

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд і технологій
(повна назва факультету)
Кафедра будівельної механіки
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

Магістра

(назва освітнього ступеня)

на тему: Моделювання теплоізоляційних характеристик
огороджувальних конструкцій навчального корпусу після
термомодернізації

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МБ_{нм}-61
спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія
(шифр і назва спеціальності)

Кусень С. Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Коваль І.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Мещерякова О. М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Ясній В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Качка О.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет інженерії машин, споруд і технологій
(повна назва факультету)
Кафедра Будівельної механіки
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
ЯСНІЙ Володимир
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія
(шифр і назва спеціальності)
студенту Кусень Софії Юріївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання теплоізоляційних характеристик огорожуючих конструкцій навчального корпусу після термомодернізації

Керівник роботи к.т.н., доц., Коваль Ігор Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 11 » 04 2025 року № 4/7-287

2. Термін подання студентом завершеної роботи 25.05.25

3. Вихідні дані до роботи Огороджувальні конструкції навчального корпусу ТНТУ

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
Проблематика енергетичної ефективності будівель. Термомодернізація будівель. Сучасні теплоізоляційні матеріали. Методика проведення дослідження. Дослідження характеристик. Тепловологісний стан. Розрахунок повітрообміну та енергопотреби. Моделювання теплових полів. Обґрунтування економічної ефективності. Заходи охорони праці та безпека в надзвичайних ситуація.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Актуальність теми. Методика проведення дослідження. Об'єкт дослідження. Основні характеристики. Паропроникність огорожувальної конструкції. Повітрообмін. Енергопотреба. Тепловізійні обстеження. Ізотерми. Коефіцієнти теплопередачі. Економічна ефективність. Загальні висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Ст. викл., Стручок В.С.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	К.т.н., доц., Каспрук В.Б.		
Нормоконтроль	Ст. викл., Мещерякова О.М.		

7. Дата видачі завдання 14.05.25

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Кусень Софія Юріївна

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Коваль Ігор Володимирович

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ	9
1.1. Проблематика енергетичної ефективності будівель	9
1.2. Процес теплообміну в огорожувальних конструкціях.....	11
1.3. Переваги термомодернізації існуючих будівель	12
1.4. Сучасні теплоізоляційні матеріали та їх характеристики.....	13
1.5. Висновки за розділом 1	14
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	16
2.1. Постановка задачі. Основні поняття теплопередачі та тепло- обмінних процесів	16
2.2. Розрахунок приведенного опору теплопередачі стіни.....	16
2.3. Моделювання теплових полів.....	17
2.4. Висновки за розділом 2	18
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	19
3.1. Об'єкт дослідження	19
3.2. Дослідження основних характеристик	25
3.2.1. Визначення температурних перепадів між температурою поверхні і температурою внутрішнього повітря	25
3.2.2. Оцінка тепловологісного стану зовнішньої стіни	26
3.2.3. Розрахунок повітрообміну за рахунок інфільтрації	29
3.2.4. Розрахунок енергопотреб для опалення	29
3.2.5. Тепловізійні обстеження	35
3.2.6. Моделювання теплових полів.....	39
3.2.7. Розрахунки лінійних коефіцієнтів теплопередачі теплопровідного включення	44
3.3. Висновки за розділом 3	48
РОЗДІЛ 4 ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ.....	50
4.1. Структура інвестицій.....	50

4.2.	Розрахунок терміну окупності.....	52
4.3.	Погашення позики	55
4.4.	Висновки за розділом 4	56
РОЗДІЛ 5 ЗАХОДИ ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯ		57
5.1.	Законодавча та нормативна база України про охорону праці.....	57
5.2.	Вимоги з техніки безпеки та охорони праці на об'єкті будівництва при утепленні будівель	58
5.3.	Вимоги з техніки безпеки та охорони праці при обстеженні об'єктів будівництва	59
5.4.	Забезпечення надійного функціонування комунально-енергетичних мереж будівлі під час надзвичайних ситуацій	60
5.5.	Висновки за розділом 5	61
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ		62
БІБЛІОГРАФІЯ		64

ВСТУП

Актуальність теми кваліфікаційної роботи зумовлена стрімким розвитком будівельної сфери, що передбачає істотне зниження енерговитрат і забезпечення комфорту проживання в будинках за одночасного дотримання екологічних норм та енергетичної ефективності. До 40% від загального споживання енергії в Україні припадає на потреби опалення будівель, та споруд, значна частка тепловтрат відбувається через огорожувальні конструкції [1]. У контексті посилення вимог державних будівельних норм, зокрема ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель» та імплементації європейських директив щодо енергоефективності будівель, постає нагальна потреба в дослідженні показників теплопровідності, а також у комплексній оцінці й оптимальному підборі теплоізоляційних матеріалів для існуючих та майбутніх споруд [2].

Актуальність проблеми зумовлена:

1. Зростанням вартості енергоносіїв, що вимагає скорочення енерговитрат у житловому і громадському будівництві.
2. Необхідністю впровадження заходів енергоефективності на всіх стадіях проектування й експлуатації будівель відповідно до міжнародних і національних стандартів.
3. Потребою у створенні комфортних і здорових умов проживання з мінімізацією втрат теплової енергії та зменшенням негативного впливу на довкілля.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, виконані в межах цієї магістерської роботи, узгоджуються з пріоритетами державної політики України у сфері енергоефективності та ресурсощадних технологій, а також енергетичної стратегії України на період до 2030 року [1]. Тематика роботи безпосередньо пов'язана з науково-дослідними роботами кафедри будівельної механіки ТНТУ, що спрямовані на оптимізацію теплового захисту будівель та вдосконалення будівельних технологій. Крім того, результати

дослідження можуть бути використані університетом в подальшому для підвищення енергоефективності навчального корпусу №10.

Метою роботи є дослідити особливості передачі теплової енергії через зовнішні стіни з керамічної цегли та керамзитових панелей з тепловою ізоляцією навчального корпусу №10 ТНТУ та розробку науково-обґрунтованих рекомендацій щодо зниження теплопровідності огорожувальних конструкцій будівлі шляхом вибору та застосування оптимального утеплювача для забезпечення нормативних показників енергоефективності для комфорту всередині приміщення.

Задачі роботи: Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- провести аналіз робіт попередників з розрахунку теплопередачі трансмісією елементів зовнішньої оболонки будівель при опаленні та кондиціюванні;
- провести чисельне моделювання теплопередачі трансмісією існуючих і проєктних елементів зовнішньої оболонки будівель;
- порівняти результати чисельного моделювання та інструментальних вимірювань згідно з нормативною методикою;
- визначити зони максимальних втрат теплової енергії на основі чисельного моделювання в реальних умовах експлуатації;
- показати вплив на приведений опір теплопередачі в режимі експлуатації зовнішніх огорожувальних конструкцій їх конструктивних і технологічних особливостей, зовнішнього і внутрішнього середовищ, інше, а також показати вплив на теплотехнічні, фізичні параметри, енергоефективність і довговічність будівлі зокрема.
- провести аналіз результатів теоретичних досліджень і інструментальних вимірювань;
- сформулювати рекомендації щодо покращення теплоефективності будівлі.

Об'єктом дослідження є огорожувальні конструкції навчального корпусу №10 ТНТУ в місцях прилягання віконних блоків, що безпосередньо впливають на величину тепловтрат і комфортний мікроклімат у приміщенні.

Предметом дослідження є динаміка змін приведенного опору теплопередачі в режимі експлуатації зовнішніх огорожувальних конструкцій в залежності від їх конструктивних і технологічних особливостей та впливу зовнішнього і внутрішнього середовищ.

Методами дослідження є

- розрахунково-теоретичні методики ДСТУ 9191:2022 та ДСТУ 9190:2022 ;
- метод чисельного моделювання, реалізований у комплексі THERM;
- інструментальні вимірювання.

Для інструментальних вимірювань використовувалися прилади:

- дальномір SNDWAY SW-T4S ;
- пірометр LAND Pocke Therm 31;
- контактний термометр ZL 128B;
- тепловізор FLUKE Ti 25;
- вимірювач вологості та температури TESTO 174 H-Logger

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

В цій роботі досліджено динаміку змін теплопередачі через зовнішні огорожувальні конструкції в залежності від значення лінійних коефіцієнтів теплопередачі в зонах теплопровідних включень, обумовленими їх конструктивними і технологічними особливостями та впливом зовнішнього і внутрішнього середовищ. Окрім цього, визначені основні параметри, які впливають на значення лінійного коефіцієнта теплопередачі теплопровідних включень для огорожувальних конструкцій. Отримані результати дослідження показують, які фактори можуть призвести до збільшення втрат теплової енергії через зовнішні огороження в реальних умовах експлуатації, погіршення санітарно-гігієнічного стану мікроклімату будівлі та виникнення теплових відмов у вигляді промерзання й утворення конденсату в місцях теплопровідного

включення, утворення плісняви та грибка на внутрішній поверхні огорожувальної конструкції. Узагальнення даних розрахункових досліджень щодо зниження теплопровідності конструкцій і досягнення нормативних показників енергоефективності. Та запропоновано метод підвищення енергоефективності будівлі.

Практичне значення отриманих результатів: вони дозволять виявити особливості додаткових втрат теплової енергії, які необхідно враховувати при проектуванні теплоізоляційної оболонки будівлі для підвищення теплових характеристик стін будівлі навчального корпусу №10 ТНТУ.

Апробація результатів магістерської роботи виконана на VIII Міжнародній студентській науково – технічній конференції Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання» [3].

Публікація результатів магістерської роботи здійснена у збірнику матеріалів Міжнародної студентської науково-технічної конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання» [3].

Ключові слова: теплопровідність, енергоефективність, утеплювач, теплові втрати, тепла ізоляція, зовнішні огорожувальні конструкції, теплопередача, інструментальні вимірювання.

РОЗДІЛ 1

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Проблематика енергетичної ефективності будівель

В Україні прийнятий і діє Закон „Про енергозбереження”, він популяризує економічні, екологічні і соціальних переваги енергозбереження, підвищення громадського освітнього рівня у цій сфері [5]. Забезпечення теплової надійності огорожувальних конструкцій встановлені різними нормами проектування ДСТУ 9191:2022, ДБН В.2.6-31:2021. Одна з наведених в ДСТУ 9191:2022 граничних нерівностей вимагає, щоб при дії встановлених нормами ДСТУ 9190:2022 та ДСТУ 9191:2022 [4,6], розрахункові температури зовнішнього середовища, а також температура внутрішньої поверхні огорожувальних елементів у зонах з підвищеною теплопровідністю не знижувалися нижче точки роси, яка залежить від температури і вологості повітря всередині приміщення.. У другій половині минулого століття в Україні масово зводилися житлові й громадські будівлі з цегляними стінами товщиною 510 мм, опір теплопередачі яких близько $0,7-1 \text{ м}^2 \cdot \text{K} / \text{Вт}$ був у чотири рази меншим від сучасних вимог ДСТУ 9191:2022, рівних $4 \text{ м}^2 \cdot \text{K} / \text{Вт}$ [6].

Виконаний в роботах попередників [7-8] аналіз температурних полів вузлів примикання вікон до таких стін показав, що температура внутрішніх відкосів може бути нижчою від температури точки роси. Це призводить до утворення конденсату на внутрішніх відкосах, що сприяє погіршенню мікроклімату в середині приміщення.

У процесі нового будівництва де запроектовано стіни з цегли, використовують утеплення фасадними матеріалами, які мають досить близькі розрахункові значення коефіцієнтів теплопровідності в межах $0,035 < \lambda < 0,050 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{K})$. Підвищення температури відкосу можливе за рахунок додаткового утеплення або перенесення віконного блоку всередину будівлі. Цю пропозицію було висловлено та підтверджено розрахунками в наукових статтях

попередників [7-8]. У статті [7] отримані температурні поля у вузлах примикання віконних блоків до стін різної конструкції при двох положеннях вікна по товщині стіни [7]. Аналізувалися температури внутрішньої поверхні стін, а також положення нульової ізотерми. В науковій роботі отримана залежність температури у критичній точці внутрішньої частини від розташування металопластикового віконного блоку в цегляній стіні, товщина якої становить 510 мм. Дослідження показують, що при встановленні вікна впритул до четверті температура на поверхні внутрішнього відкосу становить приблизно 8°C , що викликає утворення конденсату. Переміщення віконного блоку всередину приміщення значно підвищує температуру в критичній зоні відкосу. Потреба та оптимальний рівень зміщення віконного блоку всередину стін різних конструкцій при різних розрахункових температурах зовнішнього повітря вимагають більш детального обґрунтування [8]. Зміщення віконного блоку всередину приміщення значно підвищує температуру в критичній точці відкосу [8]. Потреба та обґрунтована величина переміщення віконного блоку всередину стін різних конструкцій за різних розрахункових температур зовнішнього повітря потребують більш ґрунтового обґрунтування.

На сьогоднішній день, у значної частини будівель, зокрема навчальних закладів, замінені (без утеплення фасадів і відкосів) дерев'яні вікна на металопластикові з одно- та двокамерними склопакетами з опором теплопередачі $0,6-0,75 \text{ м}^2\cdot\text{K}/\text{Вт}$, що не відповідає нормативним вимогам $0,9 \text{ м}^2\cdot\text{K}/\text{Вт}$ згідно ДБН В.2.6-31:2021 [2].

Заміна віконних блоків проводилася, в основному, з використанням монтажної піни в якості утеплювача або мінеральної вати, забутованої у монтажний зазор без ізоляції від впливу сонячного випромінювання, без улаштування паро- та гідроізоляції на основі МС-полімерів або інших матеріалів для захисту від зовнішніх опадів.

Навіть при монтажі з дотриманням нормативних вимог протягом 3-4 років експлуатації теплофізичні характеристики утеплювача в зоні примикання до стін погіршуються або місцями руйнується і сам утеплювач (монтажна піна), що призводить до збільшення лінійний коефіцієнтів теплопередачі теплопровідного

включень. Це ще раз підкреслює необхідність ретельного термографічного аналізу та комп'ютерного моделювання теплових характеристик вузлів примикання із використанням програмного забезпечення.

1.2. Процес теплообміну в огорожувальних конструкціях

Процес теплообміну в огорожувальних конструкціях є цікавим фізичним явищем. Його механізм включає три основні механізми, а саме конвекцію, теплопровідність та випромінюванням.

Теплопровідність визначає здатність матеріалу передавати тепло через свою товщу і характеризується коефіцієнтом теплопровідності λ (Вт/(м·К)). Відповідно чим це значення нижче, тим кращими є теплові характеристики матеріалу чи об'єкту. Для покращення термічного опору конструкцій використовують багатошарові матеріали, включаючи теплоізоляційні плити на основі екструдованого пінополістиролу, мінеральної вати та аерогелів, що забезпечують низьку теплопровідність [9].

Конвекція впливає на теплообмін між внутрішньою та зовнішньою поверхнею конструкцій, а також у прошарках, що містять повітря або інші гази. Розрізняють природну та примусову конвекцію. Примусова є механізмом теплопередачі для вентильованих фасадів і конструкцій із системами кондиціонування. Дослідження показують, що зменшення неконтрольованої конвекції за рахунок якісного монтажу будівельних огорожень дозволяє значно покращити енергоефективність [10]. Візуалізація теплових потоків за допомогою тепловізійних знімків або схем руху повітря дозволяє якісно оцінити вплив конвекції у характерних зонах конструкцій. Такі ілюстрації дають змогу виявити зони утворення локальних тепловтрат, зокрема в порожнинах, швах або біля стиків матеріалів, де природна або примусова конвекція посилює теплопередачу.

Променистий теплообмін відіграє важливу роль у зниженні тепловтрат через світлопрозорі конструкції, покрівлі та стіни з відбивними поверхнями. Сучасні теплоізоляційні рішення, такі як низькоемісійне (Low-E) скло та інфрачервоні

бар'єри, дозволяють значно зменшити вплив радіаційного теплообміну, зберігаючи стабільний температурний режим усередині приміщення.

1.3. Переваги термомодернізації існуючих будівель

Директива ЄС формулює ще більш суворі вимоги до стандартів енергоефективності. Деякі поправки спрямовані на прискорення рентабельного оновлення існуючих будівель, з уявленням про скорочення викидів парникових газів до 2050 року та мобілізацію інвестицій, розгортання інфраструктури електромобілів у автомобільних парках будівель, введені нові положення щодо вдосконалення інтелектуальних технологій та систем технічного будівництва, включаючи автоматизацію. Термомодернізація є важливим етапом підвищення енергоефективності житлового фонду, що приносить низку як економічних, так і соціально-екологічних переваг.

Ключовою метою термомодернізації є зниження енергоспоживання. Технічний стан більшості існуючих будівель та енергетичних систем не дозволяє забезпечувати необхідний рівень енергетичних характеристик будівель. При теплозабезпеченні об'єктів житлово-комунального комплексу до 40% марних витрат теплоти припадає на використання її в будівлях [11]. Згідно з дослідженнями, проведеними на базі Запорізького національного університету, впровадження енергоефективних заходів у багатоквартирному житловому будинку дозволяє зменшити споживання теплової енергії до 50%, що призводить до різкого зниження витрат на опалення та гаряче водопостачання [12].

Енергоефективність, в цілому є пов'язаною з великою кількістю методів, що забезпечують можливість проживання в більш енергоефективних приміщеннях [13]. Крім економічного ефекту, важливим є підвищення комфорту проживання. Проведення утеплення огорожувальних конструкцій, заміна вікон та модернізація систем опалення дозволяють забезпечити стабільний температурний режим, зменшити втрати тепла, уникнути протягів і холодних зон у приміщеннях, що безпосередньо впливає на рівень комфорту мешканців [14].

Не менш важливою є екологічна складова термомодернізації. Зменшення споживання енергоносіїв призводить до скорочення викидів парникових газів, зокрема CO₂, що сприяє зменшенню негативного впливу на довкілля [15].

Модернізовані будівлі мають вищий клас енергоефективності, оновлений зовнішній вигляд та нижчі експлуатаційні витрати, що підвищує їхню ринкову привабливість, що також є перевагою.

Крім цього, термомодернізація подовжує термін експлуатації будівель, бо додаткове утеплення захищає конструкції від негативного впливу вологи та температурних коливань, зменшуючи темпи їх зносу [12].

