

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

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

Магістра

(назва освітнього ступеня)

на тему: Моделювання впливу теплоізоляційних характеристик
огороджувальних конструкцій на енергоефективність будівлі

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МБнм
спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Харлампієв Т.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Коваль І.В.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мещерякова О.М.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Ясній В.П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Качка О.І.

(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)
« » 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія
(шифр і назва спеціальності)

студенту Харлампієву Тимофію Валерійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання впливу теплоізоляційних характеристик огорожувальних конструкцій на енергоефективність будівлі

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

Затверджені наказом ректора від «09» 04 2026 року № 4/9-178

2. Термін подання студентом завершеної роботи 24.05.26

3. Вихідні дані до роботи Огороджувальні конструкції житлового будинку

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
Впровадження енергоефективних заходів. Енергоефективність в Україні та закордоном.
Аналіз основних джерел тепловтрат. Методика проведення дослідження.
Дослідження характеристик конструкцій. Дослідження характеристик конструкцій з утеплювачем. Аналіз результатів досліджень. Заходи охорони праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Актуальність теми. Методика проведення дослідження. Об'єкт дослідження. Основні характеристики. Коефіцієнти теплопередачі. Загальні висновки.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 Огляд літературних джерел	7
1.1 Еволюція підходів до теплоізоляції та енергоефективності будівель.....	7
1.2 Стратегії та нормативне регулювання енергоефективності.....	9
1.3 Теоретичні аспекти теплопередачі та енергетичного балансу.....	11
1.4 Висновки за розділом 1.....	14
РОЗДІЛ 2 Методики дослідження	16
2.1 Аналіз стану та рекомендовані енергоефективні заходи для житлового будинку	16
2.2 Вибір матеріалів для досліджень.....	18
2.3 Загальна методика проведення досліджень.....	22
2.3.1 Розрахунок опору теплопередачі стінових конструкцій.....	24
2.3.2 Розрахунок містків холоду.....	25
2.3.3 Розрахунок горизонтальних бар'єрів.....	26
2.4 Висновки за розділом 2.....	27
РОЗДІЛ 3 Науково-дослідницький	29
3.1 Результати досліджень.....	29
3.1.1 Оцінювання експлуатаційних та енергетичних показників будівельних конструкцій будівлі.....	29
3.1.2 Оцінювання експлуатаційних та енергетичних показників будівельних конструкцій із застосуванням мінеральної вати.....	38
3.1.3 Оцінювання експлуатаційних та енергетичних показників будівельних конструкцій із застосуванням графітового пінополістирольного теплоізоляційного шару	45
3.1.4 Оцінювання експлуатаційних та енергетичних показників будівельних конструкцій із застосуванням екструдованого пінополістирольного теплоізоляційного шару.....	52
3.2 Аналіз результатів досліджень.....	58
3.3 Висновки за результатами дослідження.....	61

РОЗДІЛ 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	62
4.1 Охорона праці.....	62
4.1.1 Законодавча та нормативна база України з охорони праці.....	62
4.1.2 Організація робіт на тимчасових будівельних майданчиках та безпека висотних робіт.....	64
4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	66
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	69
БІБЛІОГРАФІЯ.....	71

ВСТУП

Актуальність теми дослідження зумовлена глобальними трансформаціями в енергетичній політиці та критичною необхідністю переосмислення підходів до проєктування, будівництва та експлуатації житлового й громадського фонду.

В умовах сучасної кліматичної кризи будівлі ідентифікуються як найбільші споживачі енергії в Європі, на які припадає близько 40% загального енергоспоживання та приблизно 36% викидів парникових газів, пов'язаних з енергією. Прийнята у травні 2024 року оновлена Директива про енергетичну ефективність будівель (EPBD 2024/1275)[1] ставить перед країнами-членами ЄС та асоційованими партнерами амбітну мету – досягнення повного декарбонізованого будівельного фонду до 2050 року. Для України ця проблема набуває особливої гостроти не лише в контексті європейської інтеграції, а й через нагальну потребу у масштабному відновленні пошкодженої інфраструктури внаслідок збройної агресії.

Енергетична безпека країни безпосередньо залежить від здатності знизити залежність від імпортованих енергоносіїв, де сектор будівель споживає понад 50% природного газу. Центральним елементом енергоефективності будь-якої будівлі є її оболонка. Теплоізоляційні характеристики огорожувальних конструкцій – стін, вікон, даху та фундаменту – визначають базовий рівень енергетичних потреб об'єкта. Проте традиційні методики статичного розрахунку часто не враховують складну динаміку теплопередачі, вплив сонячної радіації, внутрішніх тепловиділень та зміну кліматичних параметрів у часі. Це призводить до виникнення розриву між проєктними та фактичними показниками енергоспоживання, який може досягати значних величин.

Моделювання стає критично важливим інструментом, що дозволяє ще на стадії проєктування або реновації передбачити поведінку будівлі в реальних умовах експлуатації, оптимізувати товщину та тип ізоляційних матеріалів, а також оцінити термін окупності інвестицій.

Мета дослідження полягає у системному аналізі та математичному моделюванні впливу теплотехнічних параметрів огорожувальних конструкцій на показники питомого енергоспоживання будівлі для обґрунтування оптимальних стратегій підвищення енергоефективності в умовах сучасних нормативних вимог та кліматичних викликів.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання:

– вивчити сучасні міжнародні та національні вимоги до енергоефективності будівель, зокрема оновлену директиву EPBD 2024 та ДБН В.2.6-31:2021[2], з акцентом на нові показники, такі як потенціал глобального потепління протягом життєвого циклу (GWP).

– виконати порівняльний аналіз фізико-механічних та теплотехнічних властивостей традиційних та інноваційних ізоляційних матеріалів.

– оцінити структуру тепловтрат типових будівель та визначити пріоритетні напрямки оптимізації огорожувальних конструкцій для досягнення цільових показників декарбонізації.

Об'єктом дослідження є процеси теплопередачі та формування енергетичного балансу будівлі через її зовнішні огорожувальні конструкції під впливом внутрішніх та зовнішніх чинників.

Предметом дослідження є взаємозв'язок між термічним опором, тепловою інерцією, повітропроникністю огорожувальних конструкцій та результуючими показниками енергоефективності.

Публікації. Результати магістерської роботи опубліковано у збірнику тез доповідей науково-технічної конференції. За результатами досліджень опубліковано тези доповідей у ІХ Міжнародній студентській науково-технічній конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання» (Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 24-25 квітня 2026 року.) [3].

Ключові слова: КОЕФІЦІЄНТ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ, ОПІР ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Еволюція підходів до теплоізоляції та енергоефективності будівель

Люди з давніх часів використовували природні матеріали для захисту помешкань від спеки і холоду. Наприклад, у неолітичному селищі Скара-Брей на Оркнейських островах (Шотландія) будинки будували майже «вкопаними» в землю, а відходи насипали довкола стін, що робило їх вітронепроникними та добре ізольованими[4]. Стародавні єгиптяни масово зводили будівлі з обпалених на сонці глинобитних цеглин (саману), що містили соломку. Такі масивні глинисті конструкції мали велику теплову інерцію: удень вони нагрівалися, але не пропускали спеку всередину, а вночі повільно віддавали накопичене тепло[5].

Перші свідомі зусилля з використання спеціальних ізоляційних матеріалів приписують римлянам. Пліній Старший у I ст. писав, що для дахів використовували деревину коркових дубів (пробку) як природний утеплювач[6], а азбест застосовували як вогнетривкий та теплозберігаючий матеріал[7]. У середні віки скандинавські вікінги з успіхом утеплювали свої будинки: укладали смоляні мастики чи березову кору на дах під гонтами, плели мох та суху траву між колодами для ущільнення стін, а стріхи робили надзвичайно товстими (більш як півметра), щоб зберегти більше тепла. Вікінги звикли робити покрівлі з ґрунту (дерну) або соломи, що чудово утримувало тепло. Наприклад, одним з поширених способів було настилати шар берестяного рулону поверх дерну для гідроізоляції і класти товстий мох між брусами, що забезпечувало природну теплоізоляцію будівель[8].

У XVIII–XIX ст. почали з'являтися перші наукові основи теплопередачі. Ісаак Ньютон у 1701 р. сформулював відомий закон охолодження (падіння температури тіла пропорційно різниці температур)[9]. На початку XIX ст. французький вчений Жозеф Фур'є започаткував аналітичну теорію теплопровідності: він почав роботу над *Théorie Analytique de la Chaleur* ще у 1807 році і опублікував її у 1822 році[10]. Його закони дали можливість кількісно розраховувати теплоперенос у твердих тілах. Вже у 1829 р. французький фізик Жан

Клод Ежен Пекле визначив перші числові коефіцієнти теплопередачі для різних будівельних матеріалів, які фактично залишалися «галузевим стандартом» до початку XX століття.

Водночас з науковими досягненнями розвивалась і індустрія ізоляційних матеріалів. Уже в середині XIX ст. у 1840 р. у Уельсі Едвард Перрі вперше отримав мінеральне волокно (шлаковату вату) для утеплення труб. Наприкінці століття (1891) американська фірма Samuel Cabot Inc. запатентувала «Cabot's Quilt» – термоакустичний утеплювач з просушеної морської трави (водорості) між шарами паперу[11]. У 1897 р. американець Чарльз Холл розробив технологію отримання кам'яної вати з расплавлених вапняку та базальту (під назвою stone wool), започаткувавши її промислове виробництво[12].

На початку XX ст. поступово почали замінювати архаїчні «товсті стіни» раціональними багатошаровими конструкціями. Вже 1918 р. у Мюнхені було засновано дослідницький інститут з утеплення будівель, де систематично вивчалися параметри теплопровідності та теплотехнічні характеристики матеріалів[13].

Найбільший прорив у створенні високоефективних легких теплоізоляторів відбувся під час Другої світової війни. У 1941 р. компанія Dow Chemical (і незалежно DuPont) винайшла екструдований пінополістирол Styrofoam™, який після війни використали як утеплювач (зокрема для бункерів, холодильників, будинків)[14]. Наприкінці 1930-х – початку 1940-х німецький хімік Отто Байер відкрив хімію поліуретанів[15]. Згодом ці речовини стали основою для створення жорстких та спінених поліуретанів, що отримали широке застосування як теплоізоляція будинків (панелі з ППУ та пінополіуретанові плити).

Після енергетичної кризи 1970-х поширення набули динамічні методи оцінки енергоспоживання з погодинним імпульсом. Дотепер для розрахунку тепловтрат часто застосовували прості «градусо-добові» методи. Але завдяки комп'ютерам з'явилися спеціалізовані програми: першим інструментом для моделювання будівель був BRIS, представлений у 1963 р. в Стокгольмі[16]. Наприкінці 1970-х розробили ряд потужних засобів: США впровадили BLAST, DOE-2 та TRNSYS, які

враховували погодинні кліматичні дані й дозволяли виконувати детальні динамічні теплотехнічні розрахунки[17]. Водночас у 1975 р. в США був опублікований перший національний стандарт ASHRAE 90-75 з енергозбереження в будівлях.

В Україні системне регулювання енергоефективності стартувало з прийняттям ДБН В.2.6-31:2006 (теплоізоляція будівель), який переглядався у 2016 та 2021 рр. у відповідності до європейських директив.

Таким чином, історія теплоізоляції будівель пройшла шлях від емпіричних методів («земля + солома» – ідея теплової маси) до сучасних комп'ютерних моделей з погодинним прогнозуванням енергобалансу будівлі. Цей розвиток є фундаментом принципу будівель з нульовими чистими викидами CO₂ (NZEB), де теплоізоляція та модельні розрахунки поєднуються для максимального енергозбереження.

1.2 Стратегії та нормативне регулювання енергоефективності

Перегляд Директиви ЄС з енергоефективності будівель (EPBD 2024/1275) у травні 2024 року вперше поширив фокус не лише на експлуатаційне споживання енергії, але й на повний життєвий цикл будівлі. Відтепер обов'язковим буде розрахунок потенціалу глобального потепління будівель: крім викидів від опалення чи охолодження, враховуються «втілені» викиди від виробництва, транспортування та утилізації матеріалів. Це означає, що інженери і розробники мають звертати увагу не тільки на теплоізоляційну здатність матеріалів, а й на їхній загальний вуглецевий слід.

Ключові зміни EPBD 2024:

1. Зелені будівлі нового зразка: З 1 січня 2028 усі нові державні будівлі мають відповідати стандарту «Zero-Emission Building» (ZEB), а з 2030 – усі нові будівлі, що означає 0 емісій від спалювання викопного палива[18].

2. Обов'язкова оцінка життєвого циклу – LCA (потенціал глобального потепління – GWP): З 2028 року розрахунок GWP обов'язковий для всіх нових будівель площею понад 1000 м² (з обов'язковим зазначенням результатів у

енергоефективних сертифікатах), а з 2030 – для всіх нових будівель незалежно від площі.

3. Модернізація існуючих будівель: Кожна держава має оновити довгострокову стратегію реновації будівель; передбачається, що до 2030 р. середнє споживання первинної енергії в житловому секторі повинно знизитися на 16% порівняно з рівнем 2020 року[19]. Як мінімум 55% цього скорочення має бути забезпечено реновацією 43% найенергоефективніших будівель з найнижчим рівнем енергозахисту.

Директива передбачає поступове посилення вимог до енергетичної та екологічної ефективності, з поступовим використанням відновлюваних джерел енергії та обов'язковим урахуванням вуглецевих викидів у всьому життєвому циклі будівель.

Україна також посилює вимоги до теплозахисту будівель. З вересня 2022 року набули чинності нові ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель»[2], що значно підвищили нормативні показники опору теплопередачі. Наприклад, мінімальний приведений опір ($R_{q\min}$) для зовнішніх стін у I температурній зоні становить $4,00 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, у II зоні – $3,50 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ (табл. 1.1). Вимоги до скління та покрівель також посилено до рівня приблизно $0,75 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ для вікон (I зона) та понад $4,9 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ для дахів (I зона) (табл.1.1).

Водночас у новому ДБН передбачено певні гнучкі можливості для оптимізації. Зокрема, пункт 5.6 ДБН допускає проектування будівлі з R_q на рівні 80% від нормативного значення, якщо це компенсується іншими енергоефективними заходами, що забезпечують виконання цільового показника питомого енергоспоживання будівлі. Це відкриває простір для оптимізаційних розрахунків: при моделюванні можна варіювати товщини та властивості утеплення стін, дахів і перекриттів, балансуєчи теплоізоляцію із загальною енергоефективністю будівлі.

Таблиця 1.1 – Мінімально допустиме значення приведенного опору теплопередачі огорожувальної конструкції житлових та громадських будівель $R_{qmin}[2]$

Конструкція	R_{qmin} (I зона, м ² ·К/Вт)	R_{qmin} (II зона, м ² ·К/Вт)
Зовнішні стінові огорожувальні конструкції	4,0	3,5
Суміщені покриття, що межують із зовнішнім повітрям	7,0	6,0
Покриття опалюваних горищ (технічних поверхів), мансард, горищні перекриття неопалюваних горищ	6,0	5,5
Перекриття, що межують із зовнішнім повітрям, та над неопалюваними підвалами	5,0	4,0
Світлопрозорі огорожувальні конструкції	0,9	0,7
Зенітні ліхтарі	0,8	0,7
Зовнішні двері	0,7	0,6

Однак впровадження посилених стандартів в Україні у воєнний час стикається з фінансовими та логістичними труднощами. Обмеженість коштів, зупинені проекти та проблеми з постачанням матеріалів уповільнюють масову термомодернізацію та будівництво за оновленими нормами. Попри це, чітке розуміння встановлених нормативних порогів ($R_{q \min}$) лишається критично важливим для проведення коректних енергетичних розрахунків і вибору оптимальних рішень щодо утеплення в умовах жорстких обмежень ресурсів.

1.3 Теоретичні аспекти теплопередачі та енергетичного балансу

Розподіл тепла крізь будівельні огорожувальні конструкції відбувається одночасно трьома основними механізмами: провідністю (через матеріал), конвекцією (через рух повітря) та радіацією (тепловим випромінюванням).

