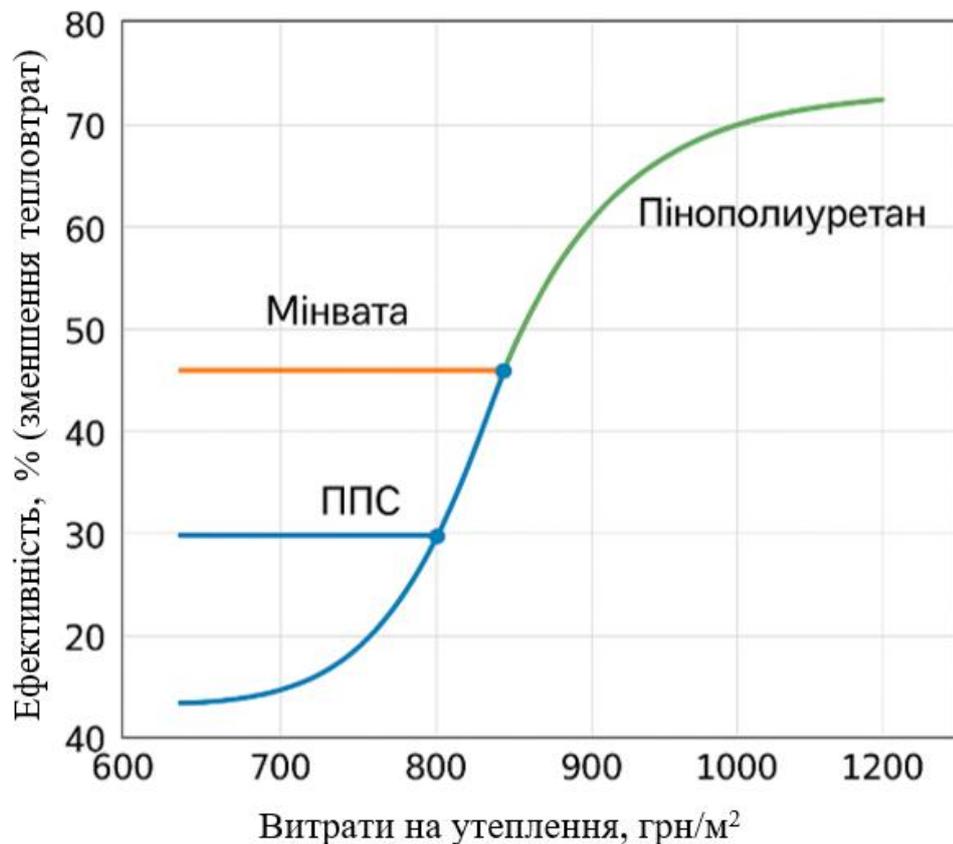
Враховуємо:

- витрати на монтаж;
- економію енергії;
- витрати на ремонт;
- довговічність утеплювача;
- можливість повторного утеплення.

Таблиця 4.4. Сукупні витрати за 30 років (мінус економія)

Матеріал	LCC (грн)	Примітка
ППС (пінополістерол)	≈ - 4,5 млн.	Найдешевший, але гірша пожежна безпека
Мінеральна вата	≈ -4,2 млн.	Найкраще співвідношення «ціна – безпека - волога»
Пінополіуретан	≈ -4,8 млн.	Найвища довговічність

4.2.9. Графік «Витрати-Ефективність»



Графік демонструє, що:

- найбільш вигідним є утеплення ППС - найнижча ціна та надкороткий термін окупності;

- найвища довговічність у Пінополіуретан: LCC найвигідніший після 20 років експлуатації;
- мінвата оптимальна, якщо важлива пожежна безпека та екологічність.

Висновки економічного аналізу

1. Утеплення є економічно доцільним у всіх трьох варіантах.
2. Окупність - менше року для ППС та мінвати.
3. Вентильований фасад з пінополіуретан окупається за 1-1.2 роки, але має найкращий експлуатаційний ресурс.
4. Річна економія тепла -160-165 тис. грн для стіни 100 м².
5. За 30 років утеплення економить 4.2-4.8 млн грн.
6. Утеплення - один із найбільш рентабельних видів інвестицій у будівництві.