Також існує можливість залучення державної або інвесторської підтримки. В Україні діють програми, такі як «Енергоефективність громадських будівель в Україні», з залученням кредитних коштів Європейського інвестиційного банку, «Енергодім», що дозволяють ОСББ отримувати компенсацію частини витрат на реалізацію заходів термомодернізації [16].

Отже, термомодернізація є не лише засобом зниження витрат, але й важливою інвестицією у підвищення якості життя, довговічність будівель та збереження довкілля.

1.4. Сучасні теплоізоляційні матеріали та їх характеристики

У зв'язку з розширенням потреби термомодернізації будівель, виникає питання в її оптимізації. Економія коштів може досягатися не лише утепленнями будівель, а й покращенням якості матеріалів використаних для цього. Поряд з розв'язаннями проблеми не енергоефективності стоїть процес постійного оновлення й покращення матеріалів та технологій.

Однією з перспективних розробок є термофарба. Вона заломлює теплові потоки хвиль за допомогою мікросфер і тепловий потік не виходять за межі плівки, а повертаються до теплоносія, завдяки чому значно можна знизити енерговитрати. Варто зазначити, що на відміну від традиційних утеплювачів (мінеральна вата, пінополістирол), термофарба не забезпечує значної теплової інерції. Вона діє

переважно як відбивач теплового випромінювання. Це дозволяє не гріти зовнішню огорожувальну конструкцію, що особливо актуально в монолітно-каркасних новобудовах.

Заявлені виробниками характеристики термофарби включають коефіцієнт теплопровідності на рівні 0,001–0,03 Вт/(м·К), водостійкість, адгезію до різних поверхонь, стійкість до УФ-випромінювання та робочий температурний діапазон від –60°C до +200°C. Згідно з рекламними матеріалами, шар термофарби товщиною 1 мм може замінити до 50 мм мінераловатного утеплювача, однак ці твердження не мають достатнього підтвердження з боку незалежних лабораторних випробувань або нормативних документів, таких як ДБН В.2.6-31:2021 [2].

Ще однією інновацією у сфері утеплення є використання аерогелів. Аерогель - це тверда речовина, отримана шляхом видалення рідкої фази з гелю з мінімальною деформацією його структури. В даний час аерогель відомий як найлегший твердий матеріал у світі. Він характеризується низькою щільністю, низькою діелектричною проникністю (1,1 - 2,5) низькою теплопровідністю 0,013 - 0,025 Вт/(м·К) , високою пористістю (80 ~ 99,8%), високою питомою площею поверхні (200 - 1000 м²/г) і т.д., що дозволяє даному матеріалу проявляти особливі властивості в механіці, акустиці, теплоізоляції, оптиці і також мати перспективне майбутнє в аерокосмічній, військовій, телекомунікаційній, медичній, будівельній, електротехнічній та металургійній галузях. [17].

1.5. Висновки за розділом 1

Ознайомившись з законодавством та енергетичними стратегіями України та Європейського союзу, можна зробити висновок, що теплоефективність будівель залишається актуальним та перспективним напрямком. Увага до цієї теми на світовому полі стрімко зростає, розвивають технології та матеріали. Державним коштом створюють програми по термомодернізації існуючих будівель.

Ефективність спроектованої теплоізоляції огорожувальних конструкцій безпосередньо впливає на енергетичні втрати будівлі та її відповідність сучасним

стандартам енергоефективності [2,4]. Від вибору матеріалів і конструктивних рішень залежить рівень тепловтрат та комфортність мікроклімату всередині приміщень, що є особливо важливим для житлових і громадських будівель.

Особливо критичною є енергоефективність громадських будівель, а зокрема навчальних закладів. Дослідження показують, що зменшення неконтрольованої конвекції за рахунок якісного монтажу будівельних огорожень дозволяє значно покращити енергоефективність. Утеплення та роботи з монтажу не проводилися належним чином, та не забезпечують ефективність будівлі, що призводить до підвищеного споживання природного газу. Оскільки основні джерела втрат тепла у навчальних закладах відбуваються через огорожувальні конструкції, то це є актуальним та цікавим завданням для вивчення та дослідження.

Також, враховуючи специфіку режимів експлуатації навчальних приміщень — нерегулярне опалення у вечірній та нічний час, значні теплові навантаження вдень та високу інтенсивність повітрообміну — важливою є оцінка не лише рівня теплоізоляції, а й поведінки конструкцій у динамічних умовах. Виявлення та усунення теплових мостів, недоліків монтажу й недостатнього утеплення може суттєво знизити витрати енергії, забезпечити стабільний тепловий комфорт у класах та сприяти досягненню сучасних стандартів енергозбереження.

Сьогодні на ринку з'являється все більше інноваційних будівельних матеріалів, таких як аерогелі, вакуумні теплоізоляційні панелі, фази-перехідні матеріали та багатофункціональні утеплювачі з високим опором теплопередачі. Використання таких технологій відкриває нові можливості для значного підвищення енергоефективності будівель навіть у складних кліматичних умовах. Їх впровадження у конструктивні рішення навчальних закладів дозволяє не лише зменшити тепловтрати, а й підвищити загальну екологічну та економічну ефективність експлуатації.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Постановка задачі. Основні поняття теплопередачі та теплообмінних процесів

Теплопередачею (англ. heat transfer) називають процес перенесення теплоти від більш нагрітого ("гарячого") теплоносія до менш нагрітого ("холодного") теплоносія через роздільну стінку. Суміжне поняття це опір теплопередачі – величина, що визначає здатність конструкції чинити опір тепловому потоку, що через неї проходить – $R \text{ м}^2 \cdot \text{K}/\text{Вт}$.

Теплопередача є складним процесом обміну теплом, що складається з ряду окремих її форм. Від гарячого теплоносія до стінки, що здійснює передачу тепла, відбувається конвективний теплообмін. Всередині стінки тепло передається шляхом теплопровідності. Від стінки до холодного теплоносія також відбувається конвективний теплообмін. Варто зазначити, що поряд з конвективним теплообміном може відбуватися і променистий теплообмін. Інтенсивність теплопередачі в різних формах теплообміну визначається за відповідними формулами. Досліджувана задача стосується зовнішньої стіни, виготовленої з керамічної цегли, з одного боку якої підтримується постійна температура t_{int} і вологість w_{int} , тоді як з іншого боку спостерігаються зміни температури t_{ext} та вологості w_{ext} внаслідок змін погоди.

2.2. Розрахунок приведенного опору теплопередачі стіни

Мета теплотехнічного розрахунку огорожувальних конструкцій – визначення необхідної товщини огорожувальної конструкції, виходячи з теплотехнічних вимог, які до неї висуваються. Розрахунки, пов'язані з тепловими характеристиками будівельних конструкцій, виконуються згідно з чинними

нормативно-технічними документами, що забезпечують енергетичну ефективність і правильність методик розрахунку. Серед них:

- 1) ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель» [2], що встановлює вимоги до теплової ізоляції та енергоефективності будівельних конструкцій, окреслюючи основні принципи розрахунку теплових опорів;
- 2) ДСТУ 9190:2022 «Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання» [6], який розглядає комплексний підхід до розрахунку енергоспоживання будівель;
- 3) ДСТУ 9191:2022 «Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель» [4], що містить рекомендації щодо вибору теплоізоляційних матеріалів, які дозволяють знизити тепловтрати через конструкції.

2.3. Моделювання теплових полів

Моделювання теплових полів, проводять за допомогою методу скінчених елементів. Розрахунок у стінових конструкціях і вузлах примикань світлопрозорих конструкцій можна виконувати за допомогою програмних комплексів, зокрема THERM 7.8.

Використання комплексу THERM, дозволяє моделювати двовимірну теплопередачу в різних вузлах будівлі, а зокрема в огорожувальних конструкціях вікнах, перекриттях та інше. Програма THERM працює на основі методів скінчених елементів, що дозволяє точно моделювати теплопередачу в двовимірних перетинах будівельних конструкцій. Завдяки цьому підходу враховуються геометричні особливості вузлів, матеріальні характеристики, а також вплив температурних і вологісних умов.

Аналіз теплопередачі с допомогою програми THERM дозволяє оцінити енергетичну ефективність, розподіл теплових полів по вузлу (ізотерм), та точкову

температуру у вузлі. Це дозволяє вирішити питання, пов'язані з конденсацією, вологістю матеріалу виробу і його герметичністю.

Особливості обчислення:

- моделювання кутових коефіцієнтів (опроміненості) з урахуванням затінення та самоосвітлення, це є надзвичайно корисним для моделювання світлопрозорих конструкцій, таких як вікна теплиць, зенітні ліхтарі тощо;
- удосконалене моделювання випромінювання для порожнин рами вікна є необхідним для врахування впливу самоопромінення компонентів порожнин;
- при виборі моделювання типу "Індекс Конденсації" застосовується локальна кореляція конвекції, що забезпечує більш точні локальні розрахунки.

2.4. Висновки за розділом 2

Розглянуто основні методики розрахунку теплопередачі в огорожувальних конструкціях, що включають визначення термічного опору, аналіз енергетичної ефективності, а також двовимірне та тривимірне моделювання теплових полів у вузлах примикань. Обґрунтовано, що відповідність теплотехнічних розрахунків вимогам чинних нормативних документів (ДБН В.2.6-31:2021, ДСТУ Б В.2.6-189:2013, ДСТУ 9190:2022, ДСТУ 9191:2022) є критичною умовою забезпечення належного рівня енергоефективності, уникнення теплових містків, а також запобігання утворенню поверхневої та внутрішньої конденсації.

Моделювання теплових процесів у програмному середовищі THERM 7.8 дало змогу отримати детальну картину розподілу температур, визначити зони підвищених теплових втрат і потенційно небезпечні ділянки з точки зору вологонакопичення. Особливу увагу приділено оцінці лінійних теплопередач, які часто ігноруються у спрощених розрахунках, однак істотно впливають на загальні тепловтрати. Застосування чисельних методів, зокрема методу скінченних елементів, підвищує просторову точність аналізу, дозволяє враховувати анізотропію матеріалів, комбіновані теплофізичні властивості та складну геометрію елементів огороження.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Об'єкт дослідження

Для проведення розрахунків вибираємо фрагмент зовнішньої стіни розмірами 6,7х11,2 м з металопластиковими віконними блоками з подвійними склопакетами типу 4-10-4-10i (Аргон, коефіцієнт емісії $k=-0,15$, $U=1,1$) багатокамерних камерних рамах ($U=1,0$) навчального корпусу №10 Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (рис. 3.1) враховуючи теплопровідність конструкційних матеріалів та умови експлуатації будівлі як навчального корпусу університету.



Рисунок 3.1 – Фасад будівлі

Відповідно до географічного розташування міста будівництва визначаються такі показники зовнішнього повітря:

- найбільш холодної п'ятиденки із забезпеченістю $k = 0,92$;

- найбільш холодної п'ятиденки із забезпеченістю $k = 0,98$;
- найбільш холодної доби із забезпеченістю $k = 0,92$;
- найбільш холодної доби із забезпеченістю $k = 0,98$.

Кліматичні умови для м. Тернопіль вибираємо з ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 “Будівельна кліматологія”. Врахуємо також середньорічні температури, вологість повітря та тривалість опалювального періоду. Дослідимо фрагмент стіни (рис. 3.2) площею $75,04 \text{ м}^2$.

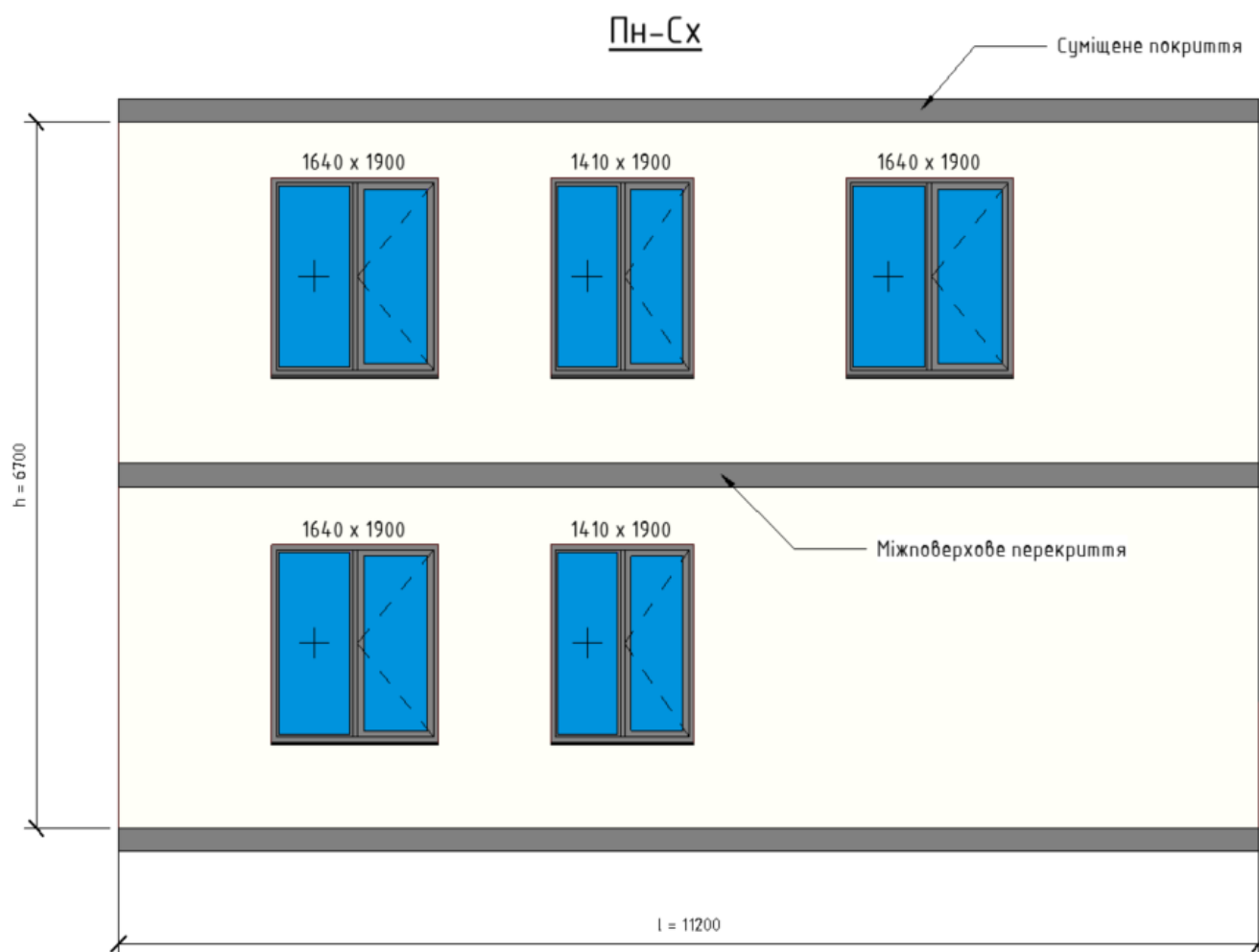


Рисунок 3.2 – Фрагмент стіни, що досліджується

Структура зовнішньої стіни (рис. 3.3):

- Розчин вапняно-піщаний густиною $\rho_0 = 1600 \text{ кг/м}^3$, теплопровідністю $0,81 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ - 3 мм;
- Цегла керамічна звичайна на цементно-піщаному розчині густиною $\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$, теплопровідністю $0,81 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ - 510 мм;

– Розчин цементно-піщаний штукатурний густиною $\rho_0=1800 \text{ кг/м}^3$ теплопровідністю $0,93 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ - 5 мм.

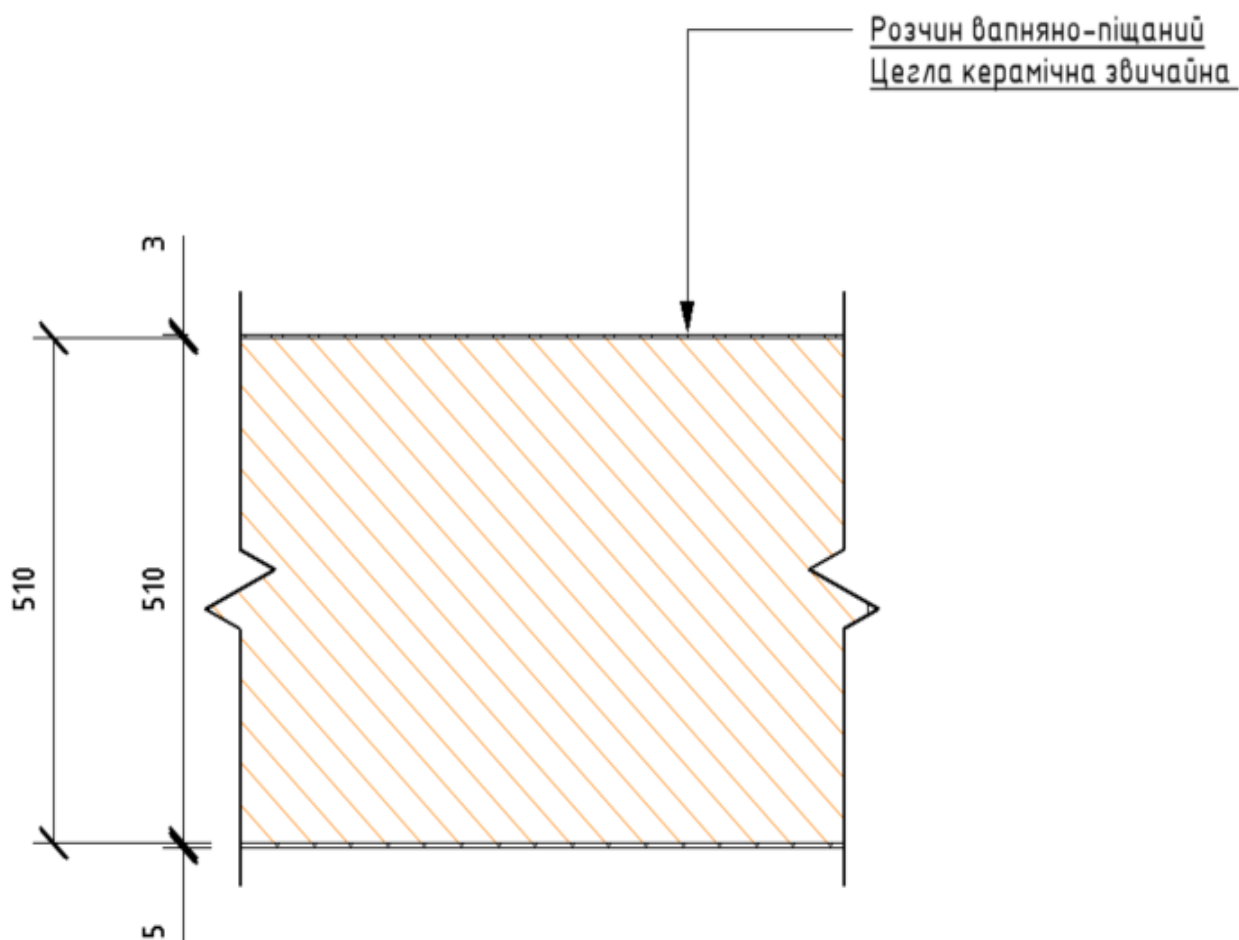


Рисунок 3.3 – Структура існуючої стіни

Опір теплопередачі стіни розраховуємо за формулою 3.1:

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{h_{si}} + \sum_{i=1}^I R_i + \frac{1}{h_{se}} = \frac{1}{h_{si}} + \sum_{i=1}^I \frac{d_i}{\lambda_{ip}} + \frac{1}{h_{se}}, \quad (3.1)$$

Додаткові складові до коефіцієнта теплопередачі (теплопровідні вclusions) не враховані згідно табл. 4 ДСТУ 9190:2022 [6] так як приведений коефіцієнт теплопередачі елемента оболонки будівлі, що використаний у розрахунку трансмісії дорівнює $1,25 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)} > 0,8$ ($U_{op} \geq 0,8$). Опір становить $0,797 \text{ м}^2\cdot\text{K/Вт}$.