Наприклад, тепло переходить через стіни та вікна згідно із законом Фур'є, а теплове випромінювання від холодних поверхонь може суттєво впливати на втрати тепла. Математично це моделюється диференціальним рівнянням теплопровідності (нерівноважним тепловим рівнянням) – $\rho c_p \partial T / \partial t = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$, де ρ – густина матеріалу, c_p – його питома теплоємність, k – коефіцієнт теплопровідності, T – температура, t – час, Q – внутрішні джерела тепла. У випадку однорідного ізотропного середовища (без внутрішніх джерел) одержуємо класичне тепло-рівняння:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (1.1)$$

де $\alpha = k / (\rho c_p)$ – теплопровідність (дифузивність) матеріалу[20]. Це означає, що швидкість зміни температури пропорційна другому просторовому градієнту температури, а матеріальні властивості (теплова ємність і провідність) визначають реакцію конструкції на зміну навантаження. Інерція будівлі (теплова маса) залежить від ρc_p : важкі конструкції зберігають більше тепла, затримуючи температурні коливання. Низька теплоємність (наприклад, у легких теплоізоляторів) призводить до малої «тепхозасвоєваності» поверхні, тобто вони швидко реагують на зміну навколишньої температури[21].

При розрахунку опору теплопередачі оболонки враховують не тільки шари утеплення, а й лінійні теплові містки – місця стиків конструкцій, металеві елементи, залізобетонні вузли тощо. Їхній вплив формалізується через приведений опір або через лінійні коефіцієнти тепловіддачі. Ігнорування теплових мостів веде до значного заниження тепловтрат – дослідження показують, що вони можуть збільшити сумарну тепловтрату будівлі на понад 15%[22]. Важливо також контролювати внутрішню поверхневу температуру: на теплових мостах вона падає, і якщо опускається нижче температури роси, з'являється небезпека конденсації води й утворення вогкості в конструкції. Таким чином, у моделюванні оболонки слід використовувати скориговані (ефективні) значення R та додавати лінійні або

точкові втрати, щоб уникнути помилкового прогнозу енергоспоживання і забезпечити належний рівень вологості всередині приміщень.

У типовій житловій будівлі найбільша частка теплових втрат припадає на зовнішні стіни (які мають найбільшу площу), але на практиці найменший питомий опір мають вікна та двері. За даними емпіричних спостережень і стандартних аналізів, розподіл втрат часто близький до наступного: стіни ~30–45%, вікна та двері ~20–30%, покрівлі ~10–15%, фундаментні перекриття ~5–10%. Додатково значними можуть бути втрати через вентиляцію та інфільтрацію – 15–30% загальної потреби на опалення.[23] Такі цифри ілюструють, що при утепленні слід насамперед підсилювати найбільші за площею елементи (стіни, покрівлю), а також звертати особливу увагу на «термошурупи» – вікна/двері та вентиляційні системи (наприклад, рекуператори повітря). Нижче наведено приблизний розподіл тепловтрат по компонентам будівлі:

Стіни (прибл. 30–45%) – тепло передається через матеріал (кондукція). Потенціал оптимізації: великий (збільшення товщини теплоізоляції, уникнення містків через каркас тощо).

Вікна/двері (прибл. 20–30%) – втрачають тепло за рахунок провідності скла/каркасів і радіації, крім того фігурує сонячний вплив. Оптимізація: середня (вибір енергоефективного скління, теплі рами, ущільнення).

Покрівля / перекриття (прибл. 10–15%) – тепло йде конвекційно та провідністю (усередині/ззовні). Потенціал: високий (утеплення даху, запобігання зимовому охолодженню і літньому перегріву).

Фундамент / плита (прибл. 5–10%) – теплопровідність у землю. Обмеження: відносно невеликий вплив (висока вартість повного утеплення ґрунту).

Вентиляція/інфільтрація (прибл. 15–30%) – обміну повітрям, втрати тепла з повітрям. Великі резерви економії через рекуперацію і герметизацію.

Моделювання дозволяє не лише оцінити «грубий» тепловий баланс, а й так зване теплосвосення (теплову інерцію) будівлі. Наприклад, легкі утеплювачі мають невеликий коефіцієнт теплоємності (низький об'ємний запас тепла), через що швидко реагують на коливання зовнішньої температури. Це означає, що вони

добре перешкоджають втратам (низький U-коефіцієнт ~ 0.19 Вт/м²К), але мають малу теплову інерцію. Як наслідок, інтер'єр у літню спеку швидко прогрівається, тому в сучасних моделях необхідно враховувати або додаткову теплову масу (масивні стіни, фази зміни стану, «заховані» об'єми води) для вирівнювання температури, або використання кондиціонування/пасивного охолодження.

1.4 Висновки за розділом 1

У результаті проведеного теоретичного узагальнення та аналізу сучасних підходів до забезпечення енергоефективності будівель встановлено, що ключову роль у формуванні енергетичного балансу відіграють огорожувальні конструкції, зокрема їхні теплоізоляційні характеристики. Саме через них відбувається найбільша частка тепловтрат, що обумовлює доцільність зосередження досліджень на підвищенні їх термічного опору та мінімізації теплопередачі.

Показано, що процес теплопередачі є багатофакторним і визначається сукупністю механізмів кондукції, конвекції та теплового випромінювання. Математичний опис цих процесів базується на рівнянні теплопровідності, яке дозволяє враховувати як стаціонарні, так і нестаціонарні режими теплообміну. Це створює основу для застосування чисельного моделювання при оцінці енергоефективності будівель та оптимізації їх конструктивних рішень.

Встановлено, що важливим фактором, який суттєво впливає на точність розрахунків, є врахування термічних містків. Ігнорування цих локальних зон підвищеної теплопровідності призводить до значного заниження оцінки тепловтрат та може спричинити порушення тепловологісного режиму огорожувальних конструкцій, зокрема утворення конденсату.

Аналіз структури тепловтрат показав, що найбільші втрати тепла припадають на зовнішні стіни, віконні та дверні прорізи, а також системи вентиляції. Це визначає пріоритетні напрями підвищення енергоефективності: удосконалення теплоізоляційних матеріалів, застосування енергоефективних світлопрозорих конструкцій та впровадження систем вентиляції з рекуперацією тепла.

Окрему увагу приділено впливу теплофізичних властивостей матеріалів на динамічну поведінку будівлі. Встановлено, що використання легких теплоізоляційних матеріалів із низьким коефіцієнтом теплосвоєння забезпечує ефективне зменшення тепловтрат у зимовий період, проте може знижувати теплову інерцію будівлі, що потребує додаткового врахування при проєктуванні для забезпечення літнього теплового комфорту.

Розгляд еволюції нормативних вимог і міжнародних підходів до енергоефективності засвідчив перехід від спрощених емпіричних рішень до комплексного життєвого циклу будівлі, включаючи оцінку викидів парникових газів. У цьому контексті особливого значення набуває оптимізаційне моделювання, яке дозволяє досягти балансу між енергетичною ефективністю, економічною доцільністю та екологічною безпекою.

Таким чином, дослідження впливу теплоізоляційних матеріалів на енергоефективність будівель є науково обґрунтованим і практично значущим напрямом, який дозволяє підвищити якість проєктування, знизити енергоспоживання та забезпечити комфортні умови експлуатації будівель в умовах сучасних енергетичних викликів.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Аналіз стану та рекомендовані енергоефективні заходи для житлового будинку

Проведений теплотехнічний аналіз огорожувальних конструкцій досліджуваної будівлі переконливо свідчить про наявність теплотехнічного дефіциту, що має як проєктне, так і експлуатаційне походження. Встановлено, що навіть за ідеалізованих умов (без урахування теплопровідних включень) опір теплопередачі зовнішніх стін становить $2,86\text{--}3,36 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, тоді як з урахуванням реальної теплотехнічної неоднорідності ($\gamma \approx 0,80$) цей показник знижується до $2,29\text{--}2,69 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$. Таким чином, конструкції не відповідають вимогам відносно чинних норм ДБН В.2.6-31:2021 [2] і дефіцит сягає до 40–43%, що є критичним з позицій енергоефективності.

Ключовим фактором, який зумовлює необхідність термомодернізації, є суттєве перевищення фактичного рівня тепловтрат над нормативно допустимим. Низький приведений опір теплопередачі огорожувальних конструкцій призводить до інтенсивного відтоку теплової енергії через стіни, що прямо впливає на збільшення питомого енергоспоживання будівлі. Розрахункові значення річного споживання енергії на опалення майже вдвічі перевищують встановлені нормативні межі ($80 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ для I температурної зони), що класифікує будівлю як енергетично неефективну (класи E–F).

Додатково встановлено, що теплотехнічна недосконалість конструкцій супроводжується порушенням тепловологісного режиму. Через недостатню товщину теплоізоляції (50 мм) точка роси зміщується всередину несучого шару або на межу шарів, що призводить до: конденсації водяної пари; зволоження газобетону; зростання коефіцієнта теплопровідності матеріалу; деградації конструкції внаслідок циклів заморожування–відтавання.

Особливо критичною є ситуація в зонах теплопровідних включень (анкери, перекриття, відкоси), де локальне зниження температури внутрішньої поверхні

створює умови для розвитку плісняви та погіршення санітарно-гігієнічних умов проживання.

Аналіз горизонтальних огороджувальних конструкцій показав ще більш значний дефіцит. Це призводить до: інтенсивних конвективних тепловтрат через верхню зону будівлі; переохолодження внутрішніх поверхонь; системного утворення конденсату.

Аналогічно, перекриття над підвалом формує зону підвищеного теплового дискомфорту для приміщень першого поверху та додаткові втрати енергії.

Суттєвим фактором, що підсилює тепловтрати, є гідрогазодинамічний вплив (димарний ефект). Розрахований гравітаційний напір ($\sim 38,5$ Па) спричиняє: неконтрольовану інфільтрацію холодного повітря через нижні конструкції; ексфільтрацію теплого повітря через верхні огороження; конвективне охолодження стін; явище wind-washing у шарі мінеральної вати. Це означає, що фактичні тепловтрати значно перевищують розрахункові, виконані без урахування повітропроникності.

Необхідність термомодернізації також обумовлена нормативно-правовими вимогами. Згідно з чинними будівельними нормами України, будівлі повинні відповідати мінімальному класу енергоефективності не нижче С. Виявлені показники досліджуваного об'єкта не лише не відповідають цим вимогам, але й унеможливають його експлуатацію без проведення модернізаційних заходів.

Для забезпечення відповідності житлового будинку чинним нормативним вимогам ДБН В.2.6-31:2021[2] та досягнення класу енергоефективності не нижче С необхідно впровадити комплексні термомодернізаційні заходи.

Для досягнення нормативного приведенного опору теплопередачі стін $R \geq 4,0$ $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{Вт}$ товщина фасадного утеплювача має бути суттєво збільшена. Інженерний розрахунок показує, що для компенсації теплопровідних включень ($\tau \approx 0,80$) загальний умовний тепловий опір конструкції має становити не менше $5,0$ $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{Вт}$.

Термомодернізація горищного перекриття шляхом влаштування додаткового шару теплоізоляції поверх існуючих конструкцій для досягнення нормативного показника. Перед укладанням утеплювача обов'язковим є відновлення суцільного

пароізоляційного бар'єра з внутрішнього боку для захисту теплоізоляції від зволоження висхідними потоками пари.

Для термомодернізації неопалюваного підвалу необхідно провести утеплення його стелі з боку підвального приміщення

Таком важливим є заміна світлопрозорих конструкцій шляхом демонтажу старих віконних блоків та встановлення нових енергоефективних систем із приведеним опором теплопередачі не менше $0,9 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$. Проєктні рішення повинні передбачати трикамерні або двокамерні склопакети з двома шарами низькоемісійного скла та заповненням міжскляного простору аргоном, а також влаштування герметичного монтажного шва за технологією "теплого монтажу" (пароізоляція зсередини, гідроізоляція та вітрозахист ззовні).

Будівлю вартує обладнати механічною припливно-витяжною системою вентиляції з утилізацією тепла витяжного повітря (рекуперацією) з ефективністю не менше 75%. Це дозволить кардинально знизити вентиляційні втрати тепла, нормалізувати вологісний режим у приміщеннях та забезпечити стабільний мікроклімат незалежно від коливань зовнішнього тиску та вітрового навантаження.

І останнє, це забезпечення довговічності та пожежної безпеки так, щоб вибрані теплоізоляційні матеріали за терміном ефективної експлуатації відповідали розрахунковому життєвому циклу будівлі. Системи зовнішнього утеплення стін та горищного перекриття повинні повністю задовольняти вимогам пожежної безпеки (використання негорючих матеріалів класу НГ) відповідно до ДБН.

2.2 Вибір матеріалів для досліджень

Для об'єктивного оцінювання теплопередачі необхідно врахувати розрахункові теплотехнічні показники матеріалів в умовах експлуатації Б, згідно з ДСТУ 9191:2022. Фізичні параметри конструктивних шарів стіни наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Фізичні параметри конструктивних шарів стіни

Назва конструктивного шару стіни	Товщина шару δ , м	Густина матеріалу ρ , кг/м ³	Розрахункова теплопровідність λ , Вт/(м·К)
Внутрішнє цементно-піщане опорядження	0,02	1800	0,76
Кладка з газоблоку класу D500 на клею	0,3	500	0,2
Плити з мінеральної вати (фасадні)	0,05	80	0,043
Зовнішній захисно-декоративний штукатурний шар	0,01	1700	0,7

Для проведення науково обґрунтованої термомодернізації зазначеного житлового будинку відповідно до вимог ДСТУ 9191:2022[24] та ДБН В.2.6-31:2021 необхідно проаналізувати спектр сучасних теплоізоляційних матеріалів. Вибір матеріалів має враховувати специфіку конструкцій, в саме те, що надземні стіни з газоблоку потребують збереження паропроникності, залізобетонне горищне перекриття, а також заглиблені на 3 метри стіни підвалу, які контактують із вологим ґрунтом.

Під час вибору теплоізоляційних матеріалів для термомодернізації будівлі необхідно враховувати не лише їхню розрахункову теплопровідність, але й паропроникність, вологісну стійкість, пожежну безпеку, механічну міцність, довговічність та сумісність із конкретними конструктивними рішеннями. У сучасній будівельній практиці для різних елементів огорожувальної оболонки застосовують кілька основних типів теплоізоляційних матеріалів, кожен з яких має власну сферу раціонального використання.

Базальтова (мінеральна) вата характеризується розрахунковим коефіцієнтом теплопровідності в умовах експлуатації Б на рівні 0,040–0,043 Вт/(м·К). Вона належить до групи негорючих матеріалів і має тривалий строк ефективної експлуатації, який становить не менше 50 років. Завдяки високій паропроникності, що є важливою перевагою при утепленні паропроникних огорожувальних конструкцій, цей матеріал є особливо доцільним для стін із ніздрюватого бетону, зокрема газоблоку. У таких системах мінеральна вата не перешкоджає дифузії водяної пари, а отже, знижує ризик накопичення вологи в несучих шарах стіни. Саме тому базальтова вата є одним із найраціональніших рішень для утеплення фасадів надземної частини будівлі, зокрема у складі вентиляованих або штукатурних фасадних систем, а також для горіщних перекриттів.

Графітовий пінополістирол, або Graphite EPS, має нижчу теплопровідність порівняно зі звичайним пінополістиролом, а саме близько 0,031 Вт/(м·К). Його група горючості відповідає самозатухаючим матеріалам. Основною сферою застосування цього утеплювача є теплоізоляція фасадів надземної частини будівель. Введення графітових добавок у структуру матеріалу дозволяє зменшити теплопровідність приблизно на п'яту частину, що дає змогу досягати нормативних показників теплозахисту при меншій товщині шару утеплення. Водночас низька паропроникність пінополістиролу потребує особливо уважного аналізу вологісного режиму огорожувальної конструкції, оскільки за певних умов це може призвести до накопичення вологи в стіновому матеріалі.