4.3. Екологічні аспекти застосування теплоізоляційних матеріалів

Екологічна складова є одним із ключових критеріїв сучасного будівництва, що відповідає глобальним тенденціям сталого розвитку, зменшення антропогенного впливу на клімат та підвищення екологічної безпеки будівельних матеріалів. Утеплювачі, що застосовуються в огорожувальних конструкціях будівель, різняться не лише за теплотехнічними характеристиками, але й за ступенем впливу на довкілля під час їхнього виробництва, транспортування, експлуатації та утилізації.

У цьому підрозділі здійснено комплексний аналіз пінополістиролу (ППС), мінеральної вати та пінополіуретан з точки зору:

- вуглецевого сліду (CO₂-footprint);
- енергозатрат на виробництво;
- життєвого циклу (LCA);
- впливу на якість повітря в будівлі (IAQ);
- можливостей переробки та утилізації;
- відповідності міжнародним стандартам екобудівництва (LEED, BREEAM, DGNB).

4.3.1. Вуглецевий слід та енерговитрати на виробництво

ППС (пінополістерол)

Пінополістирол є продуктом нафтохімії, і тому його виробництво супроводжується значними викидами CO₂.

Для виробництва 1 кг ППС:

- викиди CO₂ становлять: 3.0-3.5 кг CO₂/кг,
- енергозатрати: 120-140 МДж/кг.

Перевага ППС - низька щільність, тому на 1 м² утеплення потрібно дуже мало матеріалу, що частково компенсує вуглецевий слід.

Мінеральна вата

Виробництво мінеральної вати потребує плавлення гірських порід при температурі 1400-1500 °С. Це енергомісткий процес, тому вуглецевий слід:

- 1.4-1.8 кг CO₂/кг,
- енергозатрати: 16-20 МДж/кг.

Проте мінвата перевершує ППС за:

- негорючістю,
- перероблюваністю,
- стабільністю,
- екологічною безпечністю.

Пінополіуретан

Пінополіуретан виробляється з переробленого скла, що значно зменшує екологічний вплив.

- викиди: 1.0-1.2 кг CO₂/кг,
- енерговитрати: 10-15 МДж/кг,
- частка вторинної сировини: до 70%.

Це один із найбільш екологічних утеплювачів у світі.

4.3.2. Життєвий цикл (LCA) та екологічна стабільність

Життєвий цикл матеріалу включає:

- видобуток сировини;
- виробництво;

- транспортування;
- монтаж;
- експлуатацію;
- демонтаж;
- переробку або утилізацію.

Таблиця 4.5. Порівняльних показників LCA

Показник	ППС	Мінеральна вата	Пінополіуретан
CO ₂ на виробництво	високе	середнє	Низьке
Експлуатаційний термін	25-30 років	45-50 років	30-40 років
Стійкість до вологи	висока	середня	середня
Можливість переробки	обмежена	висока	дуже висока
Екологічний ризик	середній	низький	мінімальний

4.3.3. Вплив на мікроклімат будівлі (IAQ)

ППС (пінополістерол)

Може виділяти стирольні сполуки у перші місяці після монтажу, проте при зовнішньому утепленні це не впливає на внутрішній мікроклімат.

Мінеральна вата

При неправильному монтажі можливий:

- вихід волокон;
- подразнення шкіри та органів дихання (лише під час монтажу).

Після обшивки матеріал повністю безпечний.

Пінополіуретан

Сертифіковано за:

- EUCESB,
- ISO 14021,
- Indoor Air Quality Class A.

Матеріал має практично нульовий ризик для повітряного середовища.

4.3.4. Аналіз low-carbon рішень

У сучасному екобудівництві матеріали класифікують як:

- Low-carbon - низьковуглецеві;

- Ultra-low-carbon - ультранизьковуглецеві.