Приведений опір теплопередачі віконних блоків за паспортними даними - $0,75 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

Отже, приведений опір теплопередачі зовнішньої стіни значно нижче нормативного $4,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ для I температурної зони, до якої відноситься місто Тернопіль згідно таблиці 1 з ДСТУ [14]. Проектом передбачається утеплення зовнішньої стіни мінераловатними плитами (рис. 3.4) або утеплювачем з ніздрюватого бетону. Оскільки в мінеральній ваті є значний обсяг повітря, то її коефіцієнт теплопровідності також незначний і складає $0,032 - 0,045 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ [18].

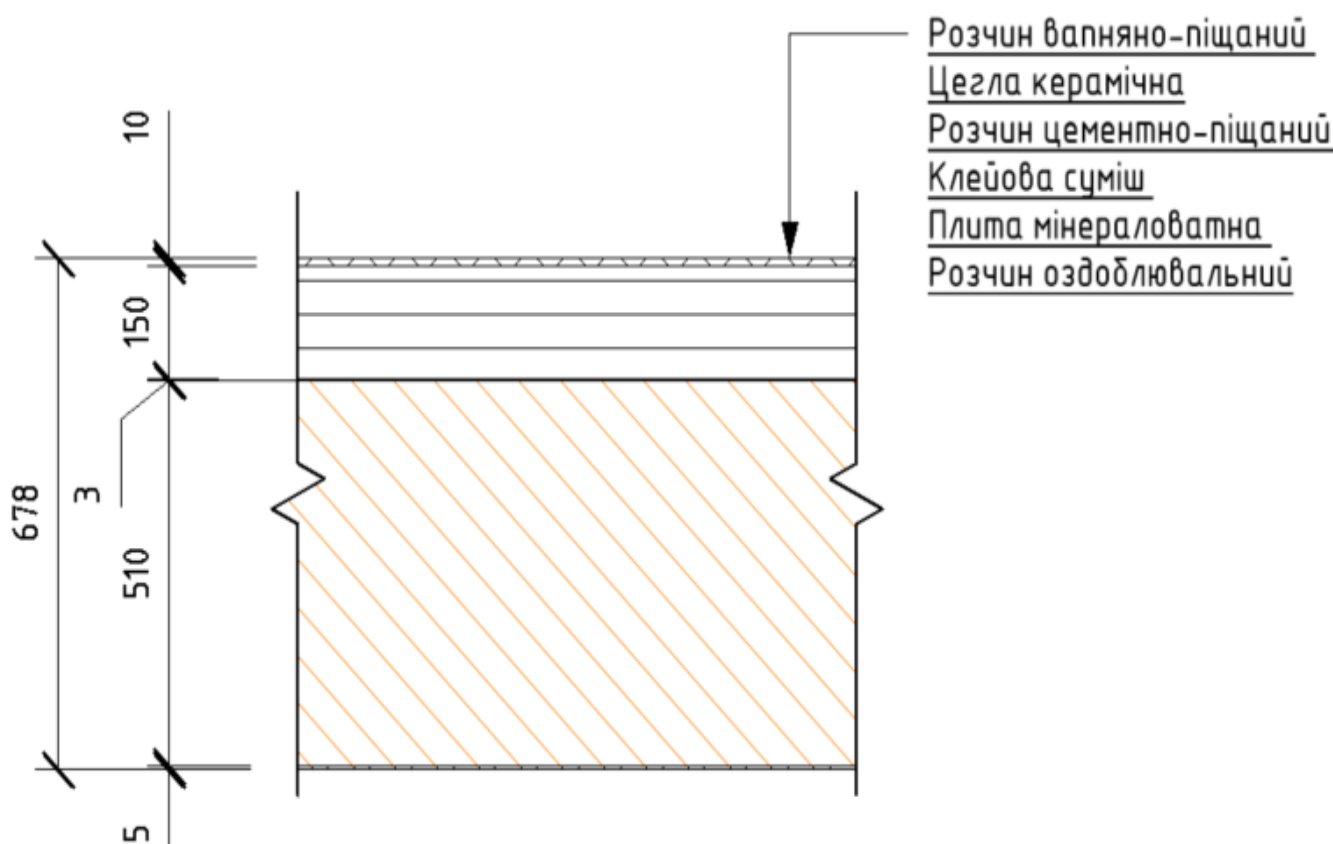


Рисунок 3.4 – Структура проекційної стіни

Структура проекційної стіни:

- Розчин вапняно-піщаний густиною $\rho_0=1600 \text{ кг}/\text{м}^3$, теплопровідністю $0,81 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ - 3 мм;
- Цегла керамічна звичайна на цементно-піщаному розчині густиною $\rho_0=1800 \text{ кг}/\text{м}^3$ теплопровідністю $0,81 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ - 510 мм;

- Розчин цементно-піщаний густиною $\rho_0=1800\text{кг/м}^3$, теплопровідністю $0,93\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ - 5 мм;
- Клейова суміш густиною $\rho_0=1600\text{кг/м}^3$, теплопровідністю $0,87\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ - 2 мм;
- Плита мінераловатна густиною $\rho_0=150\text{ кг/м}^3$, теплопровідністю $0,04\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ - 150 мм;
- Розчин оздоблювальний густиною $\rho_0=1600\text{кг/м}^3$, теплопровідністю $0,81\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ - 3 мм.

Також необхідно враховувати наявність теплопровідних включень у зоні підвіконня, у ділянках рядового мурування, а також в інших специфічних елементах конструкції фрагмента стіни, оскільки такі включення можуть суттєво впливати на результати розрахунку сумарного опору теплопередачі огорожувальної конструкції. Особливу увагу слід приділити місцям примикання віконних блоків, які є потенційними зонами підвищених втрат тепла. З метою врахування зазначених факторів у розрахунках використано положення чинних нормативних документів, а саме з ДБН В.2.6-31:2021 [4], які адаптовані до умов конкретного розрахунку та зведено у таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Табличні значення теплопровідних включень

Теплопровідні включення	Зона перемички	Зона рядового включення	Зона підвіконня	Зона примикання міжповерхового покриття	Точкові елементи (пластиковий дюбель з металевим стрижнем)
Розмір, м	4,920	19,000	4,920	11,200	483,000
Коефіцієнт теплопередачі, $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$	0,081	0,071	0,064	0,073	0,005

Значення розрахункового опору теплопередачі огорожувальної конструкції приймається згідно з нормативними вимогами, наведеними в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Значення опору теплопередачі огорожувальної конструкції

Вид огорожувальної конструкції	Значення опору теплопередачі огорожувальної конструкції, (м²·К/Вт)		Площа А, м²
	Визначене за результатами сертифікації	Встановлені мінімальні вимоги до енергетичної ефективності	
Зовнішні стіни	3,25	4,00	60,33

Приведений опір теплопередачі проєктної зовнішньої стіни становить 3,25 м²·К/Вт, що є в межах допустимих мінімальних вимог зі зниженням до 75% згідно п. 5.2.2 [2] при реконструкції, капітальному ремонті визначених проєктною документацією частин будівлі, у тому числі з метою термомодернізації, для непрозорих огорожувальних конструкцій, світлопрозорих огорожувальних конструкцій та зовнішніх дверей в місцях загального користування багатоквартирних житлових і громадських будівель допускається зниження значень приведенного опору теплопередачі до рівня 75% від R_{qmin} при обов'язковому виконанні умов для цих елементів теплоізоляційної оболонки за формулами 4-5 з ДБН [14] які встановлюють відповідність геометричних параметрів конструкції та її теплоізоляційних характеристик, і формулою 6 [2], яка регламентує допустимі втрати тепла через будівельну огорожу.

Для зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель і споруд, що підлягають опаленню та/або охолодженню, а також внутрішніх розділових конструкцій, температура повітря в яких відрізняється на 4°C та більше, передбачено обов'язкове виконання умов:

- $R_{\Sigma pr} \geq R_{qmin}$ – формула 4 [2];
- $\Delta\theta_{int-si} \leq \Delta\theta_{int-si,max}$ – формула 5 [2];
- $\theta_{tb,si,min} > \theta_{si,min}$ – формула 6 [2].

3.2. Дослідження основних характеристик

3.2.1. Визначення температурних перепадів між температурою поверхні і температурою внутрішнього повітря

При аналізі теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій допустима за санітарно-гігієнічними вимогами Різниця між температурою повітря всередині приміщення і приведеною температурою внутрішньої стінки огорожувальної конструкції $\Delta\theta_{\text{int-si,max}}$ °C подана в таблиці 3.3 згідно ДБН В 2.6.31-2021 [2].

Таблиця 3.3 – Допустима різниця між температурою внутрішнього повітря і приведеною температурою внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції

Призначення будівлі	Вид огорожувальної конструкції		
	Стіни (зовнішні, внутрішні), світлопрозорі фасади	Покриття та перекриття неопалюваних горищ	Перекриття, що межують із зовнішнім повітрям, над неопалюваними підвалами та підлог на ґрунті в опалюваних приміщеннях
Житлові будівлі та будівлі закладів освіти та закладів охорони здоров'я	4,0°C	3,0°C	2,0°C

Температура внутрішньої поверхні непрозорих огорожувальних конструкцій $\theta_{si,H,i}$, визначаємо за формулою К.3 з додатку К [2], прозорих конструкцій $\theta_{si,пр,C}$ – за формулою К.6 з додатку К [2]. Результати розрахунків вносимо в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Температура внутрішньої поверхні огорожувальних конструкцій

Назва внутрішньої поверхні	Зовнішня стіна	Віконна рама	Склопакет
Температура, °C	18,52	14,80	14,20

Приведена температура внутрішньої поверхні огорожувальних конструкцій $\theta_{si,пр,Н}$, визначена за формулою К.5 Додатка К [19] становить 17,7 °С.

3.2.2. Оцінка тепловологісного стану зовнішньої стіни

Оцінка тепловологісного стану зовнішньої стіни має вирішальне значення для забезпечення надійної роботи огорожувальних конструкцій. Вона дозволяє виявити ризики накопичення вологи в шарах стіни, що може призвести до зниження теплозахисних властивостей матеріалів, появи конденсату та інше. Такий розрахунок є обов'язковим для дотримання будівельних норм, зокрема ДСТУ-Н Б В.2.6-192:2013, і сприяє зменшенню тепловтрат та витрат на опалення. Крім того, своєчасна оцінка дозволяє оптимізувати конструктивні рішення ще на етапі проектування та уникнути дорогого ремонту в майбутньому. Оцінку тепловологісного стану зовнішньої стіни виконуємо згідно п.п. 4.2.4.4-4.2.4.9 [20]. Для візуальної оцінки результати демонструють у виді графіку (рис. 3.5).

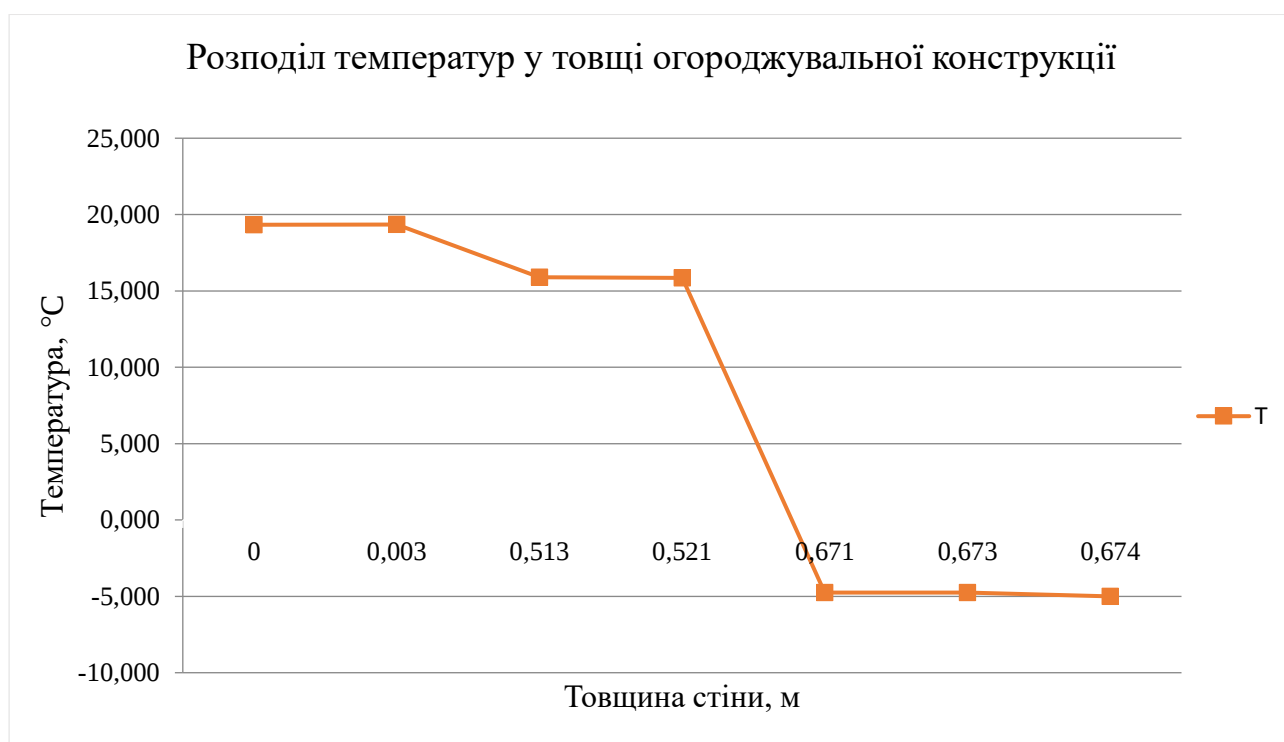


Рисунок 3.5 – Залежність розподілу температур у товщі огорожувальної конструкції

Для оцінки вологонакопичення в конструкції важливо визначити місце, де відбувається конденсація вологи, а також порівняти кількість водяної пари, що надходить до зони конденсації, з тією, що з неї виводиться. Зона конденсації вологи - між шарами 6 і 7 між утеплювачем і зовнішньою штукатуркою (рис. 3.6).

Кількість водяної пари, що надходить до зони конденсації визначаємо за формулою $i_v = (e_v - p_k) / R_{св} = 136,6 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$, а кількість водяної пари, що виводиться з зони конденсації назовні - за формулою $i_z = (p_k - e_z) / R_{сз} = 108,6 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

Кількість вологи, що конденсується в конструкції за розрахунковий місяць січень визначаємо за формулою $W = \tau \cdot (i_v - i_z) \cdot 10^{-6} = 31 \cdot 24 \cdot (136,6 - 108,6) \cdot 10^{-6} = 0,021 \text{ кг}/\text{м}^2$. Це означає, що в січні в конструкції накопичується 0,021 кг вологи на квадратний метр. Такий обсяг вологи є допустимим і не створює загрози для нормальної експлуатації огорожувальної конструкції. Отже, теплозахисні та паропроникні властивості стіни відповідають нормативним вимогам.

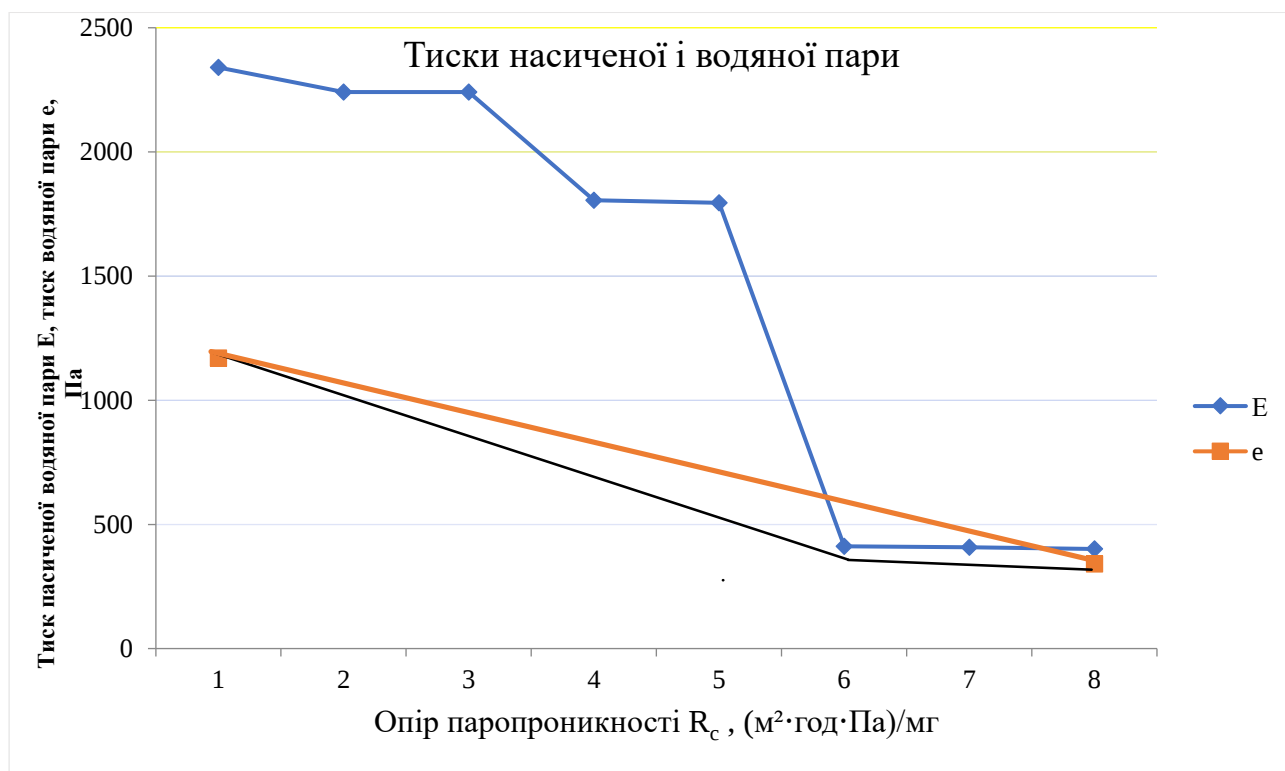


Рисунок 3.6 – Залежність тисків насиченої та водяної пари від опору паропроникності огорожувальної конструкції

Отримане значення показує, що у даній зоні конструкції спостерігається накопичення вологи, що потребує подальшої перевірки на відповідність допустимим нормативним обмеженням. Проводимо розрахунки для кожного місяця та складаємо узагальнюючу таблицю 3.5 для аналізу балансу вологи за рік.