Екструдований пінополістирол, або XPS, має ще кращі теплоізоляційні характеристики, оскільки його розрахункова теплопровідність в умовах експлуатації Б становить 0,030–0,035 Вт/(м·К). Матеріал вирізняється нульовою капілярністю, надзвичайно низьким водопоглинанням та високою міцністю на стиск, що коливається в межах 150–400 кПа залежно від марки. Саме ці властивості роблять його незамінним для теплоізоляції підвальних стін, фундаментів, цокольних поверхів і підлог по ґрунту. Особливо ефективним XPS є у заглиблених конструкціях, де матеріал одночасно протистоїть дії вологи, механічному навантаженню та циклам заморожування і відтавання.

Пінополіізоціанурат, або PIR, належить до найбільш ефективних твердих утеплювачів за показником теплопровідності, який становить 0,020–0,024 Вт/(м·К). Матеріал має групу горючості Г1–Г2, а завдяки закритій комірчастій структурі та наявності фольгованого покриття є практично паронепроникним і вологостійким. Найчастіше PIR використовують для утеплення горищних перекриттів, плоских покрівель та внутрішнього утеплення конструкцій, де важливо досягти високого теплозахисту при мінімальній товщині шару. Така особливість дозволяє зменшувати конструктивну висоту теплоізоляційного шару без втрати його ефективності.

Піноскло є абсолютно негорючим, водо- і паронепроникним матеріалом, теплопровідність якого перебуває в межах 0,040–0,080 Вт/(м·К). Його головними перевагами є виняткова міцність на стиск, яка може досягати 4 МПа, та практично необмежений термін служби. Саме тому піноскло доцільно застосовувати в навантажених підлогах підвалу, цокольних вузлах і фундаментах. Разом із тим високі матеріальні витрати та технологічна складність монтажу обмежують його широке використання.

Для подальших детальних теплотехнічних розрахунків, моделювання температурних полів і аналізу вологісного стану конструкцій доцільно обрати три матеріали, які найбільш повно відповідають особливостям досліджуваної будівлі та її конструктивних зон. Першим із них є базальтова вата, яка розглядатиметься як базовий матеріал для термомодернізації надземної частини фасадних стін із газоблоку. Її вибір обґрунтовується високою паропроникністю, що забезпечує виведення ексфільтраційної вологи, яка інтенсивно переноситься крізь пористу кладку під дією гравітаційного напору. Розрахункові дослідження з використанням цього матеріалу будуть спрямовані на визначення такої товщини утеплювача, яка забезпечить нормативний приведений опір теплопередачі без ризику конденсації вологи на межі газоблок – мінеральна вата.

Другим матеріалом є графітовий пінополістирол, який доцільно розглядати як високоенергоєфективну альтернативу мінераловатному утеплювачу для зовнішнього утеплення стін надземної частини. Його нижча теплопровідність дає

змогу досягати нормативного опору теплопередачі за меншої товщини шару. Водночас саме для цього матеріалу особливо важливим є аналіз міграції водяної пари, оскільки його низька паропроникність може спричинити замикання вологи всередині газобетонної кладки, що є критичним для довговічності стінових конструкцій.

Третім матеріалом є екструдований пінополістирол, який обрано для утеплення заглиблених конструкцій стін і підлоги підвалу на глибину до трьох метрів, а також для цокольних вузлів. Саме ці ділянки перебувають під тривалим впливом вологи, ґрунтового тиску та механічних навантажень, тому потребують матеріалу з підвищеною міцністю, низьким водопоглинанням і стабільними теплоізоляційними властивостями. Подальші розрахункові дослідження будуть орієнтовані на визначення тепловтрат у зонах промерзання ґрунту та усунення містків холоду в місцях примикання плити підвалу до фундаменту.

2.3 Загальна методика проведення досліджень

У цій роботі дослідження базуються на системному підході до оцінювання теплофізичного стану та енергетичної ефективності захисної оболонки будівлі. Розрахунки проводяться з використанням чинної Методики визначення енергетичної ефективності будівель, затвердженої наказом Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 № 169[25].

Передача теплоти через зовнішні огорожувальні конструкції є складним динамічним процесом, який відбувається в результаті дії градієнта температур між внутрішнім та зовнішнім середовищем. Цей процес охоплює три основні фізичні механізми теплообміну: теплопровідність, конвекцію та теплове випромінювання.

Теплопровідність – процес перенесення теплової енергії на мікрорівні внаслідок безпосередньої взаємодії мікрочастинок (молекул, атомів, вільних електронів) усередині матеріалу. Цей механізм є домінуючим для суцільних шарів

огороджувальних конструкцій (тримальної кладки, шарів теплоізоляції) і описується законом Фур'є:

$$q = -\lambda \cdot dT/dx \quad (2.1)$$

де q – густина теплового потоку, Вт/м²; λ – розрахунковий коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·К); dT/dx – температурний градієнт у напрямку перенесення тепла.

Конвекція обумовлює передачу теплоти між твердою поверхнею огороджувальної конструкції та рухомим газовим середовищем (повітрям приміщення або зовнішнім атмосферним повітрям). Кількість теплоти, що передається, визначається згідно із законом Ньютона-Ріхмана:

$$q = \alpha \cdot (T_o - T_c) \quad (2.2)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); T_o – температура навколишнього повітряного середовища, °С або К; T_c – температура поверхні огороджувальної конструкції, °С або К.

Теплове випромінювання (радіаційний теплообмін) забезпечує перенесення енергії у вигляді електромагнітних хвиль інфрачервоного спектра. У практичних теплотехнічних розрахунках радіаційна складова інтегрується в узагальнений коефіцієнт тепловіддачі на внутрішній та зовнішній поверхнях огороження.

У реальних експлуатаційних умовах теплопередача має комплексний характер. Проте основним інструментом оцінювання теплозахисної спроможності конструкцій є визначення опору теплопередачі, що є критерієм їхньої теплоізоляційної здатності.

Метою теплотехнічного розрахунку зовнішніх огороджувальних конструкцій є визначення необхідних параметрів і товщини теплоізоляційних матеріалів, які забезпечать повну відповідність будівельних елементів сучасним жорстким вимогам енергоефективності. Це дозволяє обґрунтувати доцільність

проектних рішень та забезпечити мінімізацію трансмісійних втрат тепла через огороження будівлі.

Виконання теплотехнічних розрахунків здійснюється відповідно до вимог чинної нормативно-технічної бази України:

- ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель»[2]. Цей документ регламентує мінімально допустимі значення приведенного опору теплопередачі для огорожувальних конструкцій залежно від температурної зони експлуатації, а також встановлює вимоги до теплотехнічної однорідності й запобігання конденсації вологи.

- ДСТУ 9190:2022 «Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання» [26]. Стандарт визначає методологію комплексного оцінювання енергетичного балансу будівлі та розрахунку питомого енергоспоживання.

- ДСТУ 9191:2022 «Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель»[24]. Цей стандарт регламентує технічні критерії вибору теплоізоляції (паропроникність, пожежна безпека, термін ефективної експлуатації) з урахуванням характеристик матеріалу тримальних стін.

- ДСТУ-Н Б В.2.6-101:2010 «Конструкції будинків і споруд. Метод визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій»[27]. Стандарт встановлює інженерні методики розрахунку термічного опору для однорідних і багатошарових конструкцій з урахуванням теплопровідних включень.

2.3.1 Розрахунок опору теплопередачі стінових конструкцій

Відповідно до положень ДБН В.2.6-31:2021[2], теплоізоляційна спроможність багатошарової огорожувальної конструкції оцінюється умовним опором теплопередачі R_0 , який обчислюється за формулою:

$$R_0 = \frac{1}{a_3} + \sum_{i=1}^l \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_B} \quad (2.3)$$

R_0 – умовний опір теплопередачі огорожувальної конструкції, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

a_3 – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, який для зовнішніх стін у зимовий період становить $23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

d_i – товщина i -го конструктивного шару, м ;

λ_i – розрахунковий коефіцієнт теплопровідності матеріалу i -го шару в умовах експлуатації Б, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$;

a_B – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, який згідно з нормативами для стін приймається рівним $8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

l – загальна кількість шарів конструкції.

2.3.2 Розрахунок містків холоду

Реальні будівельні огороження не є абсолютно однорідними через наявність конструктивних елементів із вищою теплопровідністю (залізобетонні перекриття, колони, ригелі, віконні відкоси, анкери кріплення). Для коректного оцінювання теплозахисних якостей визначають приведений опір теплопередачі R_{np} , який враховує теплотехнічну неоднорідність оболонки.

У спрощених інженерних розрахунках для конструкцій із паралельними неоднорідними ділянками приведений опір теплопередачі розраховується за формулою:

$$R_{np} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{f_i}{R_i}} \quad (2.4)$$

де R_{np} – приведений опір теплопередачі огорожувальної конструкції, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; f_i – частка площі ділянки з опором R_i ; R_i – опір теплопередачі i -ї ділянки огороження, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

Для точнішого моделювання складних вузлів примикань (згідно з ДБН В.2.6-31:2021 та ДСТУ EN ISO 10211[28]) приведений опір теплопередачі визначається з урахуванням лінійних (ψ_j , Вт/(м·К)) та точкових (χ_j , Вт/К) коефіцієнтів теплопередачі теплопровідних включень.

$$R_{np} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_0} + \frac{\sum \psi_j l_j}{A} + \frac{\sum \chi_j}{A} \right)} \quad (2.5 \backslash)$$

де l_j – довжина лінійного теплопровідного включення j -го типу, м; A – загальна площа фрагмента конструкції, м².

2.3.3 Розрахунок горизонтальних бар'єрів

Особливе значення в загальному енергетичному балансі будівлі належить горизонтальним конструкціям – горищному перекриттю та перекриттю над підвалом, оскільки питомі втрати тепла через ці зони посилюються конвективними потоками всередині приміщень.

Горищне перекриття межує з неопалюваним горищем, де температура повітря в зимовий період є близькою до зовнішньої. Відповідно до положень ДБН В.2.6-31:2021, мінімально допустимий опір теплопередачі горищних перекриттів неопалюваних горищ становить $R_{q,\min}=6,0$ м²·К/Вт. Термічний опір горищного перекриття R_{at} (м²·К/Вт) обчислюється за формулою:

$$R_{at} = \frac{1}{h_3} + \sum_{i=1}^l \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_B} \quad (2.6 \backslash)$$

де $h_B = 8,7$ Вт/(м²·К) – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні перекриття; $h_3 = 12$ Вт/(м²·К) – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні перекриття, зверненої до неопалюваного горища.

Іншим критичним теплотехнічним вузлом є заглиблений на 3 метри підвал. Характер теплообміну підземних конструкцій з навколишнім середовищем відрізняється від наземних стін через стабілізувальний вплив масиву ґрунту.

Термічний опір перекриття над неопалюваним підвалом обчислюється аналогічно.

2.4 Висновки за розділом 2

Отже, необхідність проведення термомодернізації обґрунтовується сукупністю таких факторів: критичний дефіцит теплового опору огороджувальних конструкцій; перевищення нормативного енергоспоживання майже вдвічі; порушення тепловологісного режиму та ризик деградації конструкцій; інтенсивні інфільтраційні втрати, зумовлені димарним ефектом; невідповідність сучасним нормативним вимогам та законодавчим обмеженням[29-36].

У результаті проведеного аналізу та відповідно до вимог ДСТУ 9191:2022 обґрунтовано доцільність застосування комплексу сучасних теплоізоляційних матеріалів, які забезпечують ефективну ліквідацію наявного дефіциту теплового опору огороджувальних конструкцій. Встановлено, що базальтова вата з коефіцієнтом теплопровідності є одним із можливих рішень для утеплення фасадів і горищних перекриттів завдяки поєднанню високої паропроникності та повної негорючості, що забезпечує сприятливий вологісний режим стін із автоклавного газобетону та відповідність вимогам пожежної безпеки.

Разом з тим визначено, що графітовий пінополістирол із зниженим коефіцієнтом теплопровідності може розглядатися як ефективна альтернатива для фасадних систем, оскільки дозволяє досягати нормативних показників теплозахисту при меншій товщині утеплювача. Однак його застосування потребує обов'язкового врахування дифузійних процесів водяної пари через низьку паропроникність матеріалу, що є критичним для забезпечення довговічності конструкцій із пористих бетонів.

Для теплоізоляції заглиблених конструкцій підвалу обґрунтовано використання екструдованого пінополістиролу, який характеризується нульовим капілярним водопоглинанням та високою механічною міцністю. Це забезпечує його ефективну роботу в умовах підвищеної вологості, гідростатичного та ґрунтового тиску, що є визначальним для підземних частин будівлі.

РОЗДІЛ 3 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ

3.1 Результати досліджень

3.1.1 Оцінювання експлуатаційних та енергетичних показників будівельних конструкцій будівлі

Як було встановлено в попередньому розділі, об'єктом дослідження обрано житлову будівлю середньої поверховості з висотою надземної частини 16,5 м, яка має неопалюване горище та заглиблений підвал глибиною 3 м (рис.3.1). Така конфігурація є типовою для значної частини житлового фонду, що дозволяє отримані результати узагальнювати та застосовувати на практиці.



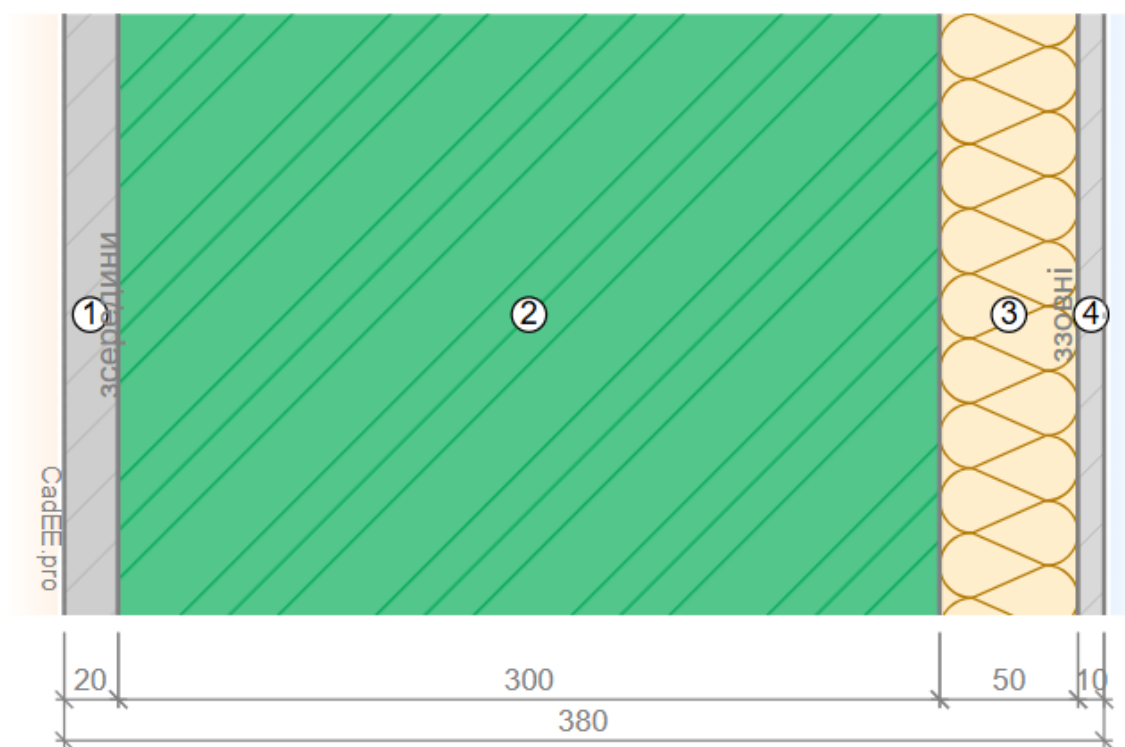
Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд будівлі згідно з проектом

Огороджувальна оболонка будівлі сформована кількома основними конструктивними елементами. Зовнішні стіни виконані з газобетонних блоків завтовшки 300 мм із додатковим шаром мінераловатної теплоізоляції товщиною 50

мм. Горіщне перекриття представлено залізобетонною плитою товщиною 220 мм, утеплення якої реалізоване за допомогою застарілої засипної теплоізоляції. Перекриття над підвалом також виконане із залізобетону та характеризується недостатнім рівнем теплоізоляції, оскільки безпосередньо контактує з холодним підземним середовищем.