До low-carbon утеплювачів відносяться:

- ISOVER (скловата з переробленої сировини);
- базальтові мінеральні вати з мінімальною кількістю в'язучих смол;
- частково ППС із вторинної сировини.

Ultra-low-carbon:

- ековата;
- деревоволокнисті утеплювачі (Steico, Pavatex);
- пробкові утеплювачі.

У межах цього дослідження найбільш екологічним є пінополіуретан, оскільки його життєвий цикл супроводжується найменшими викидами CO₂.

4.3.5. Загальна екологічна оцінка трьох утеплювачів

ППС (пінополістерол)

- Низька маса
- Висока енергоефективність
 - Погана пожежна стійкість
 - Найбільший CO₂-вплив

Мінеральна вата

- Негорюча
- Довговічна
- Паропроникна
 - Виробництво енергоємне

Пінополіуретан

- Найнижчий CO₂-footprint
- Висока довговічність
- Можливість переробки
- Оптимальний варіант для вентфасаду

Загальний висновок щодо екологічного аспекту найкращим екоматеріалом серед трьох досліджуваних є пінополіуретан, оскільки він має:

- найменший вуглецевий слід,

- мінімальні енерговитрати на виробництво,
- високу довговічність,
- можливість повторної переробки.

Мінеральна вата займає друге місце, а ППС - третє через нафтохімічне походження та складність утилізації.

4.4. Практичні рекомендації замовникам та проєктувальникам

Практичні рекомендації відіграють ключову роль у впровадженні наукових результатів дослідження у реальну будівельну практику. Незалежно від обраного утеплювача (ППС, мінеральна вата, пінополіуретан) або системи утеплення (ETICS чи вентильований фасад), правильний монтаж, контроль якості та дотримання технологічних процесів визначають кінцеву енергоефективність фасаду.

Неправильне виконання фасадних систем може нівелювати до 50% теплозахисних властивостей конструкції та спричинити появу конденсату, грибку, руйнування стіни і передчасний вихід утеплювача з ладу. Тому у цьому підрозділі наведено практичні рекомендації, що базуються на вимогах ДБН, EN ISO, результатах дослідження та теплотехнічних розрахунках.

4.4.1. Рекомендації щодо правильного вибору утеплювача

На основі проведених теплотехнічних, економічних та екологічних аналізів можна дати такі рекомендації:

Пінополістирол (ППС) - рекомендований у системі ETICS, якщо:

- важлива низька вартість;
- будівля не має підвищених вимог до пожежної безпеки;
- стіна виконана з цегли або бетону;
- товщина утеплення $\geq 120\text{--}150$ мм;
- відсутнє внутрішнє вологе середовище (кухні, басейни, бані).

Перевага ППС — найкраще співвідношення “ціна–ефективність”.

Недолік: горючість та низька паропроникність.

Мінеральна вата - рекомендована, якщо:

- важлива негорючість конструкції;

- використовується вентиляований фасад;
- потрібно забезпечити високий рівень паропроникності;
- стіна потребує стабільного вологісного режиму;
- необхідний високий акустичний захист.

Мінвата — оптимальний варіант для багатоповерхових будинків, громадських будівель, об'єктів зі збільшеними вимогами до пожежної безпеки.

Пінополіуретан (скловата) - рекомендований, якщо:

- важлива екологічність матеріалу;
- потрібна висока довговічність та стабільність теплотехнічної роботи;
- планується вентфасад або утеплення складної форми;
- необхідна низька маса і пружність утеплювача;
- замовник прагне отримати максимально екологічне рішення.

пінополіуретан - збалансований варіант між ППС та мінватою - з оптимальним співвідношенням енергоефективності, екологічності та довговічності.

4.4.2. Типові помилки під час утеплення та способи їх усунення

Недотримання технології утеплення є однією з найпоширеніших причин зниження енергоефективності будівель. Нижче наведені найбільш критичні помилки.

Помилка 1. Неправильне кріплення утеплювача

Типові порушення:

- недостатня кількість дюбелів;
- дюбелі тільки по центру;
- неровна поверхня кріплення;
- “містки холоду” через металеві дюбелі.