Таблиця 3.5 – Баланс вологи за рік

Місяць опалювального періоду	Кількість вологи, що конденсується в огорожувальній конструкції, кг/м ²	Кількість вологи, що випарувалась з зони конденсації, кг/м ²
Листопад	0,007	-
Грудень	0,019	-
Січень	0,021	-
Лютий	0,140	-
Березень	0,006	-
Квітень	0	0,019
Травень	0	0,048
Сумарно за рік	0,067	0,067

Розрахунок приросту вологи в холодний період року у теплоізоляційному шарі з мінеральної вати, що прилягає до зони конденсації розраховуємо за формулою 3.2 що є формулою 8 [20]

$$\Delta w = \frac{W_{\text{зп}}}{\delta_k \cdot \rho_k} \cdot 100\% = \frac{0,067}{0,15 \cdot 150} \cdot 100\% = 0,298\% , \quad (3.2)$$

де, $W_{\text{зп}}$ – сумарна кількість вологи, що накопичується за весь період, кг/м²;

δ_k - товщина шару матеріалу, в якому конденсується волога, м;

ρ_k – густина шару матеріалу, в якому конденсується волога, кг/м³.

Отже приріст вологи становить 0,298%. Допустиме за теплоізоляційними характеристиками збільшення вологості мінеральної вати $\Delta w\%$ за масою, в конструкції в холодний період року згідно з таблицею 5 [19] становить 2,5% . Що відповідає вимогами чинних ДБН.

3.2.3. Розрахунок повітрообміну за рахунок інфільтрації

З метою врахування повітрообміну між внутрішнім і зовнішнім середовищем, що впливає на тепловтрати будівлі, кратність інфільтрацією розраховувалась згідно п. 9.2.3.1 [6] і становить:

- $n_{inf,H} = 0,121 \text{ год}^{-1}$ – для режиму опалення утепленого фрагменту фасаду;
- $n_{inf,H} = 0,134 \text{ год}^{-1}$ – для режиму опалення існуючого неутепленого фрагменту фасаду.

3.2.4. Розрахунок енергопотреб для опалення

Розрахунок енергопотреб для опалення виконано у відповідності до ДСТУ 9190:2022 «Енергетична ефективність будівель. При розрахунку енергопотреб на опалення враховувалися теплопередача трансмісією та вентиляцією (тільки за рахунок інфільтрації), сонячні теплові надходження, внутрішні теплові надходження (від людей і освітлення). Результати розрахунків вносимо в таблицю 3.6, додаємо сумарну теплопередачу для кожного місяця опалювального сезону.

Позначення використані в таблицях 3.6 – 3.11:

- θ_e – середньомісячна температура зовнішнього середовища, °C;
- Q_{tr} – теплопередача трансмісією, кВт·год;
- Q_{ve} – теплопередача вентиляцією, кВт·год;
- $Q_{H,ht}$ – сумарна теплопередача, кВт·год;
- Q_{sol} – сонячні теплові надходження, кВт·год;
- Q_{int} – внутрішні теплові надходження, кВт·год;
- $Q_{H,gn}$ – сумарні теплові надходження, кВт·год;

- $Q_{H,nd}$ – енергопотреба для опалення, кВт·год;
- $\eta_{H,gn}$ – безрозмірний коефіцієнт використання надходжень для опалення, визначений згідно розділу 12 [4];
- γ_H – безрозмірне співвідношення надходжень і втрат теплоти для режиму опалення, визначене згідно розділу 12 [4].

Таблиця 3.6 – Сумарна теплопередача трансмісією для опалення з існуючою стіною (неутепленою)

Місяць року	θ_c , °C	Кількість днів	Тривалість нормально заданого режиму опалення, год	Тривалість чергового режиму опалення, год	Q_{tr} для нормально заданого режиму опалення, кВт·год	Q_{tr} для чергового режиму опалення, кВт·год	Q_{tr} , кВт·год
1	-5,0	31	299,0	445,0	711,45	931,78	1643,23
2	-3,7	29	292,0	404,0	658,66	795,95	1454,61
3	0,4	31	290,0	454,0	540,99	717,29	1258,28
4	7,6	15	152,0	208,0	179,39	186,09	365,48
5	-	-	-	-	0	0	0
6	-	-	-	-	0	0	0
7	-	-	-	-	0	0	0
8	-	-	-	-	0	0	0
9	-	-	-	-	0	0	0
10	7,5	18	176,0	256,0	209,39	231,47	440,86
11	1,8	30	297,0	423,0	514,47	611,95	1126,42
12	-3,1	31	297,0	447,0	652,98	855,14	1508,12
Усього	-	-	-	-	3467,33	4329,67	7797,0

Для обґрунтування доцільності впровадження теплоізоляційних рішень необхідно порівняти енергетичні характеристики огорожувальних конструкцій у різних режимах експлуатації. У таблиці 3.7 наведено підсумкові показники енергопотреби з урахуванням тривалості роботи системи опалення. Ці дані

дозволяють глибше проаналізувати ефективність функціонування системи в умовах реального режиму експлуатації. Отримані результати формують основу для порівняльного аналізу енергоефективності конструкцій і дозволяють обґрунтувати вибір раціональних рішень у проєктуванні огорожувальних елементів.

Таблиця 3.7 – Показники розрахунку енергопотреб для опалення з існуючою стіною (неутепленою)

Місяць року	Параметр								
	$Q_{H,ir}$, кВт·год'	$Q_{H,ve}$, кВт·год	$Q_{H,ht}$, кВт·год	$Q_{H,sol}$, кВт·год	$Q_{H,inf}$, кВт·год	$Q_{H,gn}$, кВт·год	γ_H	$\eta_{H,gn}$	$Q_{H,nd}$, кВт·год
Січень	1643,23	229,04	1872,27	23,78	290,00	313,78	0,17	1,00	1558,50
Лютий	1454,61	202,75	1657,36	79,51	290,00	369,51	0,22	1,00	1287,88
Березень	1258,28	175,38	1433,66	170,71	300,00	470,71	0,33	1,00	963,39
Квітень	365,48	50,94	416,42	230,37	300,00	265,18	0,64	0,97	158,21
Травень	0,00	0,00	0,00	378,85	280,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Червень	0,00	0,00	0,00	402,18	280,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Липень	0,00	0,00	0,00	378,85	310,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Серпень	0,00	0,00	0,00	311,51	00,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Вересень	0,00	0,00	0,00	171,12	300,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Жовтень	440,86	61,45	502,31	66,63	300,00	212,88	0,42	1,00	290,19
Листопад	1126,42	157,00	1283,42	11,16	300,00	311,16	0,24	1,00	972,32
Грудень	1508,12	210,21	1718,32	-6,83	300,00	293,17	0,17	1,00	1425,16
Всього за рік	7797,00	1086,76	8883,77	2217,84	3550,00	2236,40	2,19	11,97	6655,65

Після впровадження проєктного утеплення зовнішніх стін змінилися характеристики теплопередачі. У таблиці 3.8 представлено, як саме вплинуло утеплення на сумарну тепловтрату через стіни з урахуванням табличних теплопровідних включень.

Таблиця 3.8 – Сумарна теплопередача трансмісією (для опалення) з проєктною (утепленою) стіною з врахуванням табличних теплопровідних включень

Місяць року	$\theta_c, ^\circ\text{C}$	Кількість днів	Тривалість роботи системи опалення, год	Тривалість скидання, год	Q_{tr} без скидання, кВт·год	Q_{tr} зі скиданням, кВт·год	Q_{tr} , кВт·год
1	-5,0	31	299,0	445,0	284,36	372,43	656,79
2	-3,7	29	292,0	404,0	263,26	318,13	581,4
3	0,4	31	290,0	454,0	216,23	286,7	502,93
4	7,6	15	152,0	208,0	71,7	74,38	146,08
5	-	-	-	-	0	0	0
6	-	-	-	-	0	0	0
7	-	-	-	-	0	0	0
8	-	-	-	-	0	0	0
9	-	-	-	-	0	0	0
10	7,5	18	176,0	256,0	83,69	92,52	176,21
11	1,8	30	297,0	423,0	205,63	244,59	450,22
12	-3,1	31	297,0	447,0	260,99	341,79	602,79
Усього	-	-	-	-	1385,87	1730,54	3116,41

Розрахунок річної енергопотребі з урахуванням зміненої теплопередачі виконано на основі даних таблиці 3.8, а результати наведено в таблиці 3.9. Це дозволяє порівняти ефективність утепленої конструкції зі старим варіантом.

Таблиця 3.9 – Показники розрахунку енергопотребі для опалення з проєктною стіною з врахуванням табличних теплопровідних включень

Місяць року	Параметр								
	$Q_{H,tr}$, кВт·год	$Q_{H,ve}$, кВт·год	$Q_{H,ht}$, кВт·год	$Q_{H,sol}$, кВт·год	$Q_{H,int}$, кВт·год	$Q_{H,gn}$, кВт·год	γ_H	$\eta_{H,gn}$	$Q_{H,nd}$, кВт·год
Січень	656,79	205,11	861,90	52,61	290,00	342,61	0,40	1,00	519,29
Лютий	581,40	181,56	762,96	94,52	290,00	384,52	0,50	1,00	378,51

Продовження таблиці 3.9

Місяць року	Параметр								
	$Q_{H,tr}$, кВт·год	$Q_{H,ve}$, кВт·год	$Q_{H,ht}$, кВт·год	$Q_{H,sol}$, кВт·год	$Q_{H,int}$, кВт·год	$Q_{H,gn}$, кВт·год	γ_H	$\eta_{H,gn}$	$Q_{H,nd}$, кВт·год
Березень	502,93	157,06	659,98	168,83	300,00	468,83	0,71	0,99	193,68
Квітень	146,08	45,62	191,70	214,93	300,00	257,47	1,34	0,74	0,00
Травень	0,00	0,00	0,00	333,47	280,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Червень	0,00	0,00	0,00	350,83	280,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Липень	0,00	0,00	0,00	333,47	310,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Серпень	0,00	0,00	0,00	280,21	300,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Вересень	0,00	0,00	0,00	168,07	300,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Жовтень	176,21	55,03	231,24	86,51	300,00	224,43	0,97	0,93	21,58
Листопад	450,22	140,60	590,82	41,54	300,00	341,54	0,58	1,00	249,52
Грудень	602,79	188,24	791,03	28,40	300,00	328,40	0,42	1,00	462,63
Всього за рік	3116,41	973,22	4089,63	2153,42	3550,00	2347,80	4,92	11,67	1825,21

Окремо було проаналізовано тепловтрати виключно через термомодернізований фрагмент зовнішнього огороження будівлі, без врахування теплопровідних включень. Дані з таблиці 3.10 показують, як змінюється загальна теплопередача в такому випадку.

Таблиця 3.10 – Сумарна теплопередача трансмісією для опалення з проектною (утепленою) стіною без врахування теплопровідних включень

Місяць року	θ_c , °C	Кількість днів	Тривалість роботи системи опалення, год	Тривалість скидання, год	Q_{tr} без скидання, кВт·год	Q_{tr} зі скиданням, кВт·год	Q_{tr} , кВт·год
1	-5,0	31	299,0	445,0	244,78	320,59	565,37
2	-3,7	29	292,0	404,0	226,62	273,85	500,47
3	0,4	31	290,0	454,0	186,13	246,79	432,92
4	7,6	15	152,0	208,0	61,72	64,03	125,75

Продовження таблиці 3.10

Місяць року	$\theta_c, ^\circ\text{C}$	Кількість днів	Тривалість роботи системи опалення, год	Тривалість скидання, год	Q_{tr} без скидання, кВт·год	Q_{tr} зі скиданням, кВт·год	Q_{tr} , кВт·год
5	-	-	-	-	0	0	0
6	-	-	-	-	0	0	0
7	-	-	-	-	0	0	0
8	-	-	-	-	0	0	0
9	-	-	-	-	0	0	0
10	7,5	18	176,0	256,0	72,04	79,64	151,68
11	1,8	30	297,0	423,0	177,01	210,55	387,56
12	-3,1	31	297,0	447,0	224,66	294,22	518,88
Усього	-	-	-	-	1192,97	1489,67	2682,64

З метою повнішої картини, у таблиці 3.11 подано підсумкові показники енергопотреби для термомодернізованої будівлі за умов повного виключення теплових втрат через місця примикання віконних конструкцій та міжповерхового перекриття до фрагмента зовнішньої стіни.

Таблиця 3.11 – Показники розрахунку енергопотреби для опалення з проєктною (утепленою) стіною без врахування теплопровідних включень

Місяць року	Параметр								
	$Q_{H,tr}$, кВт·год'	$Q_{H,ve}$, кВт·год	$Q_{H,ht}$, кВт·год	$Q_{H,sol}$, кВт·год	$Q_{H,int}$, кВт·год	$Q_{H,gn}$, кВт·год	γ_H	$\eta_{H,gn}$	$Q_{H,nd}$, кВт·год
Січень	565,37	205,11	770,48	55,29	290,0	345,29	0,45	1,00	425,20
Лютий	500,47	181,56	682,04	95,91	290,00	385,91	0,57	1,00	296,23
Березень	432,92	157,06	589,98	168,66	300,00	468,66	0,79	0,99	126,42
Квітень	125,75	45,62	171,37	213,50	300,00	256,75	1,50	0,67	0,00
Травень	0,00	0,00	0,00	329,27	280,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Червень	0,00	0,00	0,00	346,08	280,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Липень	0,00	0,00	0,00	329,27	310,00	0,00	0,00	1,00	0,00

Продовження таблиці 3.11

Місяць року	Параметр								
	$Q_{H,tr}$, кВт·год'	$Q_{H,ve}$, кВт·год	$Q_{H,ht}$, кВт·год	$Q_{H,sol}$, кВт·год	$Q_{H,int}$, кВт·год	$Q_{H,gn}$, кВт·год	γ_H	$\eta_{H,gn}$	$Q_{H,nd}$, кВт·год
Серпень	0,00	0,00	0,00	277,31	300,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Вересень	0,00	0,00	0,00	167,79	300,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Жовтень	151,68	55,03	206,71	88,35	300,00	225,50	1,09	0,88	0,00
Листопад	387,56	140,60	528,16	44,36	300,00	344,36	0,65	1,00	184,27
Грудень	518,88	188,24	707,13	31,67	300,00	331,67	0,47	1,00	375,47
Всього за рік	2682,64	973,22	3655,86	2147,45	3550,00	2358,13	5,52	11,54	1407,59

Теплопередача трансмісією через фрагмент проєктної (утепленої) огорожувальної конструкції з урахуванням теплопровідних включень в зоні примикання віконних конструкцій (в зонах перемичок, підвіконня, рядового примикання) та в зоні міжповерхового перекриття (11,2 м) у 2,5 разів менша у порівнянні з теплопередачею через існуючу стіну. Економія становитиме 4681 кВт·год теплової енергії за рік. Втрати теплоти через вузли примикання віконних блоків до зовнішньої стіни та в зоні міжповерхового перекриття (теплопровідні включення) для заданого фрагмента зовнішніх огорожень становлять 434 кВт·год за рік.

3.2.5. Тепловізійні обстеження

Оцінка стану конструкцій на різних етапах експлуатації будівель дозволяє виявити дефектні конструкції, що руйнуються, встановлює ознаки, причини, міру і межі ушкоджень з тим, щоб своєчасно і якісно провести їх ремонт [21]. Тепловізійна діагностика необхідна для якісного виявлення локальних зон зниженої термічної однорідності в огорожувальних конструкціях, що впливають на загальний опір теплопередачі. Це дозволяє зафіксувати наявність містків холоду, дефектів утеплення, порушень у зоні монтажних швів віконних блоків або неефективних стиків між конструктивними елементами.

У межах теплотехнічної оцінки будівлі тепловізійне обстеження дозволяє:

- локалізувати порушення в зоні примикання вікон до зовнішніх стін (наприклад, недостатнє ущільнення монтажного шва);
- виявити дефекти шару утеплення, включно з відшаруванням або зонами з пониженою щільністю;
- оцінити однорідність розподілу температури по площині фасаду, що важливо при порівнянні з розрахунковими моделями.

Тепловізійна діагностика ґрунтується на реєстрації інфрачервоного випромінювання, що дозволяє отримати візуалізовано температурне поле поверхонь. Обстеження віконних конструкцій (рис. 3.7-3.10), дає змогу визначити фактичне положення зони ізотерми $+12,6^{\circ}\text{C}$, що критична з точки зору санітарно-гігієнічних вимог ДБН [2].