Вибір саме цієї будівлі для дослідження зумовлений тим, що за період її експлуатації нормативні вимоги до теплозахисних характеристик огорожувальних конструкцій суттєво посилилися. Унаслідок цього фактичні теплоізоляційні властивості конструкцій не відповідають сучасним стандартам енергоефективності.

У зв'язку з цим першочерговим етапом дослідження є визначення фактичного опору теплопередачі огорожувальних конструкцій будівлі. Відповідно до проектної документації, конструкція зовнішньої стіни житлових приміщень передбачалася такою, як наведено на рисунку 3.2.



1 – штукатурний шар, 2 – газоблок, 3 – мінераловатні плити, 4 – штукатурний шар.

Рисунок 3.2 – Будова стіни згідно проекту

На основі проведених теоретичних розрахунків теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій було визначено, що за поточної структури стіни опір теплопередачі становить приблизно $R = 2,86 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$. Отримане значення свідчить про те, що наявний теплоізоляційний потенціал конструкції не повною мірою відповідає сучасним вимогам енергоефективності. З огляду на це, обґрунтовано висновок про необхідність інтеграції додаткового ефективного утеплювального шару до стінових систем запроєктованого житлового будинку.

Паралельно з цим було виконано аналіз температурного розподілу по товщині конструкції та побудовано графіки зміни тиску водяної пари (представлені на рис. 3.3 та 3.4).

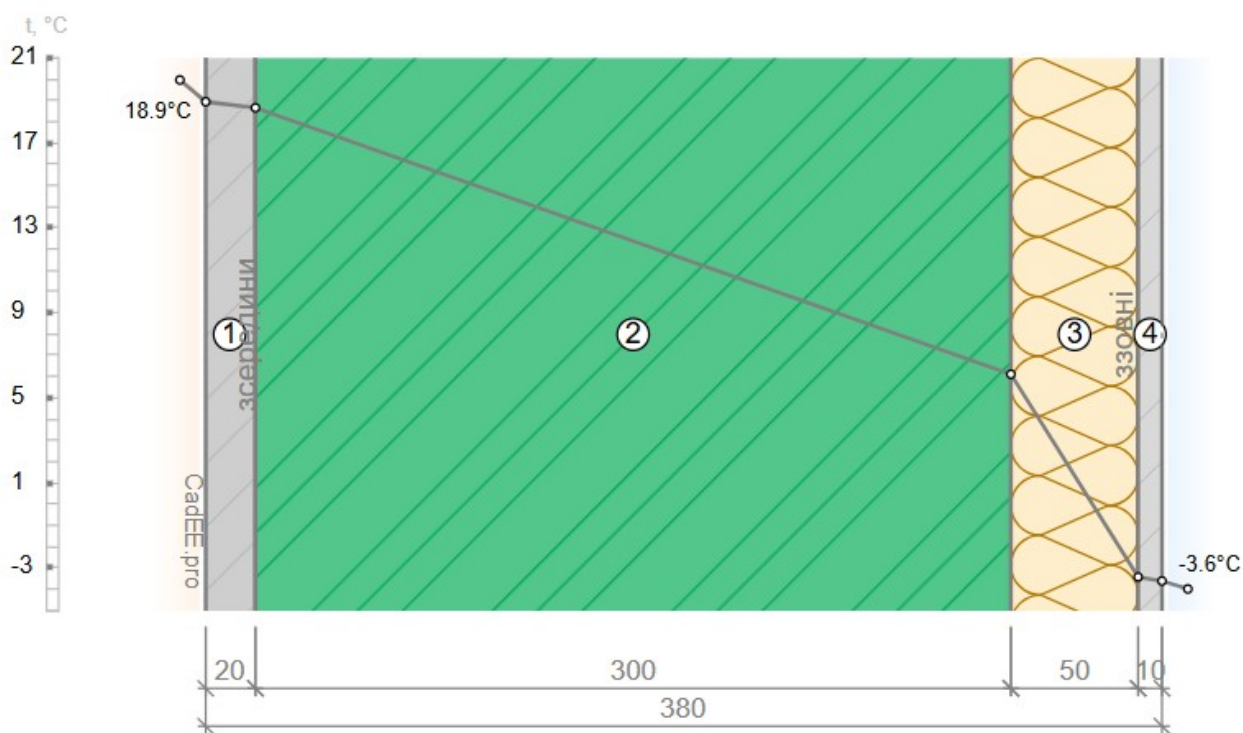


Рисунок 3.3 – Розподіл температури та зони зволоження

Результати моделювання засвідчили, що попри низький опір теплопередачі, стіни будівлі демонструють задовільний вологісний режим. Зокрема, навіть за умови зниження температури зовнішнього повітря нижче позначки $-3,6 \text{ °C}$, у товщі матеріалу не формується критична зона конденсації (зволоження). Поточний

парціальний тиск водяної пари залишається в межах безпечного нормативного діапазону, що мінімізує ризики накопичення вологи всередині огородження та забезпечує довговічність матеріалів.

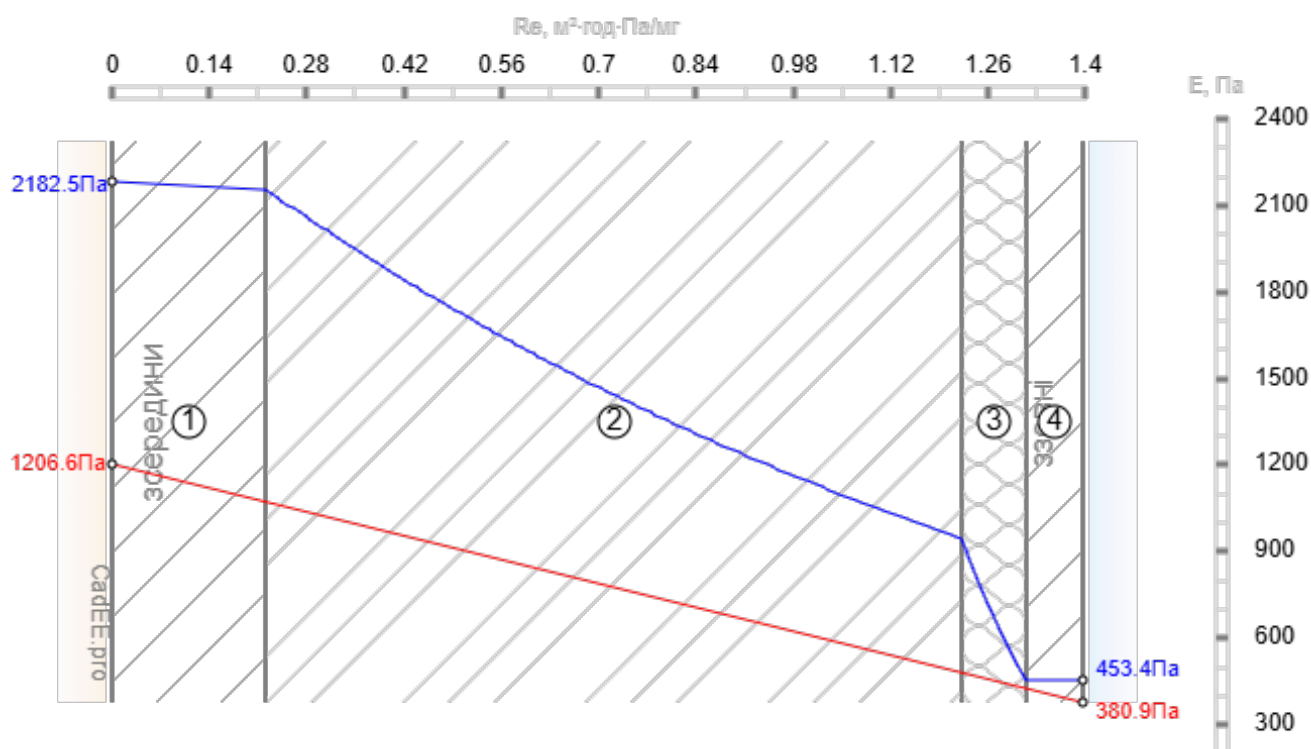


Рисунок 3.4 – Графік тиску водяної пари

Проведені комплексні інженерні обстеження підтверджують, що поточний стан будівлі не відповідає сучасним теплоізоляційним та конструктивним нормам. Виявлений критично низький опір теплопередачі свідчать про незадовільний енергетичний баланс споруди. Це вказує на гостру необхідність проведення глибокої термомодернізації для зниження енерговитрат та захисту конструкцій від подальшого руйнування.

З метою вибору найбільш ефективного та економічно доцільного варіанта утеплення, у роботі буде виконано порівняльний теплотехнічний розрахунок для трьох видів ізоляційних матеріалів. Для кожного матеріалу буде проаналізовано різні варіанти товщини шару, щоб визначити оптимальні параметри, які

забезпечать максимальний термічний опір та відповідність сучасним стандартам енергоефективності.

Для проведення розрахунків, визначимо розмірні характеристики будинку, які становлять:

Довжина будинку становить – 31,1 м.

Ширина будинку становить – 16,4 м.

Висота будівлі становить – 16,5 м.

Проте, оскільки будинок не має прямокутної форми, то по кожній стіні, визначатимемо їх розмірні характеристики, для цього визначаємо розміри вікон житлових приміщень та місць загального користування (МЗК), дверей балконних та вхідних.

Розпочнемо із найбільшої за площею стіни.

Отже, розмірні характеристики світлопрозорих конструкцій цієї стіни наступні:

Віконно-дверні блоки – 1: $2,5 \times 2,5$ – 14 шт;

Віконний блок – 1 : $2,5 \times 2,5$ – 2 шт;

Віконний блок місць загального користування – 5 : $12,95 \times 4,0$ – 1 шт;

Групуємо і вираховуємо площі однакових конструкцій стіни:

Віконно-дверні блоки – 1: $2,5 \times 2,5 \times 14 = 87,5 \text{ м}^2$;

Віконний блок – 1 : $2,5 \times 2,5 \times 2 = 12,5 \text{ м}^2$;

Віконний блок місць загального користування – 5 : $12,95 \times 4,0 \times 1 = 51,8 \text{ м}^2$.

Периметри вікон: $(2,5 + 2,5) \times 2 \times 14 + (12,95 + 4,0) \times 2 + (2,5 + 2,5) \times 2 \times 2 = 193,9 \text{ м. пог}$

Визначаємо площу для утеплення найбільшої за площею стіни:

$31,1 \times 13,0 - 87,5 - 12,5 - 51,8 = 252,5 \text{ м}^2$.

Далі проводимо розрахунок протилежної стіни.

Отже, розмірні характеристики світлопрозорих конструкцій протилежної стіни наступні:

Віконно-дверні блоки – 1: $2,5 \times 2,5$ – 14 шт;

Віконно-дверні блоки місць загального користування – 2: $4,0 \times 2,75$ – 2 шт;

Віконно-дверні блоки місць загального користування – 3: $4,0 \times 2,75$ – 1 шт;

Віконний блок – 1 : $2,5 \times 2,5 = 1$ шт;

Віконний блок місце загального користування – 2 : $2,5 \times 2,15 = 2$ шт;

Віконний блок – 4 : $2,5 \times 0,65 = 1$ шт;

Віконний блок місце загального користування – 6 : $4,0 \times 2,675 = 1$ шт;

Віконний блок місце загального користування – 7 : $4,0 \times 2,15 = 1$ шт;

Віконний блок – 8 : $2,5 \times 2,5 = 3$ шт;

Віконний блок – 9 : $4,0 \times 2,5 = 1$ шт;

Віконний блок – 10 : $1,5 \times 2,5 = 1$ шт;

Групуємо і вираховуємо площі однакових конструкцій протилежної стіни будівлі:

Віконно-дверні блоки – 1: $2,5 \times 2,5 \times 14 = 87,5 \text{ м}^2$;

Віконно-дверні блоки місце загального користування – 2: $4,0 \times 2,75 \times 2 = 22 \text{ м}^2$;

Віконно-дверні блоки місце загального користування – 3: $4,0 \times 2,75 \times 1 = 11 \text{ м}^2$;

Віконний блок – 1 : $2,5 \times 2,5 \times 1 = 6,25 \text{ м}^2$;

Віконний блок місце загального користування – 2 : $2,5 \times 2,15 \times 2 = 10,75 \text{ м}^2$;

Віконний блок – 4 : $2,5 \times 0,65 \times 1 = 1,625 \text{ м}^2$;

Віконний блок місце загального користування – 6 : $4,0 \times 2,675 \times 1 = 10,7 \text{ м}^2$;

Віконний блок місце загального користування – 7 : $4,0 \times 2,15 \times 1 = 8,6 \text{ м}^2$;

Віконний блок – 8 : $2,5 \times 2,5 \times 3 = 18,75 \text{ м}^2$;

Віконний блок – 9 : $4,0 \times 2,5 \times 1 = 10 \text{ м}^2$;

Віконний блок – 10 : $1,5 \times 2,5 \times 1 = 3,75 \text{ м}^2$.

Периметри вікон протилежної стіни будівлі:

$(2,5+2,5) \times 2 \times 14 + (4,0+2,75) \times 2 \times 2 + (4,0+2,75) \times 2 + (2,5+2,5) \times 2 + (2,5+2,15) \times 2 \times 2 +$
 $+(2,5+0,65) \times 2 + (4,0+2,675) \times 2 + (4,0+2,15) \times 2 + (2,5+2,5) \times 3 \times 2 + (4,0+2,5) \times 2 +$
 $+(1,5+2,5) \times 2 = 140 + 27 + 13,5 + 10 + 18,6 + 6,3 + 13,35 + 12,3 + 30 + 13 + 8 = 292,05 \text{ м.пог.}$

Визначаємо площу для утеплення стіни:

$31,1 \times 15,275 - 87,5 - 22 - 11 - 6,25 - 10,75 - 1,625 - 10,7 - 8,6 - 18,75 - 10 - 3,75 = 287,128 \text{ м}^2$.

Далі проводимо розрахунок меншої стіни з вікнами:

Віконно-дверні блоки – 1: $2,5 \times 2,5 = 9$ шт;

Віконний блок – 3 : $2,5 \times 1,35 = 1$ шт;

Віконний блок – 8 : $2,5 \times 2,5 - 3$ шт;

Вікно – 1 : $1,1 \times 2,1 - 1$ шт;

Вікно – 2 : $1,1 \times 2,5 - 4$ шт;

Вікно – 3 : $1,1 \times 1,5 - 1$ шт;

Вікно – 4 : $1,5 \times 2,5 - 1$ шт;

Вікно місць загального користування – 6 : $2,0 \times 0,85 - 1$ шт;

Вікно місць загального користування – 7 : $2,0 \times 0,8 - 4$ шт.

Групуємо і вираховуємо площі однакових конструкцій меншої стіни з вікнами:

Віконно-дверні блоки – 1: $2,5 \times 2,5 \times 9 = 56,25 \text{ м}^2$;

Віконний блок – 3 : $2,5 \times 1,35 \times 1 = 3,375 \text{ м}^2$;

Віконний блок – 8 : $2,5 \times 2,5 \times 3 = 18,75 \text{ м}^2$;

Вікно – 1 : $1,1 \times 2,1 \times 1 = 2,31 \text{ м}^2$;

Вікно – 2 : $1,1 \times 2,5 \times 4 = 11 \text{ м}^2$;

Вікно – 3 : $1,1 \times 1,5 \times 1 = 1,65 \text{ м}^2$;

Вікно – 4 : $1,5 \times 2,5 \times 1 = 12,5 \text{ м}^2$;

Вікно місць загального користування – 6 : $2,0 \times 0,85 \times 1 = 1,7 \text{ м}^2$;

Вікно місць загального користування – 7 : $2,0 \times 0,8 \times 4 = 6,4 \text{ м}^2$.