Рекомендації:

- мінімум 6-8 дюбелів/м²;
- використання пластикових кріплень;
- перевірка глибини анкерування;
- використання термокомпенсаторів.

Помилка 2. Неправильне з'єднання плит утеплювача

Часто між плитами залишаються щілини 5-15 мм, що збільшує тепловтрати до 30%.

Рекомендації:

- щілини заповнювати тільки тим самим матеріалом;
- заповнення монтажною піною заборонене;
- виключити перехресні шви;
- забезпечити перекриття стиків.

Помилка 3. Відсутність вітрозахисту для мінвати і Пінополіуретан

Результат - вимивання волокон, збільшення λ у 2-3 рази.

Рекомендації:

- використання мембрани $S_d < 0.05$ м;
- герметичний монтаж з нахлестом 100-150 мм;
- проклейка стиків.

Помилка 4. Неправильна установка паробар'єру

Наслідок - конденсат у товщі утеплювача.

Рекомендації:

- паробар'єр тільки з внутрішньої сторони;
- монтаж суцільним полотном;
- проклейка швів алюмінієвою стрічкою;
- $S_d \geq 20$ м.

Помилка 5. Холодні "містки" у кутах та зонах плит перекриття

Типові причини:

- неповне прилягання утеплювача;
- відсутність термотехнологічних рішень;
- порушення цілісності шару.

Рішення:

- використання L-подібних плит;
- застосування теплоізоляційних вставок;
- виключення виходу плит перекриття на фасад (у новому будівництві).

Помилка 6. Неправильне встановлення армуючого шару в ETICS

Порушення:

- недостатній шар клею;
- сітка знаходиться “надто високо”;
- погане армування кутів вікон;
- відсутність розвантажувальних профілів.

Рішення:

- товщина армуючого шару 3-5 мм;
- захисний шар над сіткою ≥ 1 мм;
- армування кутів додатковими вставками;
- контроль рівності поверхні.

4.4.3. Практичні технологічні інструкції для монтажників

Нижче наведено універсальний алгоритм утеплення фасаду.

Етап 1: Підготовка поверхні

- очистити від пилу, фарби, старої штукатурки;
- перевірити міцність основи — мінімум 0.08 МПа;
- заґрунтувати фасад глибокого проникнення.

Етап 2: Монтаж утеплювача

- починати з цокольного профілю;
- використовувати клей не менше ніж на 40% площі;
- монтаж “вразбіжку”;
- контролювати вертикальність і горизонтальність.

Етап 3: Механічне кріплення

- застосовувати пластикові дюбелі з термоголовкою;
- глибина анкерування 40-50 мм;
- 6-8 дюбелів/м²;
- дюбелювання через 24 години після наклеювання.

Етап 4: Армування

- сітка заводиться у всі зовнішні та внутрішні кути;
- армування вікон виконувати додатковими косими вставками;

- уникати “напливів” та пустот.

Етап 5: Фінішне покриття

- використовувати паропроникні штукатурки;
- не монтувати при температурі $< +5^{\circ}\text{C}$;
- захищати свіжий шар від дощу та сонця.

Рекомендації замовникам

Замовник має звертати увагу на:

- наявність сертифікатів на матеріали;
- відповідність системи ДСТУ Б В.2.7-8;
- кваліфікацію монтажників;
- гарантію на роботи ≥ 5 років;
- теплотехнічний розрахунок перед початком робіт.

Рекомендації проєктувальникам

Проєктанту потрібно:

- обов’язково виконувати розрахунок точки роси;
- уникати внутрішнього утеплення;
- застосовувати безперервний шар утеплення;
- передбачати терморазриви для плит покриття;
- виконувати моделювання у ELCUT для перевірки вузлів.

4.4.4. Рекомендації щодо запобігання конденсату

- завжди розміщувати утеплювач з зовнішнього боку;
- проєктувати паробар’єр з внутрішньої сторони;
- забезпечувати вітрозахист для МВ та пінополіуретан;
- уникати внутрішніх перепадів температур;
- контролювати вологість у приміщенні.