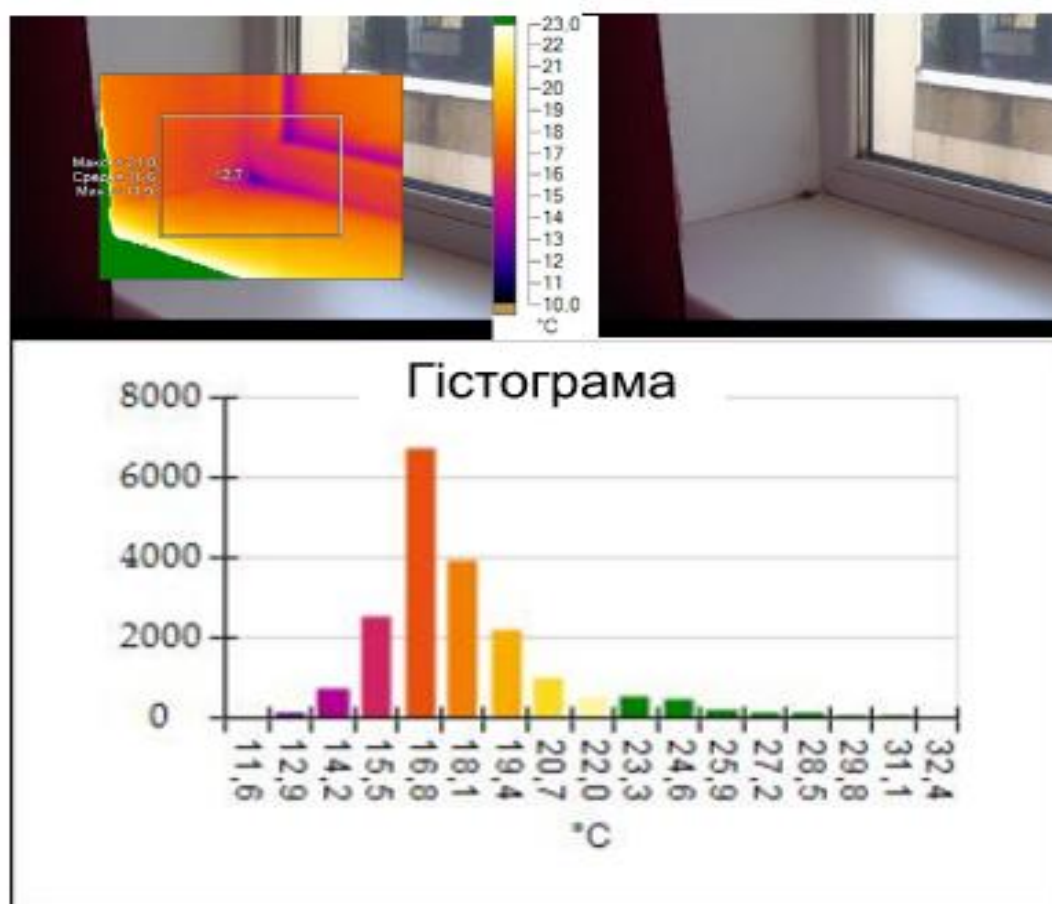


Рисунок 3.7 - Тепловізійне обстеження нижнього лівого кута примикання віконного блоку

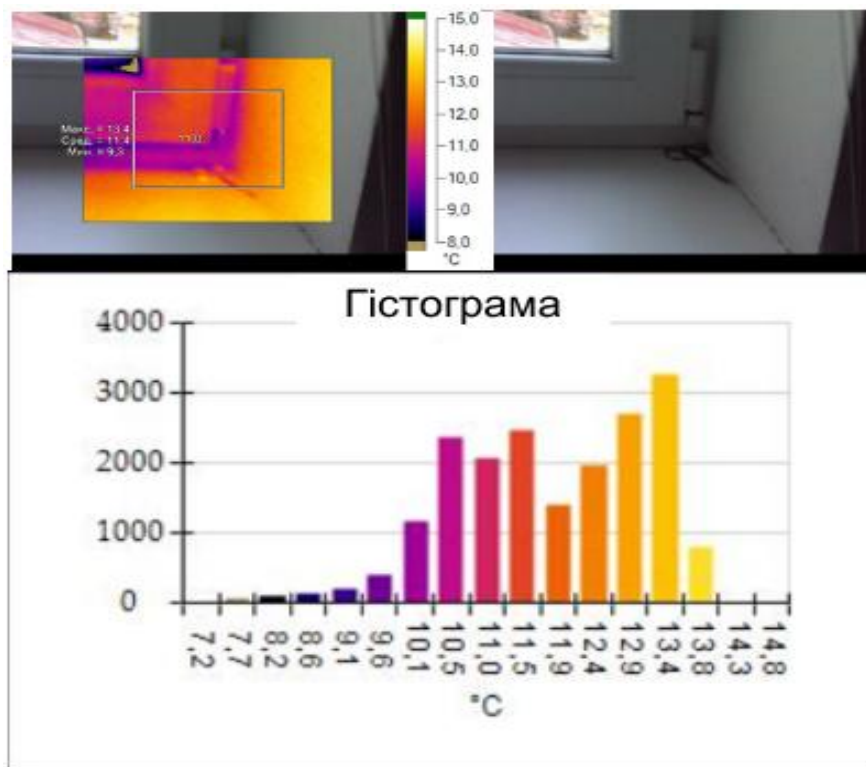


Рисунок 3.8 - Тепловізійне обстеження нижнього правого кута примикання віконного блоку

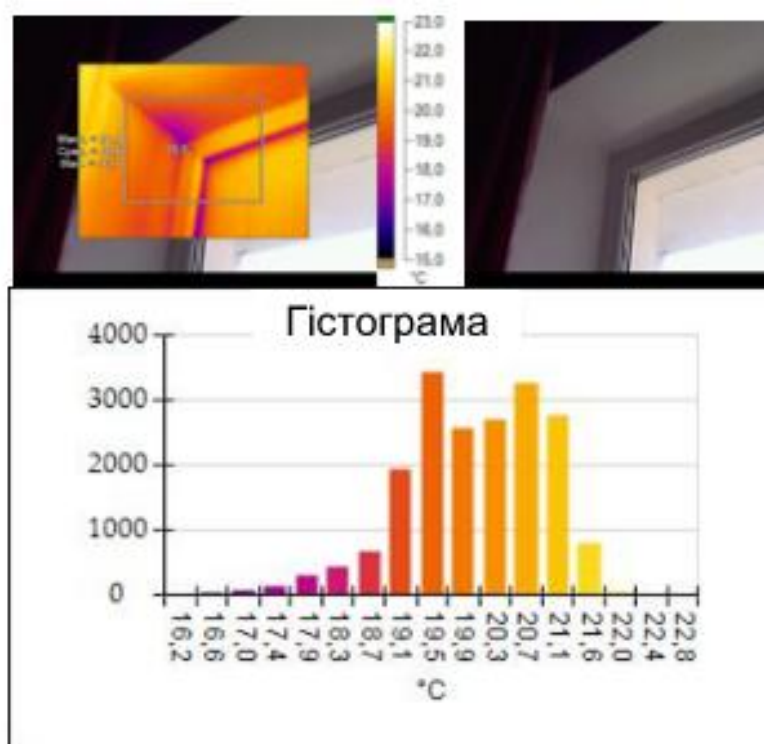


Рисунок 3.9 - Тепловізійне обстеження верхнього лівого кута примикання віконного блоку

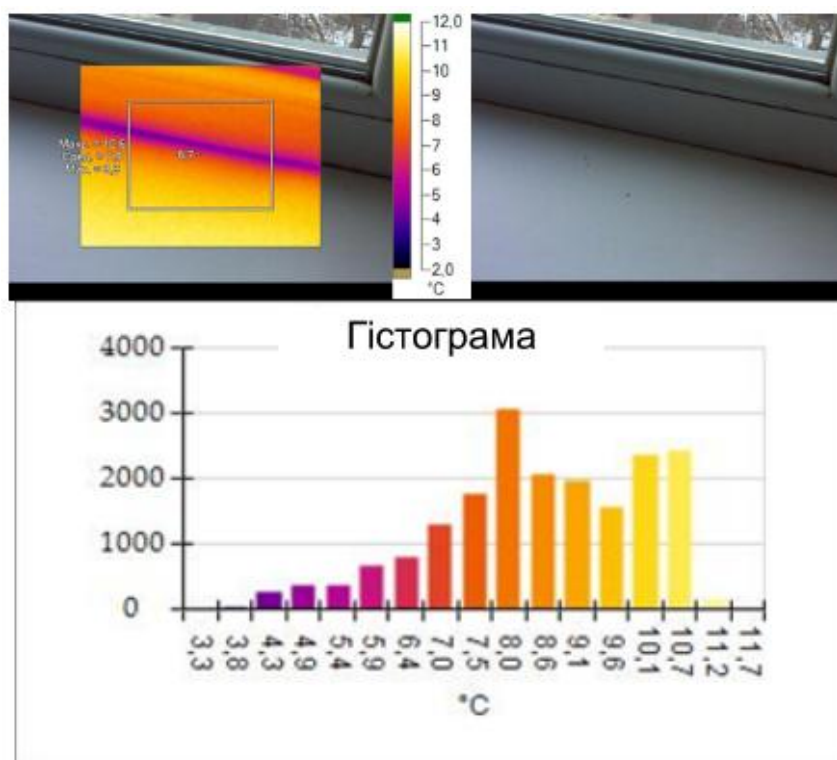


Рисунок 3.10 – Тепловізійне обстеження нижнього шва примикання віконного блоку

Як видно з результатів тепловізійного обстеження температура в зонах теплопровідних включень в місцях примикання віконних конструкцій до стіни є різною. Температура на поверхні окремих ділянок зони теплопровідних включень є значно нижчою температури на інших ділянках. Це, найвірогідніше, є результатом недотриманням технологічних вимог з монтажу віконних блоків (наявність містків холоду, які є причиною зниження температури на внутрішніх поверхнях віконних прорізів). Монтажний шов примикання до віконного прорізу має відповідати вимогам розділів 5.2, 5.3 та 5.4 ДСТУ Б В.2.6-79:2009 «Шви з'єднувальні місць примикань віконних блоків до конструкцій стін. Загальні технічні умови», та розділу 6.8 ДСТУ-Н Б В.2.6-146:2010 «Настанова щодо проектування і улаштування вікон та дверей». Зокрема, з'єднувальний шов повинен бути виконаний з застосуванням паро-, гідро-, теплоізоляційних матеріалів.

Тепловізійне обстеження не забезпечує достовірних вимірювань температури в зоні теплопровідних включень із-за впливу зовнішніх факторів (сонячна радіація,

теплові надходження від людей, побутових приладів), а дозволяє лише візуально визначити окремі критичні зони з відносним зниженням температури.

Розрахунок лінійних коефіцієнтів теплопередачі в зоні теплопровідних включень рекомендується виконувати шляхом моделювання температурних полів вузлів примикання.

3.2.6. Моделювання теплових полів

Моделювання теплових полів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та вузлах примикання світлопрозорих елементів виконувалося з використанням програмного комплексу THERM 7.8. Цей програмний комплекс є Американською розробкою, створеною в Каліфорнійському університеті. Цей інструмент дозволяє з високою точністю розраховувати двовимірні процеси теплопередачі у будівельних конструкціях з урахуванням їх геометрії та фізико-технічних властивостей матеріалів.

Вхідними даними для моделювання є: геометрія вузла, теплопровідність, щільність і теплоємність матеріалів, температурні умови зовнішнього й внутрішнього повітря, а також коефіцієнти тепловіддачі на поверхнях конструкції.

Програма THERM базується на методі скінченних елементів, що забезпечує можливість точної побудови температурного поля навіть у конструкціях зі складною конфігурацією та неоднорідною структурою.

Графічний інтерфейс дозволяє формувати поперечні перерізи вузлів для подальшого теплотехнічного аналізу. Результати розрахунку зображають у вигляді ізотерм, напрямків і густини теплових потоків, а також температурних значень у вузлових точках, що забезпечує комплексне уявлення про поведінку конструкції в тепловому режимі.

Ізотерми дозволяють точно відслідковувати теплові деформації поля та зони підвищеного ризику утворення точок роси. Їх конфігурація наочно демонструє ефективність теплоізоляційних рішень і ступінь впливу теплопровідних включень.

Особливу увагу приділяють розташуванню граничних температур, що визначають допустимі межі з точки зору санітарно-гігієнічних і експлуатаційних вимог.

Проаналізуємо стан відповідає цегляній стіні навчального закладу, введеного в експлуатацію у 2000 році. Приведений опір теплопередачі не відповідає мінімально допустимим нормативним вимогам згідно ДБН [2]. У будівлі дерев'яні вікна замінені на сучасні металопластикові конструкції без додаткового утеплення фасаду. Ущільнення вузла виконано монтажною піною без використання спеціальних ізоляційних виробів згідно з вимогами настанови [20], а внутрішні відкоси - з піщано-цементної штукатурки. Вікна встановлені практично впритул (на відстані 10-15 мм) до чверті в цегляній стіні.

З схеми (рис. 3.11) видно, що при такому положенні вікна температура критичної зони внутрішнього відкосу $t_{cr} = +8,7^{\circ}\text{C}$ є нижчою від температури точки роси $+9,3^{\circ}\text{C}$. Це обумовлює можливість утворення конденсату на поверхні відкосу.

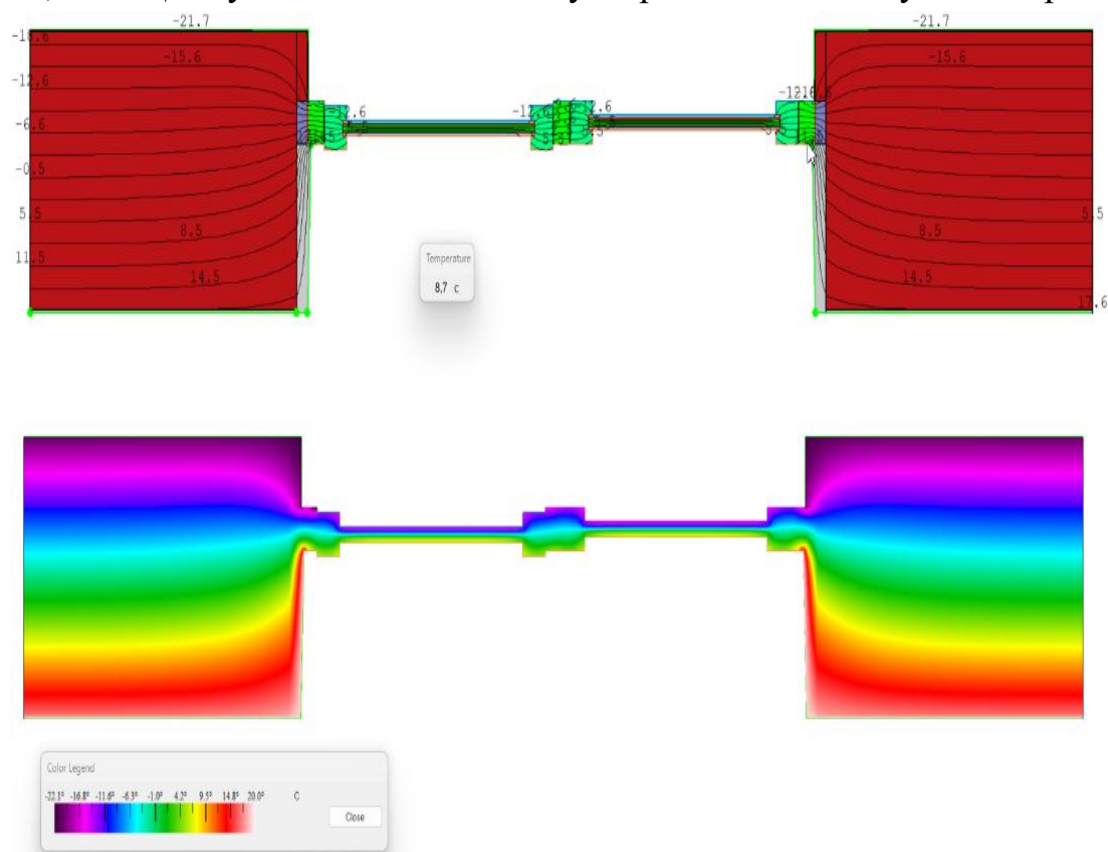


Рисунок 3.11 - Результати розрахунків у формі ізотерм та в інфрачервоному випромінюванні для існуюча цегляної стіни в зоні примикання вікна для температурного режиму зовнішнього повітря -22°C

Також, розраховано термомодернізовану цегляну стіну в різних площинах. Фасадне утеплення виконується з мінераловатних плит із зовнішнім піщано-цементною штукатуркою товщиною 2 мм. Товщина теплоізоляції 150 мм забезпечує мінімально допустиме нормативне значення приведеного опору теплопередачі $3,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ зі зниженням згідно п. 5.2.1 [6]. Дані показуть (рис. 3.12) з що найнижча температура внутрішнього відкосу $t = +14,3^\circ\text{C}$ відповідає вимогам ДБН [2] і -конденсат на поверхні відкосу не утворюється.