Периметр вікон меншої стіни з вікнами:

$(2,5+2,5) \times 2 \times 9 + (2,5+1,35) \times 2 + (2,5+2,5) \times 3 \times 2 + (1,1+2,1) \times 2 + (1,1+2,5) \times 4 \times 2 +$
 $+(1,1+1,5) \times 2 + (1,5+2,5) \times 2 + (2,0+0,85) \times 2 + (2,0 \times 0,8) \times 2 \times 4 = 90 + 7,7 + 30 + 6,4 + 28,8 +$
 $+ 5,2 + 8 + 5,7 + 22,4 = 204,2 \text{ м.пог.}$

Визначаємо площу для утеплення меншої стіни з вікнами:

$16,4 \times 15,0 - 56,25 - 3,375 - 18,75 - 2,31 - 11 - 1,65 - 12,5 - 1,7 - 6,4 = 135,065 \text{ м}^2$.

Далі проводимо розрахунок меншої стіни з евакуаційними виходами:

Віконно-дверні блоки – 1: $2,5 \times 2,5 - 1$ шт;

Віконно-дверні блоки – 4: $2,2 \times 0,9 - 4$ шт;

Віконно-дверні блоки – 5: $2,2 \times 2,0 - 1$ шт;

Вікно – 5 : $0,8 \times 2,0 - 1$ шт.

Групуємо і вираховуємо площі однакових конструкцій меншої стіни з евакуаційними виходами:

$$\text{Віконно-дверні блоки} - 1: 2,5 \times 2,5 \times 1 = 6,25 \text{ м}^2;$$

$$\text{Віконно-дверні блоки} - 4: 2,2 \times 0,9 \times 4 = 7,92 \text{ м}^2;$$

$$\text{Віконно-дверні блоки} - 5: 2,2 \times 2,0 \times 1 = 4,4 \text{ м}^2;$$

$$\text{Вікно} - 5 : 0,8 \times 2,0 \times 1 = 1,6 \text{ м}^2.$$

Периметр вікон:

$$(2,5+2,5) \times 2 + (2,2+0,9) \times 2 \times 4 + (2,2+2,0) \times 2 + (0,8 \times 2,0) \times 2 = 10 + 24,8 + 8,4 + 5,6 = 48,8$$

м.пог.

Визначаємо площу для утеплення меншої стіни з евакуаційними виходами:

$$16,4 \times 15,275 - 6,25 - 7,92 - 4,4 - 1,6 = 230,34 \text{ м}^2.$$

Загальний периметр вікон будівлі:

$$193,9 + 292,05 + 204,2 + 48,8 = 738,95 \text{ м.пог.}$$

Загальна площа зовнішніх стін становить

$$252,5 + 287,128 + 135,065 + 230,34 = 905,033 \text{ м}^2.$$

Надалі проводимо розрахунок значення опору теплопередачі в існуючій конструкції стіни:

$$R_{\Sigma i} = \frac{1}{U_{\Sigma i}} = \frac{1}{a_3} + \sum_{i=1}^I \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_B} = \frac{1}{23} + \frac{0,02}{0,76} + \frac{0,3}{0,2} + \frac{0,05}{0,043} + \frac{0,01}{0,7} + \frac{1}{8,7} = 2,86 \left(\frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}} \right)$$

$$R_{\Sigma i} - \text{опір теплопередачі стіни, } R_{\min} = 4,0 \left(\frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}} \right);$$

a_B – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, Вт/(м²·К), який згідно з нормативами для стін приймається рівним 8,7 Вт/(м²·К);

0,02 – товщина цементно-піщаної штукатурки, м;

0,3 – товщина газоблоку класу D500, м;

0,05 – товщина мінеральної вати-утеплювача, м;

0,01 – товщина захисно-декоративного штукатурного шару, м;

0,76 – коефіцієнт теплопровідності цементно-піщаної штукатурки, Вт/м·К;

0,2 – коефіцієнт теплопровідності газоблоку класу D500, Вт/м·К;

0,043 – коефіцієнт теплопровідності мінеральної вати-утеплювача, Вт/м·К;

0,7 – коефіцієнт теплопровідності захисно-декоративного штукатурного шару, Вт/м·К;

a_3 – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, Вт/(м²·К), який для зовнішніх стін у зимовий період становить 23 Вт/(м²·К).

Подальший комплексний розрахунок енерговитрат упродовж опалювального сезону, теплової потужності та приведеного опору теплопередачі об'єкта базується на попередньому визначенні коефіцієнтів лінійного теплопередавання наявних теплових містків:

$$K_{\Sigma kL} = \sum_{j=1}^J k_j L_j = 738,95 \cdot 0,032 \approx 23,65 \frac{Bm}{K}$$

$K_{\Sigma kL}$ – загальний коефіцієнт теплопередачі лінійних теплових містків;

k_j – лінійний коефіцієнт теплопередачі j-го теплового містка, Вт/м·К;

L_j – протяжність (довжина) відповідного теплового містка, м.

На основі отриманих значень виконується розрахунок приведеного опору теплопередачі зовнішньої стіни:

$$R_{\Sigma} = \frac{A_{\Sigma}}{\sum_{i=1}^I \frac{A_i}{R_{\Sigma i}} + \sum_{j=1}^J k_j L_j} = \frac{905,033}{\frac{905,033}{2,86} + 23,65} \approx 2,66 \left(\frac{m^2 \cdot K}{Bm} \right)$$

R_{Σ} – приведений опір теплопередачі огорожувальної конструкції, $\left(\frac{m^2 \cdot K}{Bm} \right)$;

A_{Σ} – загальна (повна) площа досліджуваної поверхні стіни, м²;

A_i – площа окремого фрагмента або неоднорідного елемента поверхні, м²;

$R_{\Sigma i}$ – термічний опір теплопередачі окремого i-го елемента конструкції, $\left(\frac{m^2 \cdot K}{Bm} \right)$.

На основі отриманих геометричних та теплотехнічних параметрів виконується обчислення теплової потужності (пікових тепловтрат) через зовнішню стіну для умов Івано-Франківської області:

$$q_{\Sigma} = A_{\Sigma} \cdot U_{\Sigma} \cdot (t_{in} - t_{out}) = 905,033 \cdot 0,38 \cdot (20 - 0,4) \approx 6668,66 \text{ (кВт)}$$

q_{Σ} – тепла потужність (трансмійні тепловтрати) через огорожувальну конструкцію, Вт;

$A_{ц}$ – загальна площа зовнішньої стіни, м²;

$U_{ц}$ – коефіцієнт опору теплопередачі;

t_{in} – розрахункова температура внутрішнього повітря в приміщенні;

t_{out} – розрахункова температура зовнішнього повітря (для Івано-Франківська приймається за найхолоднішою п'ятиденкою).

Визначивши поточну теплову потужність, переходимо до інтегрального оцінювання споживання енергії будинком та виконуємо розрахунок енерговитрат стіни за опалювальний сезон:

$$Q_{ц} = A_{ц} \cdot U_{ц} \cdot (t_{in} - t_{out}) \cdot 24 \cdot n = 905,033 \cdot 0,38 \cdot (20 - 0,4) \cdot 24 \cdot 200 = 32,01 \text{ (млн. кВт}\cdot\text{год)};$$

$Q_{ц}$ – сумарні витрати теплової енергії через стіну за опалювальний сезон;

$A_{ц}$ – розрахункова площа зовнішньої стіни;

$U_{ц}$ – коефіцієнт опору теплопередачі;

t_{in} – нормативна температура внутрішнього повітря в приміщенні;

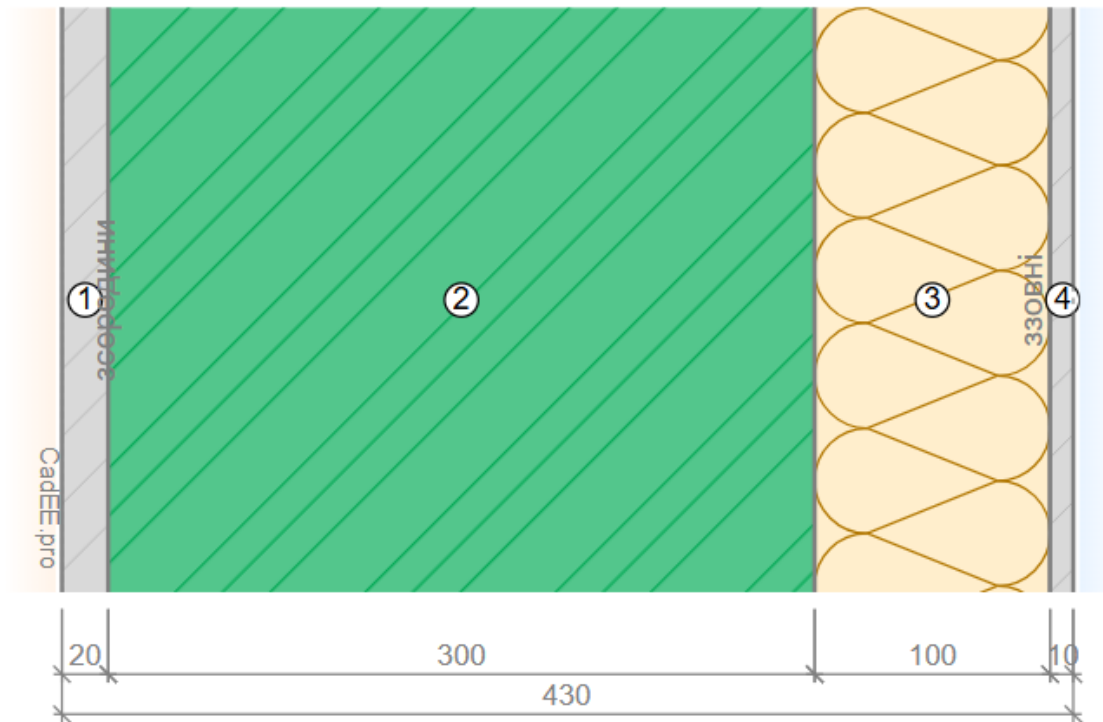
t_{out} – середня температура зовнішнього повітря за опалювальний;

n – тривалість опалювального сезону.

Отримані в результаті цього обчислення дані слугуватимуть базою для порівняльного аналізу з показниками стіни після влаштування теплоізоляційного шару. Це дозволить оцінити ефект від термомодернізації та перевірити відповідність оновленої конструкції чинним вимогам ДБН В.2.6-31:2021 щодо мінімально допустимого опору теплопередачі.

3.1.2 Оцінювання експлуатаційних та енергетичних показників будівельних конструкцій із застосуванням мінеральної вати

Перш за все проведемо наближені теоретичні розрахунки для оновленої конструкції стіни, яка забезпечуватиме мінімальне значення опору теплопередачі та представлена на рисунках 3.5-3.7.



1 – штукатурний шар, 2 – газоблок, 3 – мінераловатні плити, 4 – штукатурний шар.
Рисунок 3.5 – Будова стіни з мінераловатним утеплювачем

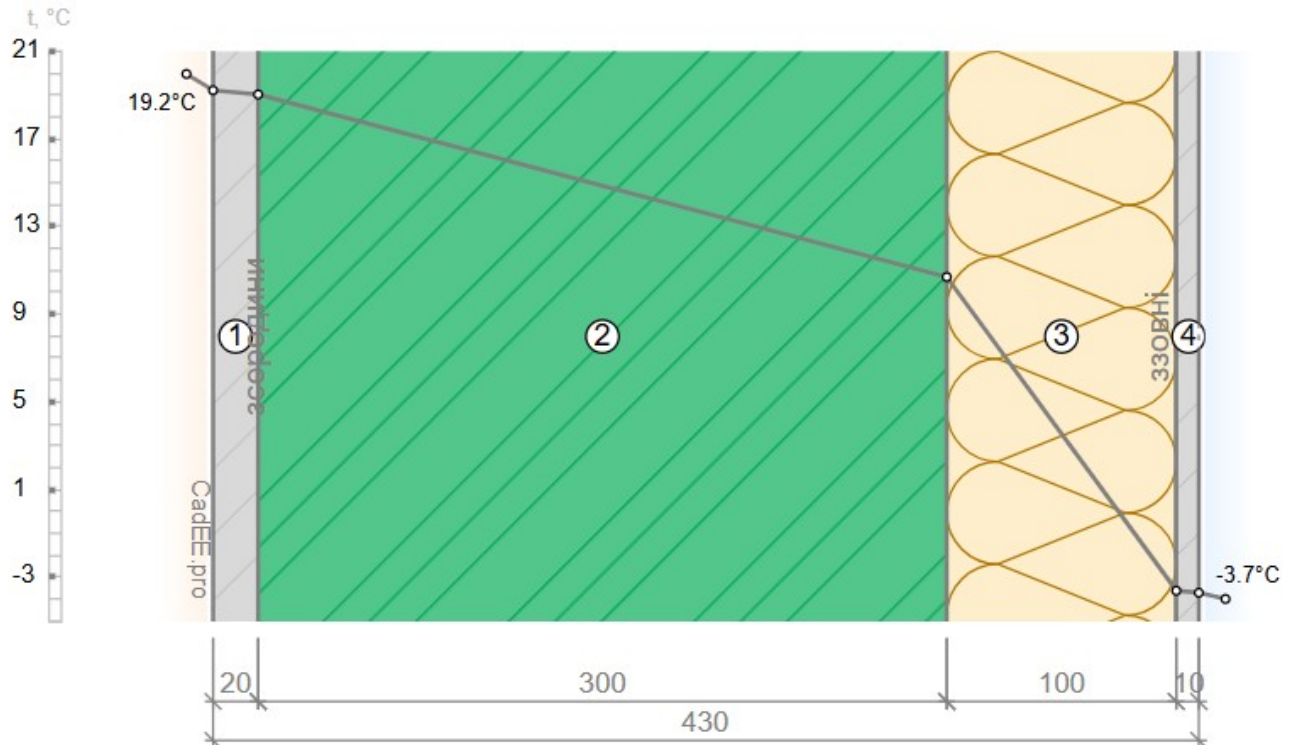


Рисунок 3.6 – Розподіл температури та зони зволоження для стін з мінераловатним утеплювачем