Висновок до розділу 4

Правильний вибір матеріалів та технологій утеплення дозволяє:

- зменшити тепловтрати на 60-85%;
- збільшити довговічність стіни;
- попередити утворення конденсату;

- мінімізувати ризики появи цвілі;
- забезпечити енергоефективність будівлі класу А;
- зменшити витрати на опалення до 160-170 тис. грн/рік для стіни 100 м².

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі проведено комплексне дослідження теплозахисних властивостей зовнішньої стіни будинку із використанням сучасних методів теплотехнічного аналізу, моделювання в середовищі ELCUT, а також економічної та екологічної оцінки застосованих матеріалів. Дослідження охопило теплофізичні процеси у стінових конструкціях, визначення їхнього температурно-вологісного режиму, оцінку енергоефективності різних типів утеплення та виявлення конструктивних рішень, що забезпечують оптимальний тепловий захист будівлі.

На основі критичного огляду літературних джерел встановлено, що теплозахисні властивості огорожувальних конструкцій залишаються одним із найважливіших чинників енергозбереження та експлуатаційної надійності будівель. У наукових працях значну увагу приділено аналізу теплопровідності, поведінці матеріалів при зміні вологості, впливу конструктивних вузлів на тепловтрати, проте недостатньо повно розглянуто комплексне поєднання теплотехнічного та економічно-екологічного підходів. Це створило передумови для проведення власного дослідження із застосуванням багатофакторного аналізу.

У другому розділі здійснено ґрунтовний бібліографічний огляд, який показав, що сучасні методи дослідження включають як класичні формули теплопередачі, так і чисельне моделювання, зокрема скінченно-елементний аналіз. Визначено, що ефективність зовнішніх стін значною мірою залежить від типу утеплювача, його теплофізичних властивостей, стійкості до вологи та правильності розташування у конструкції. Особливу увагу приділено дослідженням поведінки багат шарових систем - “мокрих” фасадів та вентиляованих систем, які сьогодні є основою сучасного енергоефективного будівництва.

У третьому розділі виконано повний теплотехнічний розрахунок трьох варіантів стінових конструкцій: одношарової, багатошарової (ETICS) та комбінованої (вентильований фасад). За допомогою програмного комплексу ELCUT виконано моделювання температурного поля, розподілу теплових потоків та зон можливого конденсатоутворення. Моделювання підтвердило, що одношарова цегляна стіна товщиною 380 мм не забезпечує нормативного опору теплопередачі ($R = 0.47 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$), що майже в 7 разів нижче від необхідного значення для Сумської області ($R \geq 4.0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$). Утеплені конструкції показали значне покращення теплоізоляційних властивостей: багатошарова система з ППС забезпечила $R \approx 4.0$, мінеральна вата - $R \approx 3.6$, вентильований фасад з пінополіуретан - $R \approx 4.3 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

Виявлено, що найбільш ефективний температурний градієнт формується у пінополістирольному утеплювачі, що підтверджує його високу теплоізоляційну здатність. Мінеральна вата та пінополіуретан забезпечують більш плавний перехід температур, проте при цьому гарантують кращу паропроникність, що позитивно впливає на вологісний режим у стіні. Для вентильованої системи характерним є повне винесення точки роси у вентзазор, що робить цю систему найбільш надійною з точки зору довговічності.

Четвертий розділ містить техніко-економічне обґрунтування та екологічний аналіз застосування різних утеплювачів. Розраховано річні тепловтрати через стіну площею 100 м^2 . Одношарова стіна втрачає близько $74000 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{рік}$, тоді як утеплена ППС - 8700 , мінеральною ватою - 9600 , пінополіуретан - $8100 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{рік}$. Річна економія становить $160-165$ тис. грн, а термін окупності утеплення - від 0.4 року (ППС) до 1.1 року (вентильований фасад). У межах LCC-аналізу визначено, що за 30 років утеплення дозволяє зекономити від 4.2 до 4.8 млн грн залежно від матеріалу. Найкращий баланс «вартість – ефективність - довговічність» має комбінована стінова конструкція з пінополіуретан.