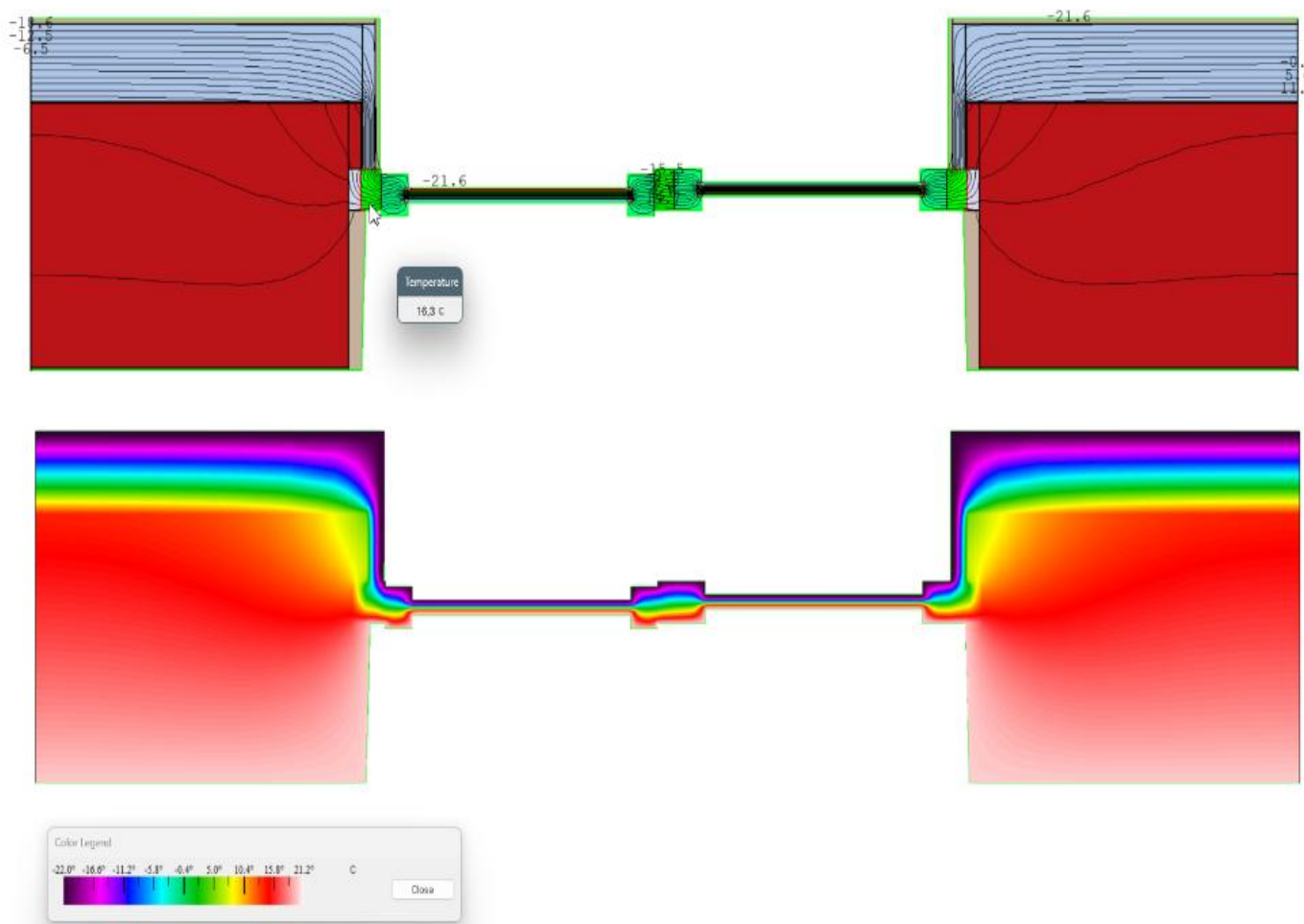


Рисунок 3.12 - Результати розрахунків у формі ізотерм та в інфрачервоному випромінюванні для проєктної термомодернізованої цегляної стіни в зоні примикання вікна для температурного режиму зовнішнього повітря -22°C

На схемах ізотерм (рис.3.13) чітко простежується конфігурація температурного поля в зоні перемички, де спостерігається виражене викривлення ізотерм у напрямку внутрішньої поверхні, що свідчить про наявність інтенсивного

теплопровідного включення.. Зона з мінімальною температурою $10,6^{\circ}\text{C}$ демонструє недостатню термічну однорідність вузла, що потребує додаткових теплоізоляційних заходів у ділянці перемички для забезпечення нормативного рівня теплозахисту.

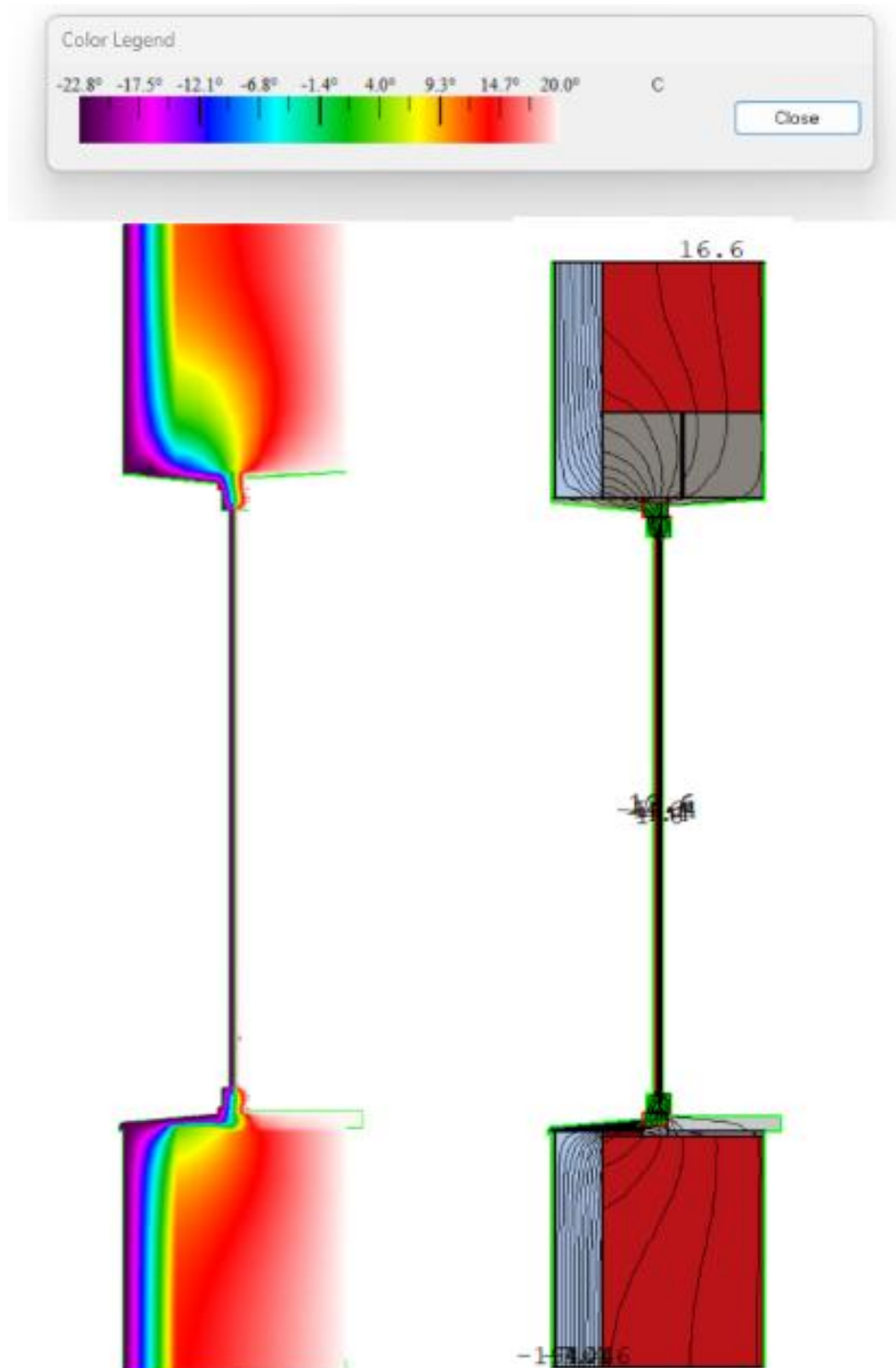


Рисунок 3.13 - Результати розрахунків у формі ізотерм та в інфрачервоному випромінюванні для проєктної термомодернізованої цегляної стіни в зоні перемички для температурного режиму зовнішнього повітря -22°C

У відкосах присутні зони, де температура на поверхні окремих ділянок теплопровідних включень є значно нижчою температури на інших ділянках, що визначені за результатами тепловізійних обстежень. Лінійний коефіцієнт теплопередачі теплопровідного включення розраховується на підставі моделювання двовимірних температурних полів. Довжину теплопровідних включень з низькою температурою на внутрішній поверхні вимірюємо з допомогою лінійки. Температури на поверхнях визначаємо з графіків ізотерм (рис. 3.14). Для розрахунку було створено 5 моделей з різними характеристиками піни.

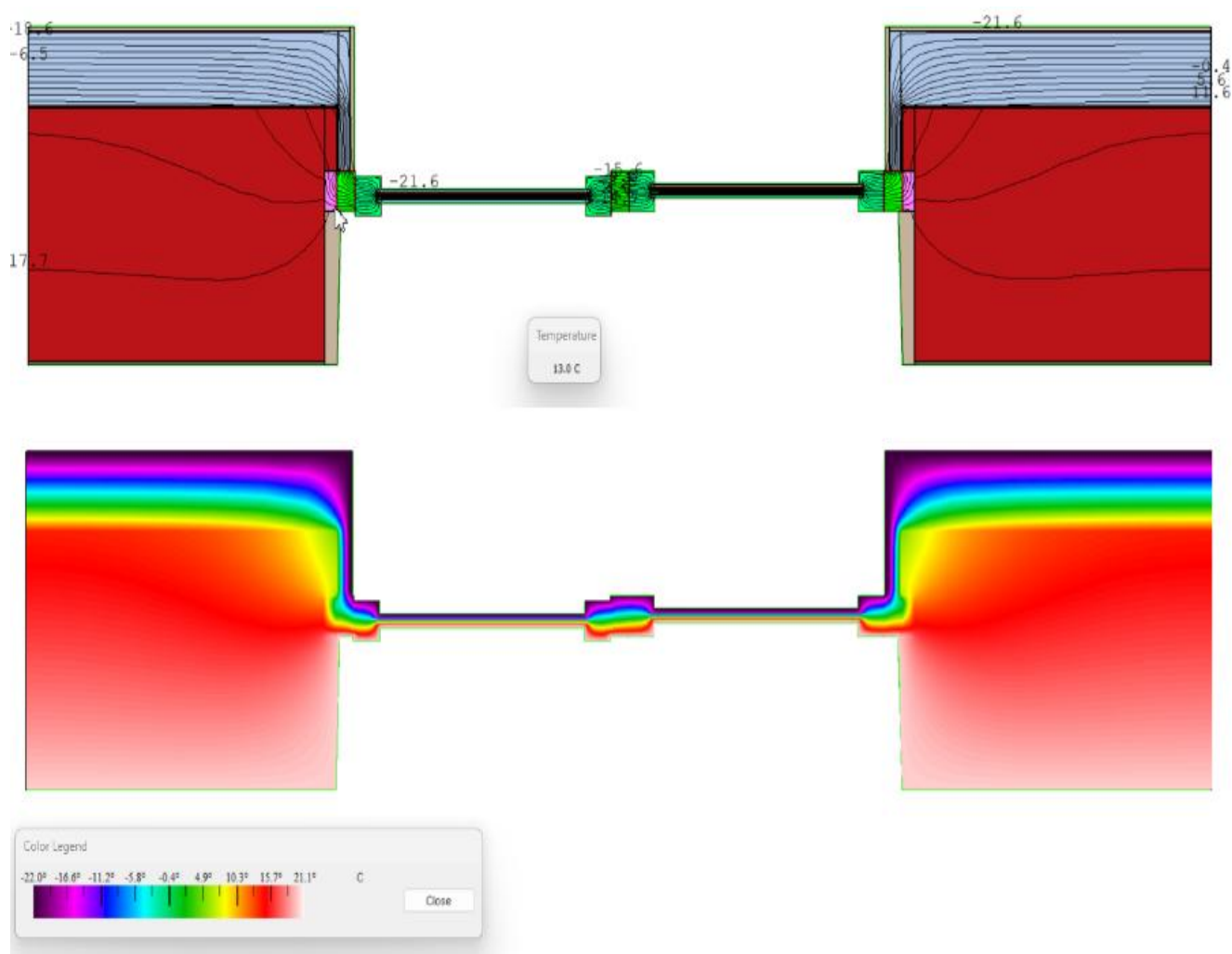


Рисунок 3.14 - Результати розрахунку у формі ізотерм та в інфрачервоному випромінюванні для термомодернізованої цегляної стіни з частково пошкодженими ущільнювачами віконних прорізів для температурного режиму зовнішнього повітря -22 °C

Температура на відкосі значно змінюється в залежності від характеристик монтажної піни. Монтажна піна є недовговічним матеріалом та втрачає характеристики, Дані про характеристики внесено в таблицю 3.12.

Таблиця 3.12 – Залежність температур в зонах теплопровідних включень

Властивості піни	Температура на відкосі, °C
0,029	16,3
0,021	15,8
0,013	15,0
0,005	14,7
Немає утеплювача	13,0

3.2.7. Розрахунки лінійних коефіцієнтів теплопередачі теплопровідного включення

У процесі оцінки теплотехнічної ефективності будівельних конструкцій особливу увагу слід приділяти локальним зонам, де можливі значні тепловтрати через так звані мости холоду. Одним із найважливіших параметрів для кількісного опису таких ділянок є лінійний коефіцієнт теплопередачі теплопровідного включення, який позначається літерою k та визначається за формулою 3.3 [22]:

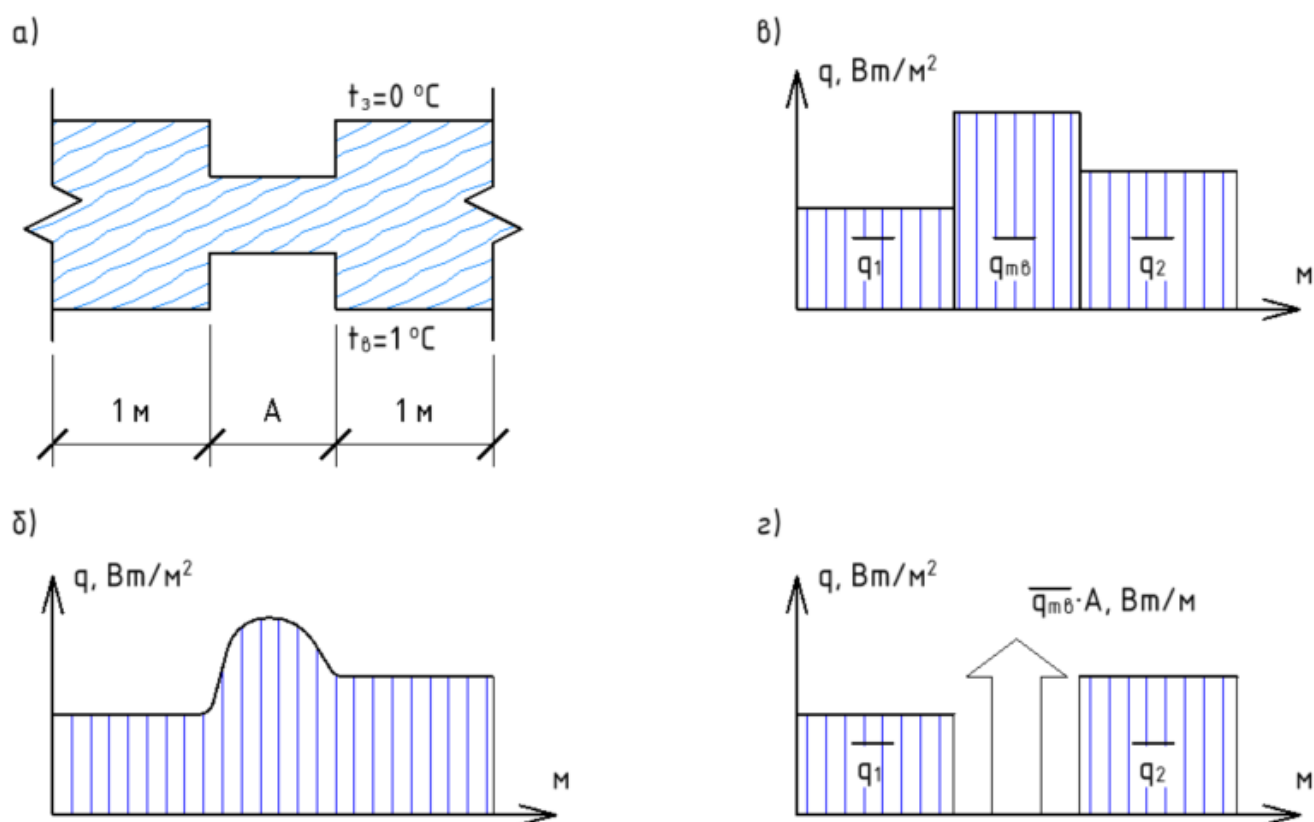
$$k = q_{mb} \cdot L / (t_b - t_3) \quad (3.3)$$

де, q_{mb} – середнє значення густини теплового потоку, що проходить через теплопровідне включення, Вт/м²;

L – довжина теплопровідного включення, м;

t_b, t_3 – відповідно внутрішня та зовнішня температури поверхні, °C.

Лінійний коефіцієнт теплопередачі теплопровідного включення k показує яка густина теплового потоку проходить крізь 1 метр довжини теплопровідного включення за 1 секунду при різниці температури обох поверхонь 1°C (рис. 3.13).



а) температурне поле вузла; б) епюра густини теплового потоку вузла; в) модель визначення густини теплового потоку вузла; г) густина теплового потоку з використанням поняття лінійного коефіцієнта теплопередачі.

Рисунок 3.13 - Принципи моделювання при визначенні лінійного коефіцієнта теплопередачі [18]

Довжину теплопровідних включень з низькою температурою на внутрішній поверхні вимірюємо з допомогою лінійки. Температури на поверхнях визначаємо з графіків ізотерм вузлів 5-7. Проводимо розрахунки лінійного коефіцієнта теплопередачі з застосуванням Excel для кожного критичного вузла і визначаємо його середнє значення в зоні перемички, підвіконня, рядового включення. У таблицях Excel фіксуємо значення температур, визначаємо відповідні теплові втрати, після чого обчислюємо середнє значення k для кожної зони (перемичка, підвіконня, рядове включення).

Результати цих розрахунків зведено в таблицю 3.13, де наведено лінійні коефіцієнти теплопередачі для всіх критичних вузлів із розподілом за типами включень.

Таблиця 3.13 – Розрахункові значення теплопровідних включень

Теплопровідні включення	Зона перемички	Зона рядового включення	Зона підвіконня	Зона примикання міжповерхового перекриття	Точкові елементи (пластиковий дюбель з металевим стрижнем)
Розмір, м	4,92	19	4,92	11,2	483,00
Коефіцієнт теплопередачі, Вт/м·К	0,104	0,098	0,112	0,073	0,005

Наступним етапом є визначення впливу теплопровідних включень на загальні тепловтрати будівлі в опалювальний період. Для цього розраховано сумарну теплопередачу трансмісією з урахуванням локальних тепловтрат через мости холоду. І подано у таблиці 3.14 подано значення теплових втрат у кВт·год без урахування скидного режиму та зі скидним режимом, а також їхню суму. Результати наведені окремо для кожного місяця опалювального періоду, з урахуванням середньої температури зовнішнього повітря, кількості днів, тривалості роботи системи опалення та тривалості скидного режиму.