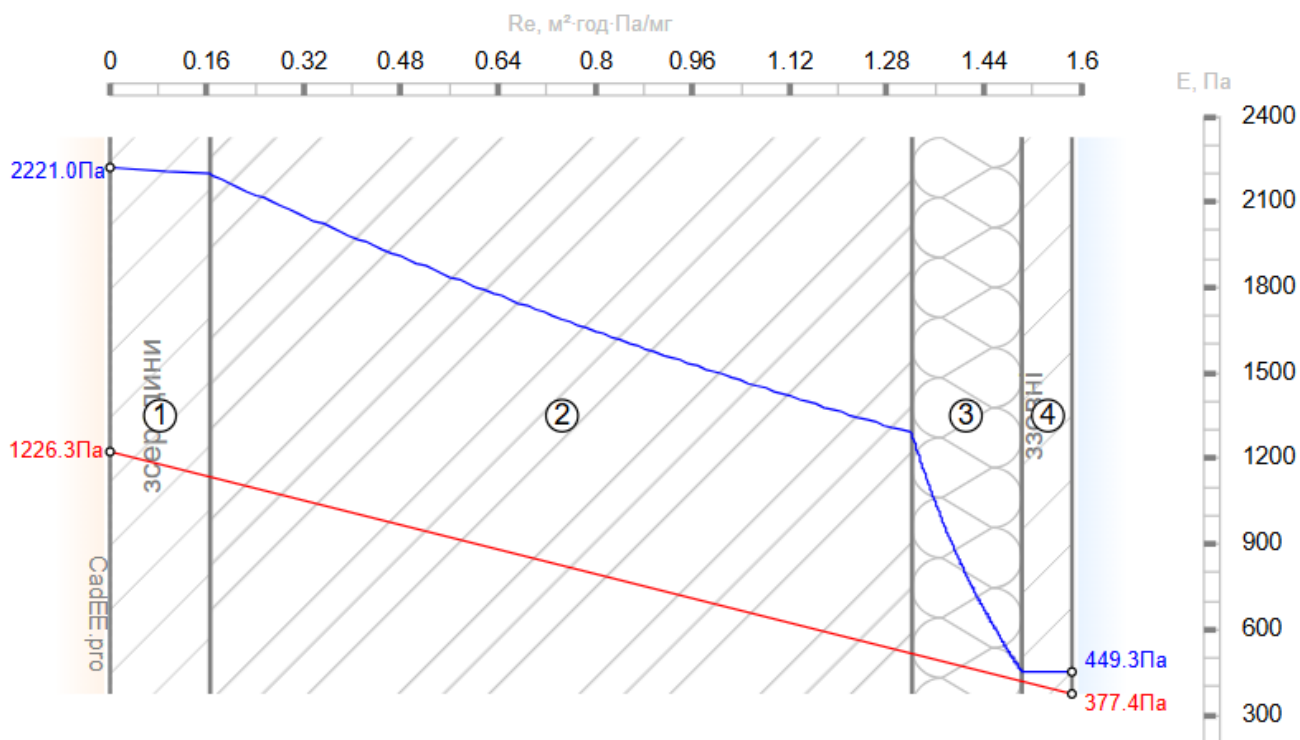


Рисунок 3.7 – Графік тиску водяної пари для стін з мінераловатним утеплювачем

Знаходимо мінімальну товщину шару мінераловатного утеплювача згідно з формулою:

$$d_i = \left(R_{\Sigma i} - \frac{1}{\alpha_3} - \sum_{i=1}^I \frac{d_i}{\lambda_i} - \frac{1}{\alpha_6} \right) \times \lambda_i = 4,0 - \frac{1}{23} - \frac{0,02}{0,76} - \frac{0,3}{0,2} - \frac{0,01}{0,7} - \frac{1}{8,7} \times 0,043 = 0,99 \text{ м}$$

$$R_{\Sigma i} - \text{нормативний опір теплопередачі, } R_{\min} = 4,0 \left(\frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}} \right);$$

α_6 – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, Вт/(м²·К), який згідно з нормативами для стін приймається рівним 8,7 Вт/(м²·К);

0,02 – товщина цементно-піщаної штукатурки, м;

0,3 – товщина газоблоку класу D500, м;

0,01 – товщина захисно-декоративного штукатурного шару, м;

0,76 – коефіцієнт теплопровідності цементно-піщаної штукатурки, Вт/м·К;

0,2 – коефіцієнт теплопровідності газоблоку класу D500, Вт/м·К;

0,043 – коефіцієнт теплопровідності мінеральної вати-утеплювача, Вт/м·К;

0,7 – коефіцієнт теплопровідності захисно-декоративного штукатурного шару, Вт/м·К;

a_3 – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, Вт/(м²·К), який для зовнішніх стін у зимовий період становить 23 Вт/(м²·К).

Таким чином, розрахункова мінімальна товщина мінераловатного теплоізоляційного шару становить 99 мм. Враховуючи комерційний асортимент сертифікованої продукції на ринку будівельних матеріалів України, до впровадження приймаємо стандартну товщину утеплювача 100 мм. На наступному етапі виконується перевірочний розрахунок для підтвердження того, що обраний матеріал прийнятої товщини гарантує забезпечення нормативного приведенного опору теплопередачі з урахуванням додаткових втрат теплоти через лінійні та точкові теплові містки.

$$R_{\Sigma i} = \frac{1}{U_{\Sigma i}} = \frac{1}{a_3} + \sum_{i=1}^I \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_B} = \frac{1}{23} + \frac{0,02}{0,76} + \frac{0,3}{0,2} + \frac{0,1}{0,043} + \frac{0,01}{0,7} + \frac{1}{8,7} = 4,02 \left(\frac{M^2 \cdot K}{Bm} \right)$$

$$R_{\Sigma i} - \text{опір теплопередачі стіни, } R_{\min} = 4,0 \left(\frac{M^2 \cdot K}{Bm} \right);$$

a_B – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, Вт/(м²·К), який згідно з нормативами для стін приймається рівним 8,7 Вт/(м²·К);

0,02 – товщина цементно-піщаної штукатурки, м;

0,3 – товщина газоблоку класу D500, м;

0,1 – товщина мінеральної вати-утеплювача, м;

0,01 – товщина захисно-декоративного штукатурного шару, м;

0,76 – коефіцієнт теплопровідності цементно-піщаної штукатурки, Вт/м·К;

0,2 – коефіцієнт теплопровідності газоблоку класу D500, Вт/м·К;

0,043 – коефіцієнт теплопровідності мінеральної вати-утеплювача, Вт/м·К;

0,7 – коефіцієнт теплопровідності захисно-декоративного штукатурного шару, Вт/м·К;

a_3 – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, Вт/(м²·К), який для зовнішніх стін у зимовий період становить 23 Вт/(м²·К).

Для подальших розрахунків необхідно буде знайти приведений опір теплопередачі, значення теплової потужності та провести розрахунок енерговитрат впродовж опалювального сезону. З цією метою робимо розрахунок коефіцієнту теплопередачі лінійних теплових містків:

$$K_{\Sigma kL} = \sum_{j=1}^J k_j L_j = 738,95 \cdot 0,032 \approx 23,65 \frac{Bm}{K}$$

$K_{\Sigma kL}$ – загальний коефіцієнт теплопередачі лінійних теплових містків;

k_j – лінійний коефіцієнт теплопередачі j -го теплового містка, Вт/м·К;

L_j – протяжність (довжина) відповідного теплового містка, м.

Далі проводимо розрахунок коефіцієнту, для врахування теплопередачі в точкових теплових містках, робимо припущення, що для 1 м² необхідно 4 кріплень із металевим осердям:

$$K_{\Sigma \Psi N} = \sum_{k=1}^K \Psi_k N_k = 0,005 \cdot 4 \cdot 905,033 \approx 18,1 \left(\frac{Bm}{K} \right)$$

$K_{\Sigma \Psi N}$ – коефіцієнт теплопередачі в точкових теплових містках;

N_k – кількість містків тепла;

Ψ_k – коефіцієнт теплопередачі в точці, Вт/К.

Проводимо розрахунок приведенного опору для теплопередачі будинкової стіни:

$$R_{\Sigma \square} = \frac{A_{\Sigma \square}}{\sum_{i=1}^I \frac{A_i}{R_{\Sigma i}} + \sum_{j=1}^J k_j L_j + \sum_{k=1}^K \Psi_k N_k} = \frac{905,033}{\frac{905,033}{4,02} + 23,65 + 18,1} = 3,39 \left(\frac{m^2 \cdot K}{Bm} \right)$$

R_{Σ} – приведений опір теплопередачі конструкції, $\left(\frac{m^2 \cdot K}{Bm} \right)$;;

A_{Σ} – повна площа поверхні огорожувальної конструкції, м²;

A_i – площа однорідної зони (елемента) поверхні, м²;

$R_{\Sigma i}$ – термічний опір теплопередачі окремого однорідного елемента, $\left(\frac{m^2 \cdot K}{Bm} \right)$;

Ψ_k – точковий коефіцієнт теплопередачі k -го теплового містка, Вт/К;

N_k – кількість однойменних точкових містків теплоти, шт.

Отримані результати теплотехнічного розрахунку свідчать, що попередньо обрана товщина теплоізоляційного шару є недостатньою для досягнення нормативного значення приведенного опору теплопередачі. З метою забезпечення відповідності конструкції вимогам енергоефективності, товщину мінераловатного утеплювача збільшено до 200 мм, після чого виконано повторний перевірочний розрахунок.

$$R_{\Sigma i} = \frac{1}{U_{\Sigma i}} = \frac{1}{a_3} + \sum_{i=1}^I \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_B} = \frac{1}{23} + \frac{0,02}{0,76} + \frac{0,3}{0,2} + \frac{0,2}{0,043} + \frac{0,01}{0,7} + \frac{1}{8,7} = i$$

$$i 6,35 \left(\frac{M^2 \cdot K}{Bm} \right)$$

$$R_{\Sigma i} - \text{опір теплопередачі стіни, } R_{\min} = 4,0 \left(\frac{M^2 \cdot K}{Bm} \right);$$

a_B – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, Вт/(м²·К), який згідно з нормативами для стін приймається рівним 8,7 Вт/(м²·К);

0,02 – товщина цементно-піщаної штукатурки, м;

0,3 – товщина газоблоку класу D500, м;

0,2 – товщина мінеральної вати-утеплювача, м;

0,01 – товщина захисно-декоративного штукатурного шару, м;

0,76 – коефіцієнт теплопровідності цементно-піщаної штукатурки, Вт/м·К;

0,2 – коефіцієнт теплопровідності газоблоку класу D500, Вт/м·К;

0,043 – коефіцієнт теплопровідності мінеральної вати-утеплювача, Вт/м·К;

0,7 – коефіцієнт теплопровідності захисно-декоративного штукатурного шару, Вт/м·К;

a_3 – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, Вт/(м²·К), який для зовнішніх стін у зимовий період становить 23 Вт/(м²·К).

Далі повторюємо розрахунок коефіцієнту, для врахування теплопередачі в точкових теплових містках, а оскільки товщина утеплювача була збільшена вдвічі, то, для 1 м² необхідно також вдвічі збільшити кількість кріплень із металевим осердям:

$$K_{\Sigma \Psi N} = \sum_{k=1}^K \Psi_k N_k = 0,005 \cdot 8 \cdot 905,033 = 36,2 \left(\frac{Bm}{K} \right)$$

Повторно розраховуємо приведений опір теплопередачі стіни будівлі:

$$R_{\Sigma \square} = \frac{A_{\Sigma \square}}{\sum_{i=1}^I \frac{A_i}{R_{\Sigma i}} + \sum_{j=1}^J k_j L_j + \sum_{k=1}^K \Psi_k N_k} = \frac{905,033}{\frac{905,033}{6,35} + 23,65 + 36,2} = 4,47$$

$$4,47 \left(\frac{m^2 \cdot K}{Bm} \right)$$

R_{Σ} – приведений опір теплопередачі конструкції, $\left(\frac{m^2 \cdot K}{Bm} \right)$;;

A_{Σ} – повна площа поверхні огорожувальної конструкції, m^2 ;

A_i – площа однорідної зони (елемента) поверхні, m^2 ;

$R_{\Sigma i}$ – термічний опір теплопередачі окремого однорідного елемента, $\left(\frac{m^2 \cdot K}{Bm} \right)$;

Ψ_k – точковий коефіцієнт теплопередачі k-го теплового містка, Вт/К;

N_k – кількість однойменних точкових містків теплоти, шт.

Таким чином, на основі результатів повторного теплотехнічного обчислення можна зробити висновок, що використання мінераловатного утеплювача товщиною 200 мм є цілком достатнім для забезпечення нормативного приведенного опору теплопередачі зовнішньої стіни.

Після остаточного визначення геометричних та теплофізичних параметрів огорожувальної конструкції, переходимо до розрахунку теплової потужності (трансмійних тепловтрат) стіни, облаштованої мінераловатною теплоізоляцією:

$$q_{\square} = A_{\square} \cdot U_{\square} \cdot (t_{in} - t_{out}) = 905,033 \cdot 0,22 \cdot (20 - 0,4) = 3968,337 \text{ (кВт)}$$

q_{\square} – тепла потужність (трансмійні тепловтрати) через огорожувальну конструкцію, Вт;

A_{\square} – загальна площа зовнішньої стіни, m^2 ;

U_{\square} – коефіцієнт опору теплопередачі;

t_{in} – розрахункова температура внутрішнього повітря в приміщенні;

t_{out} – розрахункова температура зовнішнього повітря (для Івано-Франківська приймається за найхолоднішою п'ятиденкою).

Визначивши поточну теплову потужність, переходимо до інтегрального оцінювання споживання енергії будинком та виконуємо розрахунок енерговитрат стіни за опалювальний сезон:

$$Q_{\text{ц}} = A_{\text{ц}} \cdot U_{\text{ц}} \cdot (t_{\text{in}} - t_{\text{out}}) \cdot 24 \cdot n = 905,033 \cdot 0,22 \cdot (20 - 0,4) \cdot 24 \cdot 200 = 19,048 \text{ (млн. кВт}\cdot\text{год)};$$

$Q_{\text{ц}}$ – сумарні витрати теплової енергії через стіну за опалювальний сезон;

$A_{\text{ц}}$ – розрахункова площа зовнішньої стіни;

$U_{\text{ц}}$ – коефіцієнт опору теплопередачі;

t_{in} – нормативна температура внутрішнього повітря в приміщенні;

t_{out} – середня температура зовнішнього повітря за опалювальний період (для Івано-Франківська);

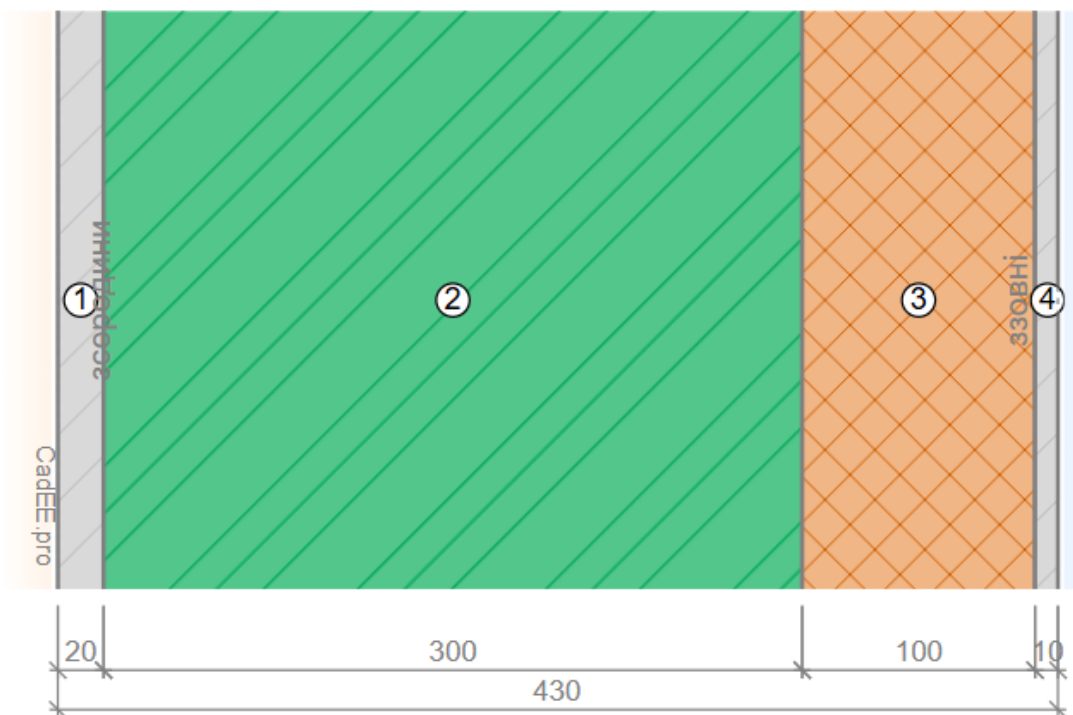
n – тривалість опалювального сезону.

3.1.3 Оцінювання експлуатаційних та енергетичних показників будівельних конструкцій із застосуванням графітового пінополістирольного теплоізоляційного шару

Тепер проведемо наближені теоретичні розрахунки для оновленої конструкції стіни, що матиме, як утеплювач графітовий пінополістирол, яка забезпечуватиме мінімальне значення опору теплопередачі та представлена на рисунках 3.8-3.10.

Знаходимо мінімальну товщину шару графітового пінополістирольного утеплювача згідно з формулою:

$$d_i = \left(R_{\Sigma i} - \frac{1}{\alpha_3} - \sum_{i=1}^I \frac{d_i}{\lambda_i} - \frac{1}{\alpha_6} \right) \times \lambda_i = i \left(4,0 - \frac{1}{23} - \frac{0,02}{0,76} - \frac{0,3}{0,2} - \frac{0,01}{0,7} - \frac{1}{8,7} \right) \times 0,031 = 0,071 \text{ м}$$



1 – штукатурний шар, 2 – газоблок, 3 – графітовий пінополістирольний утеплювач,
4 – штукатурний шар.