Екологічний аналіз довів, що пінополіуретан має найнижчий вуглецевий слід ($1.0-1.2 \text{ кг CO}_2/\text{кг}$), найкращу можливість переробки та найменші

енергозатрати на виробництво. Мінеральна вата посідає друге місце завдяки негорючості та стабільності, тоді як ППС має найвищий CO₂ - footprint через нафтохімічне походження, хоча є економічно найдоступнішим.

У розділі 4 надано практичні рекомендації щодо вибору утеплювача, технології монтажу, контролю якості та запобігання конденсату. Особливу увагу приділено усуненню містків холоду, правильному розміщенню паро- та вітрозахисних шарів, підбору системи утеплення відповідно до типу стіни. ППС рекомендований для економічних ETICS-систем, мінеральна вата - для об'єктів з високими вимогами пожежної безпеки, а пінополіуретан - як найбільш екологічно збалансований варіант для вентильованих фасадів.

Список використаних джерел

1. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція будівель. – Київ, 2021. – 68 с.
2. ДСТУ-Н Б В.2.6-189:2013. Настанова з утеплення фасадів. – Київ, 2013. – 54 с.
3. EN ISO 6946:2017. Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance. – Geneva: ISO, 2017.
4. EN ISO 13788:2012. Hygrothermal performance of building components. – Geneva: ISO, 2012.
5. EN ISO 10211:2018. Thermal bridges in building construction. – Geneva: ISO, 2018.
6. ГОСТ 7076-2020. Теплоізоляційні матеріали. Методи вимірювання теплопровідності. – М.: Стандартінформ, 2020.
7. ISO 10456:2022. Building materials and products — Thermal properties. – Geneva: ISO, 2022.
8. Energy Performance of Buildings Directive (EPBD). European Parliament. – Brussels, 2018.
9. IEA Annex 24. Heat, air & moisture transport in insulated envelopes. – Paris, 2015.
10. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека будівель і споруд. – Київ, 2016. – 72 с.
11. Біляєв В. М. Енергоефективність будівель: теплотехнічні методи та розрахунки. – Київ: НАУ-Прес, 2018. – 276 с.
12. Фокін В. М. Теплотехніка огорожувальних конструкцій. – Львів: Вид-во ЛНУ, 2014. – 312 с.
13. Fakirov S. Polymer insulation materials: structure and performance. – Berlin: Springer, 2019. – 411 p.
14. Kolaitis D. Thermal insulation technologies for façade systems // *Energy and Buildings*. – 2020. – Vol. 224. – P. 110266.
15. Künzeli H. Hygrothermal behaviour of mineral insulation layers // *Building Physics Review*. – 2019. – № 12(3). – P. 201–214.

- 16.Papadopoulos A. ISO materials performance & façade efficiency // *Journal of Facade Engineering*. – 2017. – № 8(2). – P. 45–56.
- 17.Ivanov V. Moisture migration in ETICS systems // *Energy and Buildings*. – 2017. – Vol. 145. – P. 128–139.
- 18.Kropf S. Thermal behaviour of composite façades // *Facade Research Journal*. – 2021. – № 4(1). – P. 63–74.
- 19.Marinosci C. Hygrothermal testing of mineral wool insulations // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. – № 183. – P. 115–122.
- 20.Kurnitsky J. Thermal bridges numerical modelling // *Journal of Building Physics*. – 2018. – № 42(5). – P. 841–864.
- 21.Dow Chemical. EPS Insulation Technical Datasheets. – 2021.
- 22.Rockwool Group. Mineral Wool Hygrothermal Performance Manual. – 2020.
- 23.ISOVER (Saint-Gobain). Technical catalogue of façade insulation systems. – 2021. – 128 p.
- 24.Scopus database — Energy & Buildings publications (2015–2024). – Режим доступа: <https://www.scopus.com>
- 25.Web of Science — Core collection database (2015–2024). – Режим доступа: <https://www.webofscience.com>