Таблиця 3.14 – Сумарна теплопередача трансмісією для опалення (розраховані теплопровідні включення)

Місяць року	t, °C	Кількість днів	Тривалість роботи системи опалення, год	Тривалість скидання, год	Q _{tr} без скидання, кВт·год	Q _{tr} зі скиданням, кВт·год	Q _{tr} , кВт·год
1	5,0	31	299,0	445,0	290,81	380,87	671,68

Продовження таблиці 3.14

Місяць року	t, °C	Кількість днів	Тривалість роботи системи опалення, год	Тривалість скидання, год	Q _{tr} без скидання, кВт·год	Q _{tr} зі скиданням, кВт·год	Q _{tr} , кВт·год
2	-3,7	29	292,0	404,0	269,23	325,35	594,58
3	0,4	31	290,0	454,0	221,13	293,2	514,33
4	7,6	15	152,0	208,0	73,33	76,07	149,39
5	-	-	-	-	0	0	0
6	-	-	-	-	0	0	0
7	-	-	-	-	0	0	0
8	-	-	-	-	0	0	0
9	-	-	-	-	0	0	0
10	7,5	18	176,0	256,0	85,59	94,61	180,2
11	1,8	30	297,0	423,0	210,29	250,14	460,43
12	-3,1	31	297,0	447,0	266,91	349,54	616,45
Усього	-	-	-	-	1417,28	1769,77	3187,05

На завершальному етапі виконано розрахунок показників енергоспоживання для опалення з урахуванням теплопровідних включень в таблиці 3.15, це дозволяє оцінити реальний вплив додаткових тепловтрат на енергетичний баланс будівлі.

Таблиця 3.15 – Показники розрахунку енергопотребі для опалення (розраховані теплопровідні включення)

Місяць року	Параметр								
	Q _{H, tr} , кВт·год	Q _{H, ve} , кВт·год	Q _{H, in} , кВт·год	Q _{H, sol} , кВт·год	Q _{H, int} , кВт·год	Q _{H, gn} , кВт·год	γ _H	η _{H, gn}	Q _{H, nd} , кВт·год
Січень	671,68	205,11	876,79	52,18	290,00	342,18	0,39	1,00	534,61
Лютий	594,58	181,56	776,14	94,29	290,00	384,29	0,50	1,00	391,91
Березень	514,33	157,06	671,38	168,86	300,00	468,86	0,70	1,00	204,83
Квітень	149,39	45,62	195,01	215,17	300,00	257,58	1,32	0,75	0
Травень	0	0	0	334,16	280,00	0	0	1,00	0

Продовження таблиці 3.15

Місяць року	Параметр								
	$Q_{H,tr}$, кВт·год	$Q_{H,ve}$, кВт·год	$Q_{H,ht}$, кВт·год	$Q_{H,sol}$, кВт·год	$Q_{H,int}$, кВт·год	$Q_{H,gn}$, кВт·год	γ_H	$\eta_{H,gn}$	$Q_{H,nd}$, кВт·год
Червень	0	0	0	351,61	280,00	0	0	1,00	0
Липень	0	0	0	334,16	310,00	0	0	1,00	0
Серпень	0	0	0	280,68	300,00	0	0	1,00	0
Вересень	0	0	0	168,12	300,00	0	0	1,00	0
Жовтень	180,20	55,03	235,23	86,21	300,00	224,25	0,95	0,94	24,41
Листопад	460,43	140,60	601,03	41,09	300,00	341,09	0,57	1,00	260,16
Грудень	616,45	188,24	804,69	27,87	300,00	327,87	0,41	1,00	476,83
Всього за рік	3187,05	973,22	4160,27	2154,39	3550,00	2346,12	4,83	11,68	1892,74

Сумарна теплопередача трансмісією (для опалення) через досліджуваний фрагмент зовнішньої огорожувальної конструкції з існуючими віконними блоками та розрахованими (фактичними) теплопровідними включеннями шляхом моделювання двовимірних температурних полів становить 3187,05 кВт·год на рік.

3.3. Висновки за розділом 3

За результатами проведених розрахунків теплопередачі трансмісією та втрат теплової енергії через вибраний фрагмент зовнішньої огорожувальної конструкції з урахуванням надходжень сонячної радіації, теплових надходжень від обладнання, людей та системи освітлення, інфільтрації можна зробити висновок:

- результати розрахунків у відповідності до нормативної методики [6] і результати розрахунків методом математичного моделювання теплових процесів з застосуванням тепловізійного обстеження відрізняються одні від одних.

- метод математичного моделювання теплових процесів з застосуванням тепловізійного обстеження дозволяє визначити втрати теплової енергії в невидимих (захованих) місцях зовнішніх огорожувальних конструкцій, викликаних

дефектами при монтажі чи частковою руйнацією внаслідок зовнішніх факторів (кліматичних, механічних, інше).

У розрахунках теплопередачі трансмісією та енергопотребі для існуючої стіни згідно нормативної методики [6] коефіцієнти теплопровідних включень (в зонах підвіконня, перемички, рядового примикання, міжповерхового перекриття) не враховуються, якщо середнє значення коефіцієнта теплопередачі непрозорої огорожувальної конструкції $U_{op} > 0,8 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, а тому визначити їх можна методом математичного моделювання теплових процесів.

Застосування методу моделювання двовимірних температурних полів із визначення фактичних значень коефіцієнта теплопередачі у критичних зонах (перемички, підвіконня, міжповерхове перекриття, вузли примикання віконних блоків) показало його збільшення у порівнянні з табличними даними згідно діючих нормативних методик, а відповідно і збільшення теплової передачі крізь аналізований фрагмент зовнішньої стіни.

Моделювання двовимірних температурних полів із врахуванням теплопровідних включень у критичних зонах (перемички, підвіконня, міжповерхове перекриття, вузли примикання віконних блоків) показало суттєве зниження трансмісійної теплопередачі у проектному рішенні: Втрати тепла через утеплену конструкцію виявилися у 2,5 раза меншими, ніж у існуючій. Це забезпечує прогнозовану річну економію теплової енергії на рівні 4681 кВт·год, із яких 434 кВт·год припадає саме на зони теплопровідних включень.

Сумарна тепла передача крізь аналізований фрагмент зовнішньої стіни з урахуванням фактичних значень теплопровідних включень, визначених моделюванням двовимірних температурних полів, склала 3187,05 кВт·год/рік, що на 70,65 кВт·год менше більше у порівнянні з розрахунками за табличними значеннями, тобто на 2,2%. Таке відхилення підтверджує доцільність застосування методів числового моделювання для підвищення точності оцінювання тепловтрат.

РОЗДІЛ 4

ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

4.1. Структура інвестицій

Проекти з термомодернізації зазвичай потребують значного залучення інвестицій. В умовах обмежених фінансових можливостей населення та підприємств в Україні, зростає популярність економічні механізми системного залучення інвестицій в енергоефективність та енергозбереження, які в рамках міжнародної технічної допомоги частково вже використовуються в Україні [22]. Тому важливо мати повне розуміння про інвестиційну привабливість проекту.

Першим етапом оцінки економічної ефективності проекту є визначення повного обсягу початкових витрат, необхідних для реалізації пропонованих заходів. Комплекс робіт з термомодернізації фрагмента будівлі, включає: обстеження стану огорожувальних конструкцій та усунення дефектів (запінення місць примикання віконних блоків). В таблиці 4.1 наведена оцінка заходу базується на співвідношенні витрат на впровадження до майбутньої економії, яку отримуватиме університет за рахунок скорочення витрат на опаленні.

Таблиця 4.1 – Структура інвестиційних витрат та зведені результати розрахунків

№	Показники	Одиниця виміру	Значення
1	Інвестиції (без ПДВ)	грн	2733,60
2	ПДВ 20%	грн	546,72
3	Загальні інвестиції (енергоефективні заходи) з ПДВ	грн	3280,32
4	Споживання енергії до впровадження заходів	кВт·год	3187
5	Споживання енергії після впровадження заходів	кВт·год	3116,4
6	Заощадження	кВт·год	70,65
7	Тариф	грн/кВт·год	2,18

Продовження таблиці 4.1

№	Показники	Одиниця виміру	Значення
8	Розрахункова економія	грн/рік	154,02
9	Строк кредиту	рік	20
10	Пільговий період	рік	5
11	Відсоткова ставка	%	5
12	Інфляція	%	10
13	Чиста поточна/приведена вартість, NPV	грн	3436
14	Внутрішня норма доходності, IRR	%	12,04
15	Коефіцієнт чистої приведеної вартості, NPVQ	-	1,047
16	Простий термін окупності, PP	років	15
17	Дисконтований термін окупності, PO	років	18

Така оцінка включає розрахунок основних фінансових індикаторів ефективності — зокрема чистої приведеної вартості NPV, внутрішньої норми доходності IRR, коефіцієнта ефективності інвестицій NPVQ.

Згідно з кошторисом, вартість будівельно-монтажних робіт становить 2733,60 гривень. Це включає всі технологічні процеси з модернізації швів та супутніми будівельними роботами. З урахуванням податку на додану вартість (ПДВ 20%) у розмірі 546,72 гривень, загальна вартість заходу складає 3280,32 гривень.

Розрахована чиста приведена вартість (NPV) свідчить про те, що навіть із урахуванням дисконтування, очікувані грошові надходження перевищують початкові інвестиційні витрати на понад 3,4 тисячі гривень, що є позитивною оцінкою прибутковості проєкту. Внутрішня норма доходності IRR становить 12,04% і суттєво перевищує вартість залученого кредитного ресурсу (5%), що вказує на достатній запас фінансової рентабельності навіть за умови коливань ринкових параметрів

4.2. Розрахунок терміну окупності

Оскільки проєкти з термомодернізації потребують значних інвестицій, потрібно прораховувати їх термін окупності. Складають графіки росту цих двох параметрів для аналізу (рис. 4.1). Ці два параметри дають розуміння про фактичну грошова динаміку та економічну цінність проєкту у теперішній вартості.

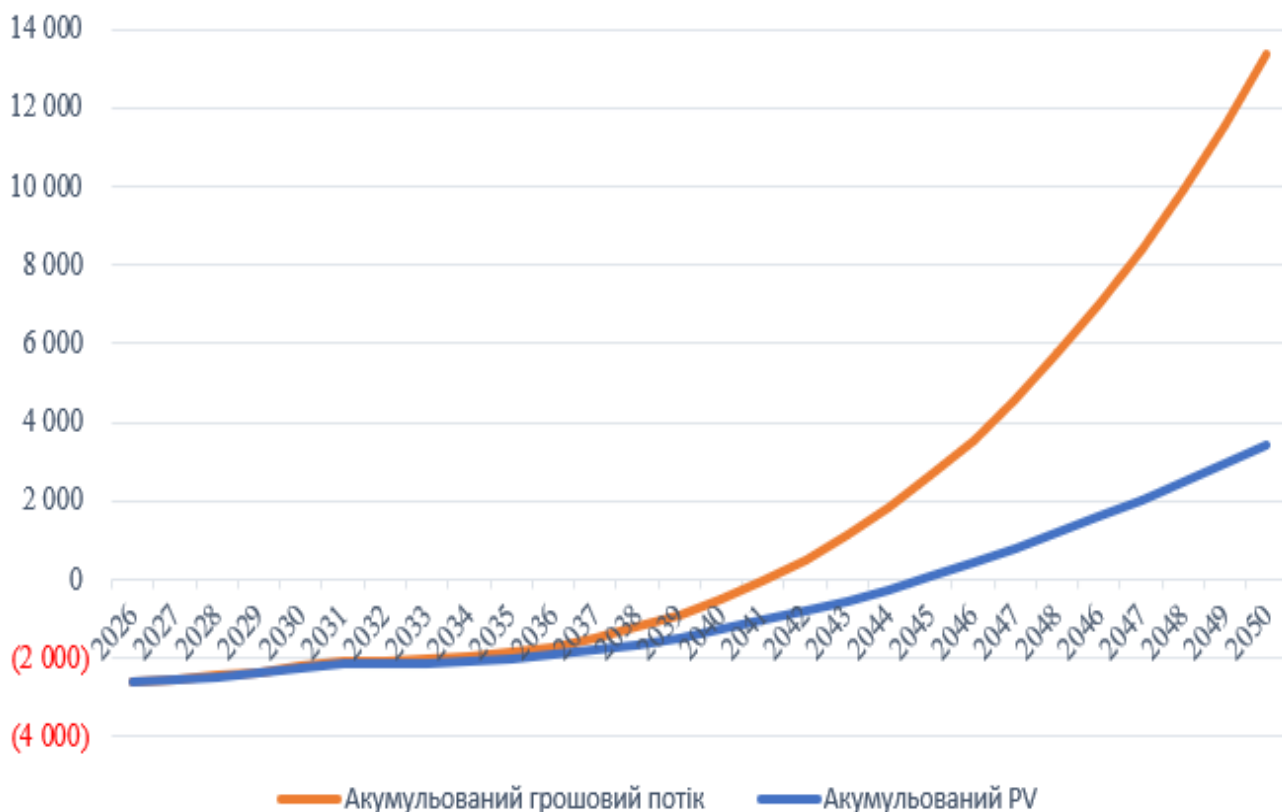


Рисунок 4.1 – Графік динаміки акумульованого грошового потоку та приведеної вартості (PV) проєкту

У районі 2042-2045 років обидві криві відповідно перетинають нуль — це означає, що проєкт виходить на окупність. Опісля обидві лінії йдуть вгору, що свідчить про генерацію прибутку. Важливо мати систематизовані дані щодо витрат на реалізацію проєкту, обсягів очікуваної щорічної економії та динаміки тарифів. Такий підхід дозволяє комплексно оцінити економічну доцільність та сформулювати основу для прийняття. Повні результати розрахунку цих параметрів наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Аналіз акумульованого грошового потоку та PV проекту

№	Параметр	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
1	Грошовий потік проекту	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	Інвестиції	-3280	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	Фінансування		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Позика ЄІБ	2 624	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	Власні кошти	656	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	Фонд ЕЕ грант	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	Вартість обслуговування боргу	-	-78	-78	-78	-78	-78	-253	-241	-229	-216	-202
8	Чисті щорічні заощадження	-	154	169	186	205	225	248	273	300	330	363
9	Чистий грошовий потік	-2624	76	92	108	127	148	-5	32	71	114	161
10	Акумульований грошовий потік	-2624	-2548	-2457	-2348	-2221	-2073	-2078	-2046	-1975	-1861	-1700
11	Коефіцієнт дисконтування	1	0,95	0,91	0,86	0,82	0,78	0,75	0,71	0,68	0,64	0,61
12	Поточна вартість (PV)	-2624	73	83	94	105	116	-4	23	48	74	99
13	Акумульований PV	-2624	-2552	-2469	-2375	-2270	-2155	-2158	-2136	-2087	-2014	-915

Продовження таблиці 4.2

№	Параметр	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047
1	Грошовий потік проєкту	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
2	Інвестиції	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	Фінансування		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Позика ЄІБ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	Власні кошти	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	Фонд ЕЕ грант	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	Вартість обслуговування боргу	-188	-173	-157	-141	-124	-105	-86	-66	-45	-23	0
8	Чисті щорічні заощадження	399	439	483	532	585	643	708	778	856	942	1 036
9	Чистий грошовий потік	211	266	326	391	461	538	621	712	811	919	1 036
10	Акумуляований грошовий потік	-1489	-1222	-896	-506	-44	494	1 115	1 827	2 638	3 557	4 593
11	Коефіцієнт дисконтування	0,58	0,56	0,53	0,51	0,48	0,46	0,44	0,42	0,40	0,38	0,36
12	Поточна вартість (PV)	124	148	173	197	222	246	271	296	321	346	372
13	Акумуляований PV	-1791	-1643	-1470	-1273	-1051	-805	-534	-238	83	430	801

4.3. Погашення позики

Оскільки в розрахунках терміну окупності було зазначено, що на реалізацію проєкту потрібна позика, тому потрібно мати розуміння про орієнтовний термін її погашення. Він формується для забезпечення прозорості фінансових розрахунків і належного планування грошових потоків проєкту. У таблиці 4.3 розраховано прогностні значення співвідношення виплат позики до суми щорічних заощаджень по проєкту. План сприяє обґрунтованій оцінці його інвестиційної привабливості.

Таблиця 4.3 – Орієнтовний план погашення позики

№ виплати	Рік	Позика	Залишок позики	Виплата тіла позики	Виплата відсотків	Обслуговування позики, всього	Щорічні заощадження	% сплати позики до суми заощаджень
0	2026	2624	-	-	-	-	-	-
1	2027	-	2 624	0	131	131	154,017	85,19%
2	2028	-	2 624	0	131	131	154	85,19%
3	2029	-	2 624	0	131	131	154	85,19%
4	2030	-	2 624	0	131	131	154	85,19%
5	2031	-	2 624	0	131	131	154	85,19%
6	2032	-	2 503	122	127	251	154	162,82%
7	2033	-	2 375	128	123	253	154	164,13%
8	2034	-	2 241	134	119	255	154	165,50%
9	2035	-	2 100	141	114	257	154	166,94%
10	2036	-	1 952	148	109	259	154	168,45%
11	2037	-	1 797	155	104	262	154	170,03%
12	2038	-	1 634	163	99	264	154	171,70%
13	2039	-	1 463	171	93	267	154	173,45%
14	2040	-	1 283	180	87	270	154	175,28%
15	2041	-	1 095	189	81	273	154	177,21%
16	2042	-	897	198	75	276	154	179,23%
17	2043	-	689	208	68	293	154	190,39%

Продовження таблиці 4.3

№ виплати	Рік	Позика	Залишок позики	Виплата тіла позики	Виплата відсотків	Обслуговува ння позики, всього	Щорічні заощадже ння	% сплати позики до суми заощаджень
18	2044	-	470	218	75	283	154	183,59%
19	2045	-	241	229	53	286	154	185,94%
20	2046	-	0	241	46	286	154	185,94%
Всього				2624	2 030			

4.4. Висновки за розділом 4

У даному розділі було проведено аналіз економічних параметрів проєкту та здійснено аналіз грошових потоків, оцінку їх акумуляції та дисконтованої вартості. Відповідно до розрахунків, починаючи з 2045 року досягається точка беззбитковості проєкту та переходом проєкту в прибутковість. Аналіз свідчить про повільні темпи накопичення поточної вартості грошових потоків. Внутрішня норма рентабельності (IRR) перевищує прийнятну дисконтну ставку, що додатково підтверджує інвестиційну привабливість проєкту. Терміни погашення позики показують про нормальне боргове навантаження відносно обсягів щорічних заощаджень, що не впливає на економічну стабільність проєкту. Отже, проведене економічне обґрунтування підтверджує, що реалізація проєкту є фінансово доцільною, потенційно інвестиційно привабливою та здатною забезпечити стійке зростання економічних показників у довгостроковій перспективі.