Рисунок 3.8 – Будова стіни з графітовим пінополістирольним утеплювачем

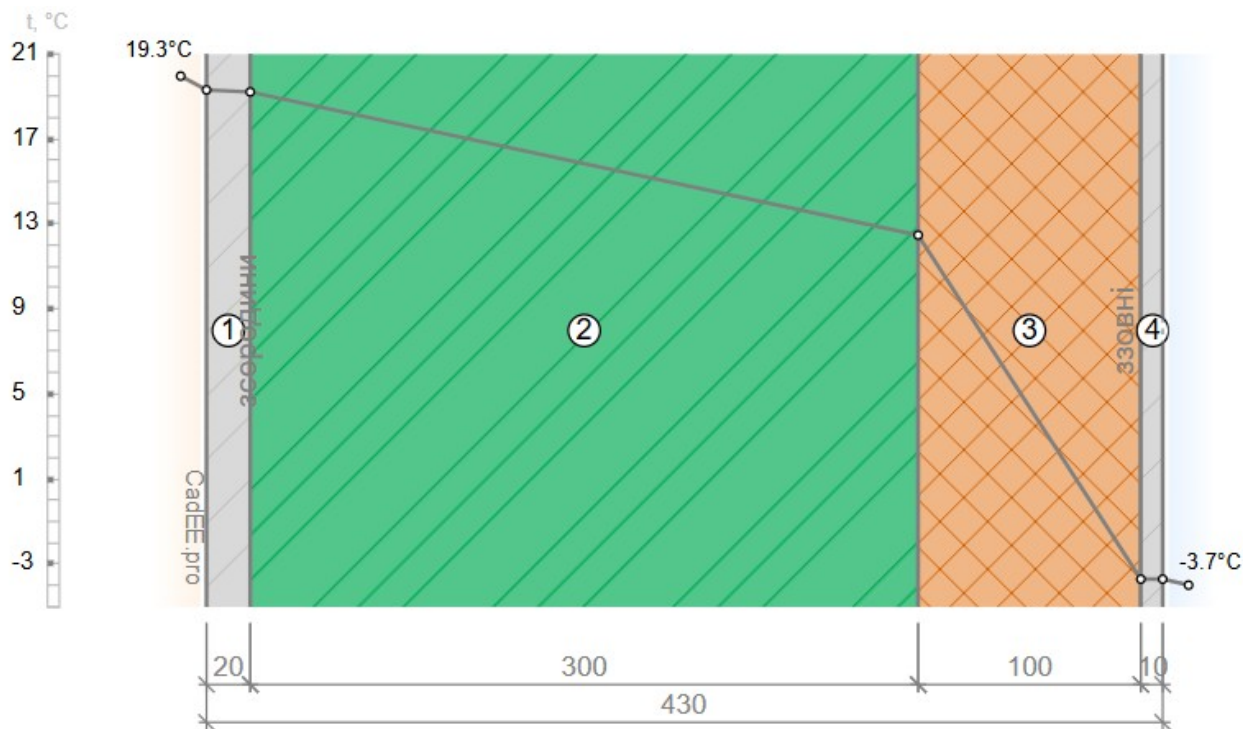


Рисунок 3.9 – Розподіл температури та зони зволоження для стін з графітовим пінополістирольним утеплювачем

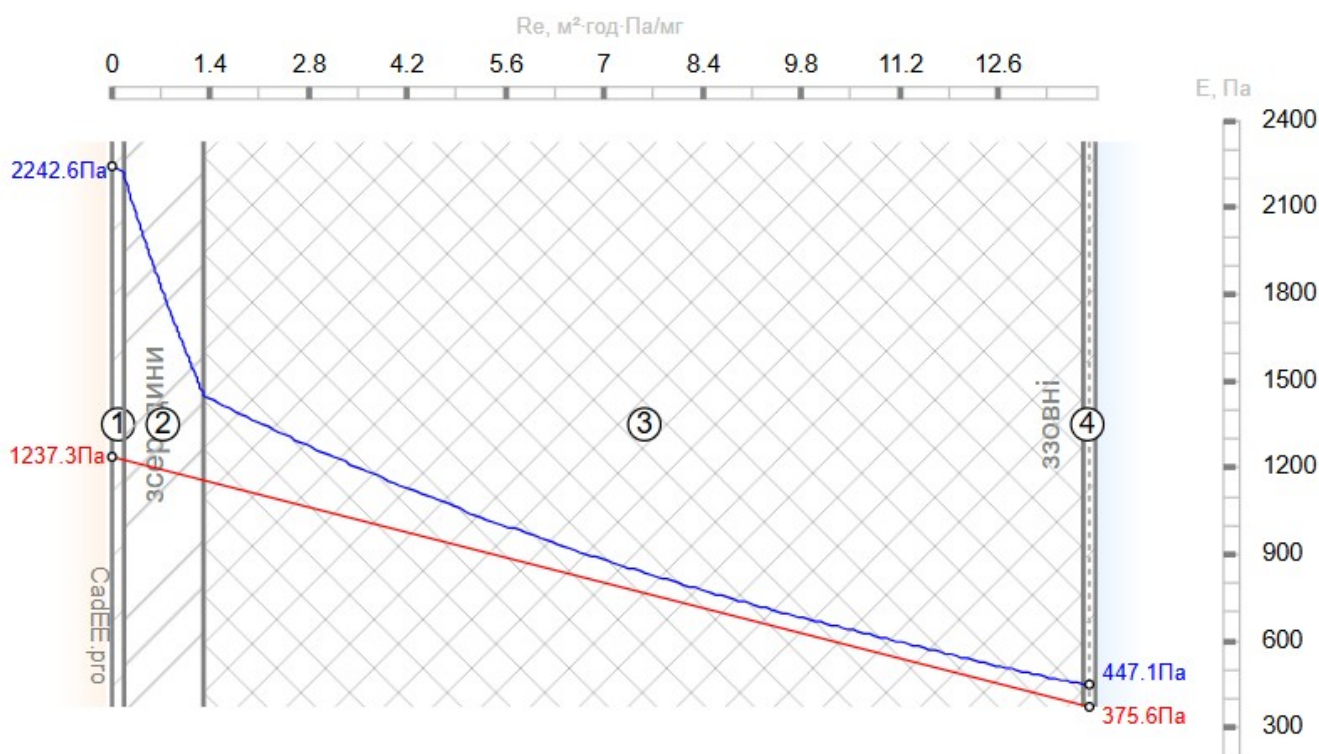


Рисунок 3.10 – Графік тиску водяної пари для стін з графітовим пінополістирольним утеплювачем

$$R_{\Sigma i} - \text{нормативний опір теплопередачі, } R_{\min} = 4,0 \left(\frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}} \right);$$

a_B – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, який згідно з нормативами для стін приймається рівним $8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

0,02 – товщина цементно-піщаної штукатурки, м;

0,3 – товщина газоблоку класу D500, м;

0,01 – товщина захисно-декоративного штукатурного шару, м;

0,76 – коефіцієнт теплопровідності цементно-піщаної штукатурки, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$;

0,2 – коефіцієнт теплопровідності газоблоку класу D500, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$;

0,031 – коефіцієнт теплопровідності графітового пінополістирольного утеплювача, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$;

0,7 – коефіцієнт теплопровідності захисно-декоративного штукатурного шару, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$;

a_3 – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, Вт/(м²·К), який для зовнішніх стін у зимовий період становить 23 Вт/(м²·К).

Таким чином, розрахункове мінімальне значення товщини пінополістирольного теплоізоляційного шару становить 71 мм. Враховуючи комерційний асортимент та типорозміри плитних утеплювачів, представлених на будівельному ринку України, до впровадження приймаємо стандартну товщину 100 мм. На наступному етапі виконується перевірочний розрахунок для підтвердження того, що обраний матеріал прийнятої товщини гарантує забезпечення нормативного приведенного опору теплопередачі з урахуванням додаткових втрат теплоти через наявні теплові містки.

$$R_{\Sigma i} = \frac{1}{U_{\Sigma i}} = \frac{1}{a_3} + \sum_{i=1}^I \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_B} = \frac{1}{23} + \frac{0,02}{0,76} + \frac{0,3}{0,2} + \frac{0,1}{0,031} + \frac{0,01}{0,7} + \frac{1}{8,7} = i$$

$$i 4,92 \left(\frac{M^2 \cdot K}{Bm} \right)$$

$$R_{\Sigma i} - \text{опір теплопередачі стіни, } R_{\min} = 4,0 \left(\frac{M^2 \cdot K}{Bm} \right);$$

a_B – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, Вт/(м²·К), який згідно з нормативами для стін приймається рівним 8,7 Вт/(м²·К);

0,02 – товщина цементно-піщаної штукатурки, м;

0,3 – товщина газоблоку класу D500, м;

0,1 – товщина графітового пінополістирольного утеплювача, м;

0,01 – товщина захисно-декоративного штукатурного шару, м;

0,76 – коефіцієнт теплопровідності цементно-піщаної штукатурки, Вт/м·К;

0,2 – коефіцієнт теплопровідності газоблоку класу D500, Вт/м·К;

0,031 – коефіцієнт теплопровідності графітового пінополістирольного утеплювача, Вт/м·К;

0,7 – коефіцієнт теплопровідності захисно-декоративного штукатурного шару, Вт/м·К;

a_3 – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, Вт/(м²·К), який для зовнішніх стін у зимовий період становить 23 Вт/(м²·К).

Для виконання подальших теплотехнічних та енергетичних обчислень – зокрема, визначення приведенного опору теплопередачі, розрахунку теплової потужності (трансмісійних втрат) та прогнозування сезонних енерговитрат будівлі – необхідно кількісно оцінити вплив локальних теплопровідних включень.

З цією метою виконується розрахунок точкових коефіцієнтів теплопередачі. Для цього приймається конструктивне припущення, що для надійної фіксації теплоізоляційного шару на кожен 1 м² площі поверхні зовнішньої стіни припадає 4 елементи кріплення (тарілчасті дюбелі) з металевим розпірним осердям:

$$K_{\sum \Psi_N} = \sum_{k=1}^K \Psi_k N_k = 0,005 \cdot 4 \cdot 905,033 = 18,1 \left(\frac{Bm}{K} \right)$$

$K_{\sum \Psi_N}$ – коефіцієнт теплопередачі в точкових теплових містках;

N_k – кількість містків тепла;

Ψ_k – коефіцієнт теплопередачі в точці, Вт/К.

Робимо розрахунок приведенного опору теплопередачі стіни:

$$R_{\sum \square} = \frac{A_{\sum \square}}{\sum_{i=1}^I \frac{A_i}{R_{\Sigma i}} + \sum_{j=1}^J k_j L_j + \sum_{k=1}^K \Psi_k N_k} = \frac{905,033}{\frac{905,033}{4,92} + 23,65 + 18,1} = 4,01$$

$$4,01 \left(\frac{M^2 \cdot K}{Bm} \right)$$

R_{Σ} – приведений опір теплопередачі конструкції, $\left(\frac{M^2 \cdot K}{Bm} \right)$;;

A_{Σ} – повна площа поверхні огорожувальної конструкції, м²;

A_i – площа однорідної зони (елемента) поверхні, м²;

$R_{\Sigma i}$ – термічний опір теплопередачі окремого однорідного елемента, $\left(\frac{M^2 \cdot K}{Bm} \right)$;

Ψ_k – точковий коефіцієнт теплопередачі k-го теплового містка, Вт/К;

N_k – кількість однойменних точкових містків теплоти, шт.

Таким чином, як показують розрахунки цієї товщини заледве достатньо є для забезпечення необхідного значення приведенного опору теплопередачі конструкції, тому єдиним варіантом залишається збільшення товщини утеплювача до 150 мм і повторно проводимо розрахунки.

$$R_{\Sigma i} = \frac{1}{U_{\Sigma i}} = \frac{1}{a_3} + \sum_{i=1}^I \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_B} = \frac{1}{23} + \frac{0,02}{0,76} + \frac{0,3}{0,2} + \frac{0,15}{0,031} + \frac{0,01}{0,7} + \frac{1}{8,7} = 6,54 \left(\frac{M^2 \cdot K}{Bm} \right)$$

$$R_{\Sigma i} - \text{опір теплопередачі стіни, } R_{\min} = 4,0 \left(\frac{M^2 \cdot K}{Bm} \right);$$

a_B – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, Вт/(м²·К), який згідно з нормативами для стін приймається рівним 8,7 Вт/(м²·К);

0,02 – товщина цементно-піщаної штукатурки, м;

0,3 – товщина газоблоку класу D500, м;

0,1 – товщина графітового пінополістирольного утеплювача, м;

0,01 – товщина захисно-декоративного штукатурного шару, м;

0,76 – коефіцієнт теплопровідності цементно-піщаної штукатурки, Вт/м·К;

0,2 – коефіцієнт теплопровідності газоблоку класу D500, Вт/м·К;

0,031 – коефіцієнт теплопровідності графітового пінополістирольного утеплювача, Вт/м·К;

0,7 – коефіцієнт теплопровідності захисно-декоративного штукатурного шару, Вт/м·К;

a_3 – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, Вт/(м²·К), який для зовнішніх стін у зимовий період становить 23 Вт/(м²·К).

Повторно розраховуємо приведенний опір теплопередачі стіни:

$$R_{\Sigma \square} = \frac{A_{\Sigma \square}}{\sum_{i=1}^I \frac{A_i}{R_{\Sigma i}} + \sum_{j=1}^J k_j L_j + \sum_{k=1}^K \Psi_k N_k} = \frac{905,033}{\frac{905,033}{6,54} + 23,65 + 36,2} = 4,56 \left(\frac{M^2 \cdot K}{Bm} \right)$$

$$4,56 \left(\frac{M^2 \cdot K}{Bm} \right)$$

$$R_{\Sigma} - \text{приведений опір теплопередачі конструкції, } \left(\frac{M^2 \cdot K}{Bm} \right);;$$

A_{Σ} – повна площа поверхні огороджувальної конструкції, м²;

A_i – площа однорідної зони (елемента) поверхні, м²;

$R_{\Sigma i}$ – термічний опір теплопередачі окремого однорідного елемента, $\left(\frac{m^2 \cdot K}{Wm}\right)$;

Ψ_k – точковий коефіцієнт теплопередачі k-го теплового містка, Вт/К;

N_k – кількість однойменних точкових містків теплоти, шт.

Отже, робимо висновок, що для забезпечення необхідного опору теплопередачі достатнім буде утеплювач із графітового пінополістиролу товщиною 150 мм.

Робимо розрахунок теплової потужності стіни з теплоізоляцією із графітового пінополістиролу:

$$q_{ц} = A_{ц} \cdot U_{ц} \cdot (t_{in} - t_{out}) = 905,033 \cdot 0,22 \cdot (20 - 0,4) = 3890,054 \text{ (кВт)}$$

$q_{ц}$ – тепла потужність (трансмійні тепловтрати) через огорожувальну конструкцію, Вт;

$A_{ц}$ – загальна площа зовнішньої стіни, м²;

$U_{ц}$ – коефіцієнт опору теплопередачі;

t_{in} – розрахункова температура внутрішнього повітря в приміщенні;

t_{out} – розрахункова температура зовнішнього повітря (для Івано-Франківська приймається за найхолоднішою п'ятиденкою).

Робимо розрахунок енерговитрат стіни з теплоізоляцією із графітового пінополістиролу:

$$Q_{ц} = A_{ц} \cdot U_{ц} \cdot (t_{in} - t_{out}) \cdot 24 \cdot n = 6539,35 \cdot 0,22 \cdot (20 - 0,4) \cdot 24 \cdot 200 = 18,672 \text{ (млн. кВт·год)};$$

$Q_{ц}$ – сумарні витрати теплової енергії через стіну за опалювальний сезон;

$A_{ц}$ – розрахункова площа зовнішньої стіни;

$U_{ц}$ – коефіцієнт опору теплопередачі;

t_{in} – нормативна температура внутрішнього повітря в приміщенні;

t_{out} – середня температура зовнішнього повітря за опалювальний період (для Івано-Франківська);

n – тривалість опалювального сезону.