РОЗДІЛ 5

ЗАХОДИ ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1. Законодавча та нормативна база України про охорону праці

Охорона праці є важливим розділом в законодавчій базі України. Вона забезпечує безпечні та чесні умови праці для громадян і реалізується на підставі національного законодавства у міжнародних зобов'язань.

Основні законодавчі акти загального характеру:

- Закон України «Про охорону праці» № 2694-ХІІ від 14.10.1992 рік;
- Кодекс законів про працю України (КЗпП);
- Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування».

У цих документах визначено загальні правові основи забезпечення безпечних умов праці, гарантії прав працівників, обов'язки роботодавців, зокрема умови для жінок, неповнолітніх, людей з інвалідністю, а останній регламентує порядок надання страхових виплат у разі нещасного випадку на виробництві або професійного захворювання [23].

Також у цій сфері діють галузеві стандарти, що деталізують вимоги охорони праці в межах конкретної галузі. В контексті будівництва основний галузевий стандарт це ДБН А.3.2-2-2009 [24], він регламентує комплексні вимоги до охорони праці під час виконання робіт на буд майданчику. У документі детально розглянуто правила розміщення техніки, обладнання, організацію евакуаційних шляхів, вентиляцію приміщень, інструктажі, сертифікацію обладнання, безпечну експлуатацію будівельної техніки та обладнання.

Закон України «Про будівельні норми» [25] унормовує принципи створення та оновлення будівельних регламентів, які регулюють процеси на всіх етапах: від проектування до експлуатації. Особлива увага приділяється інтеграції вимог безпеки у всі нормативи. ДСТУ EN 12811-1:2014 [26] застосовується до тимчасових

конструкцій - риштувань, які є невід'ємною частиною фасадних робіт. Він визначає геометричні, механічні характеристики, стабільність, вимоги до огорожі. Водночас ДСТУ EN 365:2014 [27] стосується спорядження для захисту від падіння з висоти: системи утримання, запобігання зриву, кріплення. А стандарт ДСТУ EN 60204-1:2015 [28] встановлює правила безпеки для електрообладнання машин: електроізоляція, захист від ураження струмом, аварійні вимикачі тощо.

5.2. Вимоги з техніки безпеки та охорони праці на об'єкті будівництва при утепленні будівель

Процес утеплення огорожувальних конструкцій супроводжується ризиками, пов'язаними з роботою на висоті, застосуванням різних інструментів, використанням токсичних будівельних матеріалів. Порухення технологічних вимог проведення процесу або ігнорування вимог техніки безпеки може призвести до виробничих травм або погіршення здоров'я працівників. За даними Державної служби статистики України, у 2023 році в Україні було зареєстровано 4 877 потерпілих від нещасних випадків та гострих професійних захворювань, з яких 437 випадків мали летальні наслідки [27].

Важливою вимогою є проведення інструктажів з техніки безпеки. Всі робітники мають проходити: первинний, повторний, позаплановий та цільовий інструктажі [24]. Базований на типовому положенні про порядок проведення інструктажів з питань охорони праці, що регламентує Наказ Держгірпромнагляду № 15 від 26.01.2005 із змінами.

Згідно з ДСТУ EN 12811-1:2014 [30], риштування мають бути стійкими, обладнаними захисними поручнями, не ковзкими настилами, мати маркування допустимого навантаження. Кожне риштування перед стартом використання повинні бути ретельно оглянуті відповідальним інженером з техніки безпеки та закріплене згідно з технічними інструкціями.

Працівники на об'єкті повинні використовувати засоби індивідуального захисту згідно з ДСТУ EN 365:2014 [26], а саме каски з амортизаційним

поглинанням удару, системи страховки, пояси та карабіни із запобіжним замком. Також усе спорядження, як основне так і додаткове, повинне відповідати погоднім умовами та температурному режиму.

Небезпечним також є використання будівельних матеріалів, таких як мінеральна вата, пінополістирол та клейових і штукатурних сумішей. Вони можуть спричинити подразнення шкіри та слизових, алергічні реакції. Тому варто дотримуватися правил гігієни, використовувати респіратори та рукавиці, особливо при монтажі мінераловатних плит.

5.3. Вимоги з техніки безпеки та охорони праці при обстеженні об'єктів будівництва

Під час обстеження об'єктів будівництва може виникати багато загроз оскільки обстеження проводяться для наступної модернізації реставрації чи ремонтних робіт об'єкт може мати багато пошкоджень. основні ризики з якими може стикнутися особа яка обстежує будівлі це обвалення конструкції падіння з висоти та дією шкідливих речовин. Тому обстеження має проводитися за суворим дотриманням правил техніки безпеки.

Перед початком робіт треба виконати оцінку небезпек і відповідно до чинного законодавства розробити план безпечного обстеження. До обстеження, аналогічно з процесом будівництва допускаються лише працівники, які пройшли інструктаж з охорони праці відповідно до порядку проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці [30]. Відповідальність за організацію безпечного обстеження об'єкта несе керівник робіт, який складає акт-допуск і забезпечує постійний контроль за дотриманням заходів безпеки [31].

Далі слід діяти за планом обстеження, залежно від стану будівлі та ситуації на об'єкті. При обстеженні висотних ділянок має бути використано спеціальне обладнання: драбини, підйомники, риштування згідно нормам ДСТУ EN 12811-1:2014 [29]. Персонал обов'язково повинен бути забезпечений засобами

індивідуального захисту: касками, рукавичками та відповідним спецодягом та страхувальники системами ДСТУ EN 365:2014 [32].

Відповідно до ДСТУ IS [32], якщо об'єкт має підвищений рівень запиленості, хімічного забруднення або біологічної небезпеки (цвіль, грибок), повинні використовуватись респіратори та засоби захисту органів дихання. Якщо є загроза обвалення конструкцій чи їх частин, зсуву ґрунту, необхідно обмежити доступ до небезпечних зон, встановити огороження та попереджувальні знаки відповідно до вимог ДБН А.3.2-2-2009 [25]. У разі виявлення аварійних станів (тріщини, деформації, провали) обстеження має бути негайно припинено.

5.4. Забезпечення надійного функціонування комунально-енергетичних мереж будівлі під час надзвичайних ситуацій

В умовах військового стану та постійно можливих надзвичайних ситуацій, функціонування критичної інфраструктури є важливим завданням. Доступ до електрики, води та тепла є пріоритетом виживання та нормального функціонування. Згідно зі статтею 32 Кодексу цивільного захисту України [33], об'єкти критичної інфраструктури, мають бути захищеними і здатними функціонувати в умовах надзвичайних ситуацій. А Закон України «Про житлово-комунальні послуги» зобов'язує власників та управителів житлового фонду вживати організаційно-технічних заходів для забезпечення безперервного надання послуг у разі виникнення кризових обставин [34]. Забезпечення стійкого постачання досягається проведенням заходів щодо захисту комунально-енергетичних мереж [35].

Управлінські заходи передбачають розробку плану дій у разі настання надзвичайної ситуації, узгодженого з підрозділами ДСНС. З метою забезпечення стійкості роботи мереж в надзвичайних ситуаціях завчасно проводиться комплекс організаційних та інженерно-технічних заходів, спрямованих на забезпечення захисту населення і зменшення руйнувань, підвищення стійкості їх роботи [36].

Сучасна практика передбачає реалізацію багаторівневої системи забезпечення надійності інженерних мереж, яка включає в себе:

- проектування з урахуванням принципів резервування, автономності та живучості систем, відповідно до рекомендацій [37];
- використання автоматизованих систем диспетчерського управління, що забезпечують оперативну реакцію на зміни параметрів систем у реальному часі;
- інтеграцію резервних джерел живлення (дизель-генераторів, інверторних систем з акумуляторами, гібридних сонячних установок), які здатні підтримувати енергоживлення під час відключення основних ліній [38].

Важливим етапом є періодичні інспекції функціонування комунально-енергетичних мереж. Потрібно перевіряти герметичності мереж, працездатність запірної арматури, стан електрощитового обладнання, насосів і систем автоматичного регулювання. Це дозволить своєчасно виявити технічні поломки знижуючи ризик аварійних збоїв. Крім того, відповідно до норм пожежної безпеки [39], системи опалення та електропостачання повинні бути безпечними з точки зору пожежної безпеки в умовах аварійних ситуацій. Наприклад, системи електропостачання мають бути захищені від коротких замикань, перевантаження, іскріння та повинні передбачати автоматичне відключення аварійних ділянок. А в умовах настання надзвичайних ситуацій мережі не повинні провокувати чи поширювати загоряння.

5.5. Висновки за розділом 5

Охорона праці в будівництві, є дуже важливим етапом, оскільки рівень травматизму є надвисоким. Головними причинами виробничого травматизму є нехтування правилами безпеки, неякісні заходи інструктажу та використання несертифікованих засобами захисту. Тому одним з ключових завдань управління на будівельному майданчику є систематичне навчання персоналу, контроль технічного стану обладнання, а також моніторинг ризиків на всіх етапах виконання робіт.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Впродовж виконання магістерської роботи фокус був на вивченні ефективності теплового захисту огорожувальних конструкцій будівель та оцінці результатів термомодернізації. Метою дослідження стало виявлення змін у теплотехнічному стані огорожувальних елементів будівлі до та після проведення енергозберігаючих заходів.

У даній магістерській роботі:

- проведено помісячні розрахунки теплопередачі трансмісією та енергопотреби з урахуванням тепловтрат за рахунок інфільтрації та внутрішніх і зовнішніх теплових надходжень, зокрема сонячних для існуючого фрагмента зовнішнього огороження і після термомодернізації;

- проведено порівняльний аналіз результатів розрахунків тепловтрат та проведено оцінку тепловологісного стану досліджуваного фрагмента зовнішньої огорожувальної конструкції будівлі навчального закладу після термомодернізації згідно нормативної методики та з застосуванням методу моделювання теплових полів з поєднанням тепловізійного обстеження;

- визначено зони максимального зволоження, періоди накопичення та видалення вологи в реальних умовах експлуатації.

За результатами даної роботи можна зробити наступні висновки:

- 1) для більш точних розрахунків тепловтрат через зовнішні огорожувальні конструкції будівлі рекомендується застосовувати метод моделювання теплових полів з поєднанням тепловізійного обстеження, так як цей метод дозволяє виявити реальні тепловтрати із-за існуючих конструктивних та технологічних дефектів, зокрема в зонах теплопровідних включень;

- 2) метод розрахунку тепловтрат у відповідності до чинної нормативної методики рекомендується використовувати у випадку, якщо теплопровідні включення відомі і зазначені у проєктній документації будівлі;

3) оцінку тепловологісного стану зовнішньої стіни з метою визначення зони конденсації вологи, а також кількості її накопичення рекомендується проводити з застосуванням методу математичного моделювання процесів;

4) при перевірці допустимої різниці між температурою внутрішнього повітря і приведеною температурою внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції рекомендується застосовувати виключно метод моделювання теплових полів, так як він дозволяє визначити фактичну температуру в критичних місцях теплопровідних включень і забезпечує більш точні результати у порівнянні з розрахунками згідно чинної методики;

5) запропонований метод розрахунку шляхом моделювання теплових полів з поєднанням тепловізійного обстеження потребує подальшого наукового дослідження з метою удосконалення автоматизації процесів та застосування для інших видів теплопровідних включень (наприклад, - точкових);

6) зазначений метод рекомендувати для розрахунків коефіцієнтів теплопередачі в критичних зонах зовнішніх огорожень будівель при виготовленні проектно-кошторисної документації з термомодернізації будівель навчальних закладів.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Енергетична стратегія України на період до 2030 року : схвалена Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15 березня 2006 р. № 145-р [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/145-2006-p>
2. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція будівель. – Київ : Мінрегіон України, 2016. – 58 с.
3. Кусень С Дослідження ізотерм вузлів примикання віконних блоків з пвх в цегляних стінах / Кусень Софія // Матеріали VII Міжнародної студентської науково - технічної конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання, 24-25 квітня 2025. — Т. : ТНТУ, 2025. — С. 319.
4. ДСТУ 9191:2022. Енергоефективність будівель. Визначення основних характеристик теплового захисту будівель : [чинний від 01.09.2022] / Мінекономіки України ; Нацстандарт України. – Вид. офіц. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. – 64 с.
5. Дзядичевич Ю. В. та ін. // Економіка довкілля і природних ресурсів : монографія. – Тернопіль, 2016. – 392 с.
6. ДСТУ 9190:2022. Енергоефективність будівель. Метод розрахунку енергії для опалення, охолодження, вентиляції, гарячого водопостачання та освітлення : [чинний від 01.09.2022] / Мінекономіки України ; Нацстандарт України. – Вид. офіц. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. – 76 с.
7. Stolarska A., Strzałkowski J., Garbalińska H. // Using CFD software for the evaluation of hygrothermal conditions at wall-window perimeters. – IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Т. 415. – DOI:10.1088/1757-899X/415/1/012046.
8. Пашинський В. А. та ін. // Вплив положення віконних блоків по товщині стіни на теплотехнічні характеристики вузла їх примикання. – Sciences of Europe. – 2017. – № 21, Т. 3. – С. 8–13.

9. ISO 10456:2023. Building materials and products – Hygrothermal properties – Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values. – ISO, 2023.

10, EN 16798-1:2021. Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings. – CEN, 2021.

11. УДК 536.24:536.33:697.133. Гомелюк М. І., Каспрук В. Б. // Визначення теплоізолюючих властивостей будівлі : матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 6–7 грудня 2023 р. – Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2023. – С. 109–110.

12. Байрактар Я. І., Грицай О. В. // Термомодернізація будівель : технічний і економічний аспект : дипломна робота / наук. кер. І. П. ; Запорізький національний університет. – Запоріжжя, 2020. – 75 с.

13. УДК 628.8:624.04:644.1 Піняк О. М., Мацьків О. Г., Коваль І. В. // Енергоефективність будівель : матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 24–25 листопада 2021 р. – Тернопіль : ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2021. – С.

14. ДСТУ-Н Б.1.1-27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія.

15. Термомодернізація житлових будівель в Україні [Електронний ресурс] // НДЦ Інтелектуальної власності та реформ. – 2023. – Аналітична довідка.

16. Solomenko O. V., Korol I. I., Voloshin V. S. // Organizational and Technological Measures of Thermomodernization of Obsolete Housing Fund [Електронний ресурс] / O. V. Solomenko, I. I. Korol, V. S. Voloshin. – ResearchGate, 2022.

17. Сівак Р. В. // Використання аерогелю в будівництві [Електронний ресурс] / Р. В. Сівак. – Вінниця : Вінницький національний технічний університет, 2020. URL:<https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/28868/9119.pdf?sequence=3>

18. УДК 64.011. Сінкевич Ю. І., Каспрук В. Б. // Підбір теплоізоляційного матеріалу : матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції молодих

учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 25–26 листопада 2020 р. – Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2020. – С. 127.

19. ДСТУ Б В.2.6-189:2013. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2013.

20. ДСТУ-Н Б В.2.6-192:2013. Настанова з проектування теплової ізоляції будівель. – Київ : Мінрегіон України, 2013. – 58 с.

21. УДК 624.014. Данильченко С. М., Чорномаз Н. У. // Загальні принципи діагностування пошкоджуваності будівельних конструкцій : матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 7–8 грудня 2022 р. – Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 246–247.

22. УДК 369.013. Лещенко М. В., к.т.н., Крутибіч О. В. (студент гр. 401-БП) // Лінійні коефіцієнти теплопровідності вузлів стін легких сталевих тонкошінних : Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка.

23. Закон України «Про охорону праці» : із змінами і доповненнями / Відомості Верховної Ради України. – 1992. – № 49.

24. ДБН В.2.6-33:2018. Будівельна теплотехніка. Теплова ізоляція будівель і споруд. – Київ : Мінрегіон України, 2018.

25. ДБН А.3.2-2-2009. Охорона праці і промислова безпека в будівництві. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009.

26. ДСТУ EN 365:2014. Індивідуальне спорядження для захисту від падіння з висоти. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2014.

27. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпека машин. Електрообладнання машин. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015.

28. Державна служба статистики України. Травматизм на виробництві: статистичні дані за 2023 рік [Електронний ресурс] / Держстат України. – Київ, 2024.

29. ДСТУ EN 12811-1:2022. Тимчасове робоче обладнання. Частина 1. Риштування. Вимоги до продуктивності та загальна конструкція (IDT EN 12811-1:2003) / затв. наказом Мінекономіки України від 28.12.2022 № 285. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.

30. Наказ Держгірпромнагляду України № 15 від 26.01.2005 «Порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці». – Київ, 2005.

31. УДК 69.058. Конспект лекцій з дисципліни «Обстеження і випробування будівель і споруд» : навч.-метод. посіб. / О. П. Конончук ; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – Тернопіль : Вид-во ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2018. – 95 с.

32. Держгірпромнагляд України. Наказ № 15 від 26 січня 2005 р. «Порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці». – Київ : Держгірпромнагляд України, 2005.

33. Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02 жовт. 2012 р. № 5403-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17>

34. Про житлово-комунальні послуги : Закон України від 09 листоп. 2017 р. № 2189-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2189-19>

35. Стручок В. С. // Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека» : навч. посіб. – Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2022. – 150 с. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39424>

36. Стручок В. С. // Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання [Електронний ресурс] / В. С. Стручок. — Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с. — ISBN 978-617-7875-53-5. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39196>

37. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Настанова з проектування будівель і споруд на випадок надзвичайних ситуацій. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. – 33 с. – URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=38906

38. ДБН В.2.5-77:2014. Інженерне обладнання будівель і споруд. Енергозбереження. – Київ : Мінрегіон України, 2014. – 74 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=51139

39. Про затвердження Правил пожежної безпеки в Україні: Наказ МВС України № 658 від 05 листоп. 2018 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1412-18>

40. Методичний посібник для виконання кваліфікаційної роботи магістра за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» / Ковальчук Я.О., Крамар Г.М., Мещерякова О.М. – Тернопіль : ТНТУ, 2020. – 56 с.