3.1.4 Оцінювання експлуатаційних та енергетичних показників будівельних конструкцій із застосуванням екструдованого пінополістирольного теплоізоляційного шару

Тепер проведемо наближені теоретичні розрахунки для оновленої конструкції стіни, яка забезпечуватиме мінімальне значення опору теплопередачі та представлена на рисунках 3.11-3.13.

Знаходимо мінімальну товщину шару утеплювача з екструдованого пінополістиролу згідно з формулою:

$$d_i = \left(R_{\Sigma i} - \frac{1}{\alpha_3} - \sum_{i=1}^I \frac{d_i}{\lambda_i} - \frac{1}{\alpha_6} \right) \times \lambda_i = 0,034 = 0,08 \text{ м}$$

$$R_{\Sigma i} - \text{нормативний опір теплопередачі, } R_{\min} = 4,0 \left(\frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}} \right);$$

a_B – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, Вт/(м²·К), який згідно з нормативами для стін приймається рівним 8,7 Вт/(м²·К);

0,02 – товщина цементно-піщаної штукатурки, м;

0,3 – товщина газоблоку класу D500, м;

0,01 – товщина захисно-декоративного штукатурного шару, м;

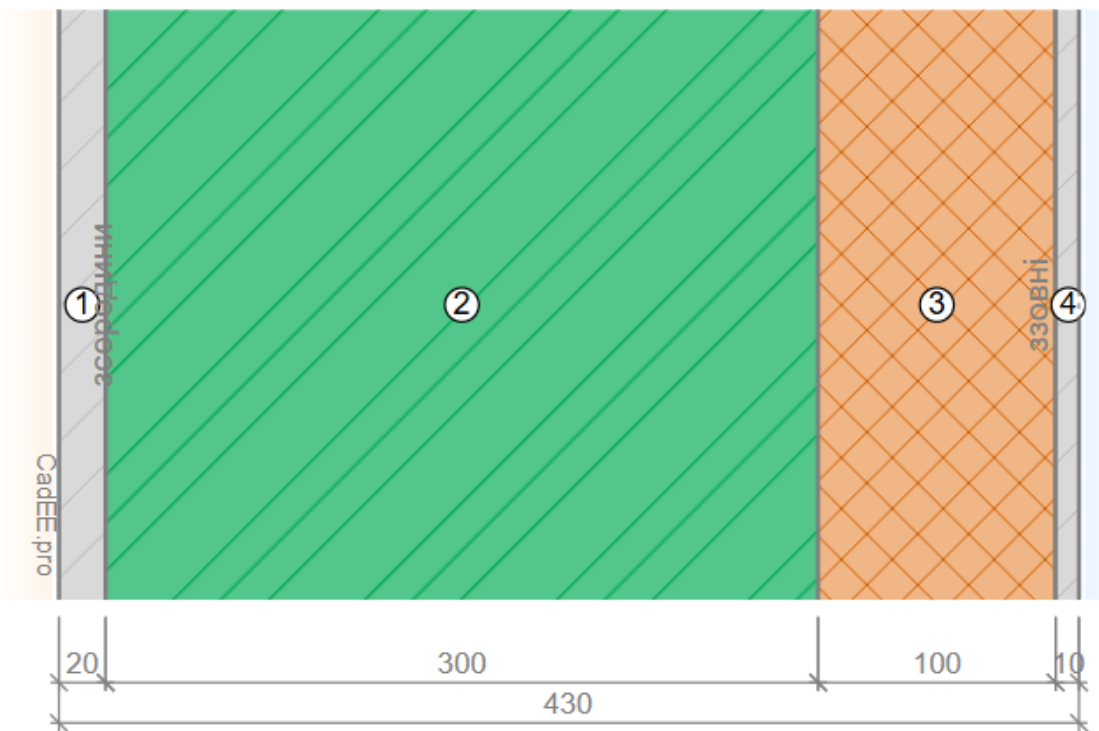
0,76 – коефіцієнт теплопровідності цементно-піщаної штукатурки, Вт/м·К;

0,2 – коефіцієнт теплопровідності газоблоку класу D500, Вт/м·К;

0,035 – коефіцієнт теплопровідності утеплювача з екструдованого пінополістиролу, Вт/м·К;

0,7 – коефіцієнт теплопровідності захисно-декоративного штукатурного шару, Вт/м·К;

a_3 – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, Вт/(м²·К), який для зовнішніх стін у зимовий період становить 23 Вт/(м²·К).



1 – штукатурний шар, 2 – газоблок, 3 – утеплювач із екструдованого пінополістиролу,
4 – штукатурний шар.

Рисунок 3.11 – Будова стіни з утеплювачем із екструдованого пінополістиролу

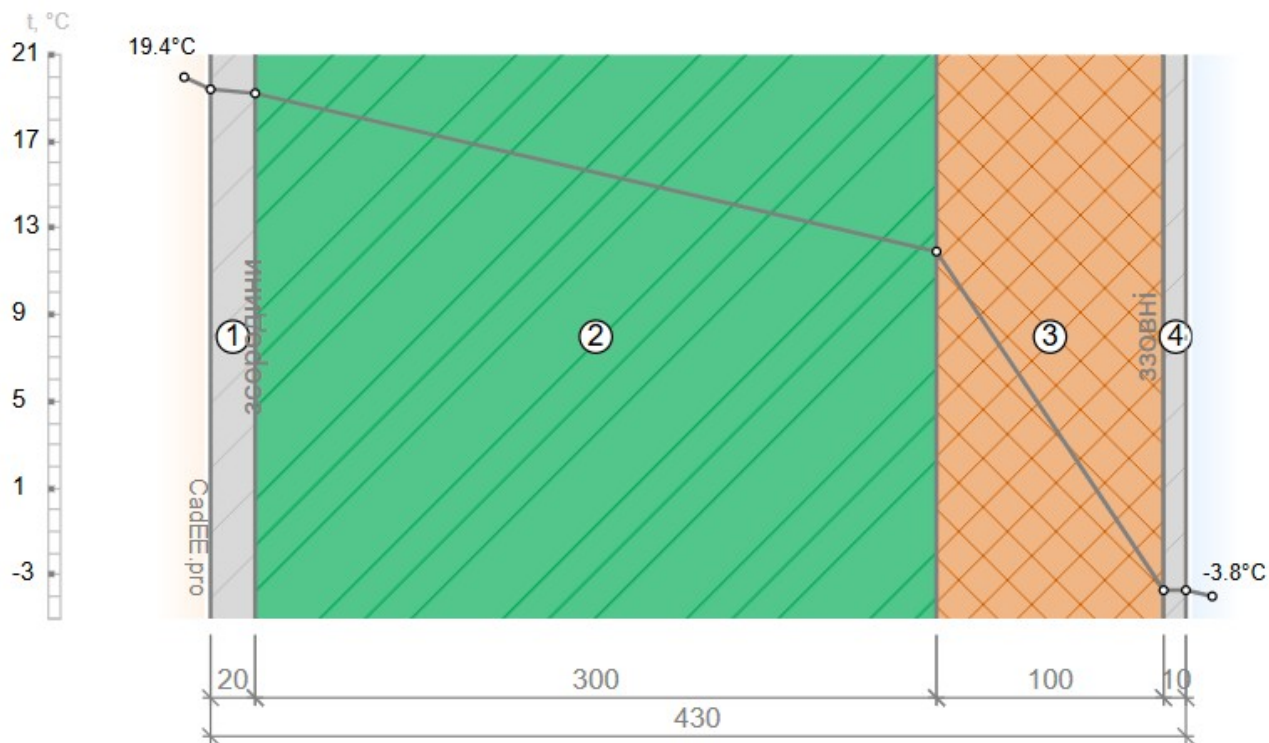


Рисунок 3.12 – Розподіл температури та зони зволоження для стін з утеплювачем із екструдованого пінополістиролу

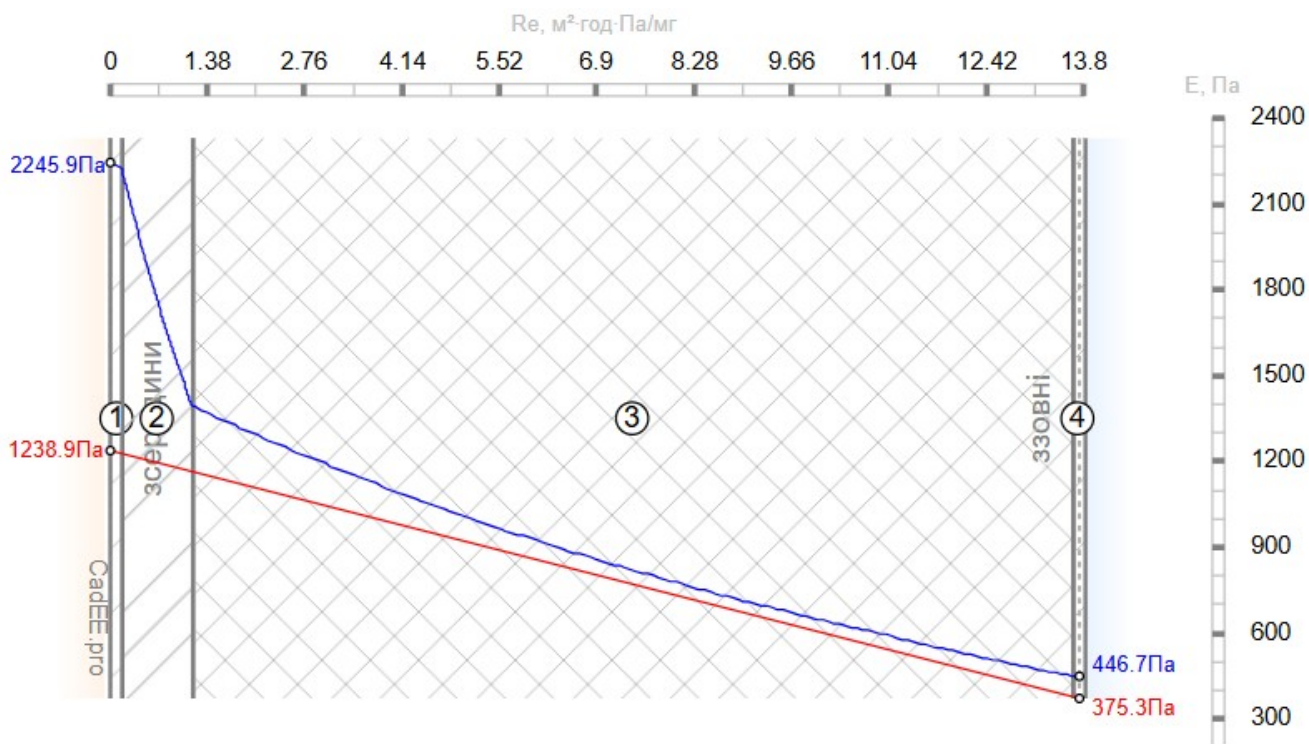


Рисунок 3.13 – Графік тиску водяної пари для стін з утеплювачем із екструдованого пінополістиролу

Таким чином, розрахункове мінімальне значення товщини теплоізоляційного шару становить 80 мм. Враховуючи наявний асортимент та типорозміри будівельних утеплювачів на ринку України, до впровадження приймаємо стандартну конструктивну товщину 100 мм. На наступному етапі виконується перевірочний розрахунок для підтвердження того, що обраний матеріал прийнятої товщини гарантує забезпечення нормативного приведенного опору теплопередачі з урахуванням додаткових втрат теплоти через наявні теплові містки.

$$R_{\Sigma i} = \frac{1}{U_{\Sigma i}} = \frac{1}{a_3} + \sum_{i=1}^I \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_B} = \frac{1}{23} + \frac{0,02}{0,76} + \frac{0,3}{0,2} + \frac{0,1}{0,035} + \frac{0,01}{0,7} + \frac{1}{8,7} = 4,56 \left(\frac{m^2 \cdot K}{Bm} \right)$$

$R_{\Sigma i}$ – опір теплопередачі стіни, $R_{\min} = 4,0 \left(\frac{m^2 \cdot K}{Bm} \right)$; a_B – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, $Вт/(m^2 \cdot K)$, який згідно з нормативами для стін приймається рівним $8,7 \text{ Вт}/(m^2 \cdot K)$; $0,02$ – товщина цементно-піщаної штукатурки,

м; 0,3 – товщина газоблоку класу D500, м; 0,1 – товщина утеплювача з екструдованого пінополістиролу, м; 0,01 – товщина захисно-декоративного штукатурного шару, м; 0,76 – коефіцієнт теплопровідності цементно-піщаної штукатурки, Вт/м·К; 0,2 – коефіцієнт теплопровідності газоблоку класу D500, Вт/м·К; 0,031 – коефіцієнт теплопровідності утеплювача з екструдованого пінополістиролу, Вт/м·К; 0,7 – коефіцієнт теплопровідності захисно-декоративного штукатурного шару, Вт/м·К; a_3 – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, Вт/(м²·К), який для зовнішніх стін у зимовий період становить 23 Вт/(м²·К).

Для подальших розрахунків необхідно буде знайти приведений опір теплопередачі, значення теплової потужності та провести розрахунок енерговитрат впродовж опалювального сезону. З цією метою робимо розрахунок коефіцієнту теплопередачі лінійних теплових містків.

Для врахування додаткових втрат теплоти через точкові теплові містки проводиться розрахунок відповідних точкових коефіцієнтів теплопередачі. При цьому приймається конструктивне припущення, що для надійної фіксації теплоізоляційного шару використовується 4 тарілчасті дюбелі з металевим розпірним осердям на 1 м² площі поверхні зовнішньої стіни:

$$K_{\sum \Psi_N} = \sum_{k=1}^K \Psi_k N_k = 0,005 \cdot 4 \cdot 905,033 = 18,1 \left(\frac{Bm}{K} \right)$$

$K_{\sum \Psi_N}$ – коефіцієнт теплопередачі в точкових теплових містках; N_k – кількість містків тепла; Ψ_k – коефіцієнт теплопередачі в точці, Вт/К.

Робимо розрахунок приведенного опору теплопередачі стіни:

$$R_{\sum \square} = \frac{A_{\sum \square}}{\sum_{i=1}^I \frac{A_i}{R_{\sum i}} + \sum_{j=1}^J k_j L_j + \sum_{k=1}^K \Psi_k N_k} = \frac{905,033}{\frac{905,033}{4,56} + 23,65 + 18,1}$$

$$= 3,77 \left(\frac{M^2 \cdot K}{Bm} \right)$$

R_{\sum} – приведений опір теплопередачі конструкції, $\left(\frac{M^2 \cdot K}{Bm} \right)$;;

A_{Σ} – повна площа поверхні огорожувальної конструкції, м²;

A_i – площа однорідної зони (елемента) поверхні, м²;

$R_{\Sigma i}$ – термічний опір теплопередачі окремого однорідного елемента, $\left(\frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}\right)$;

Ψ_k – точковий коефіцієнт теплопередачі k-го теплового містка, Вт/К;

N_k – кількість однойменних точкових містків теплоти, шт.

Результати теплотехнічного обчислення свідчать, що попередньо прийнята товщина теплоізоляційного шару є недостатньою для досягнення нормативного значення опору теплопередачі. З метою забезпечення відповідності конструкції чинним вимогам енергоефективності, товщину утеплювача збільшено до 140 мм, після чого виконується повторний розрахунок.

$$R_{\Sigma i} = \frac{1}{U_{\Sigma i}} = \frac{1}{a_3} + \sum_{i=1}^I \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_B} = \frac{1}{23} + \frac{0,02}{0,76} + \frac{0,3}{0,2} + \frac{0,14}{0,035} + \frac{0,01}{0,7} + \frac{1}{8,7} = \dot{i}$$

$$\dot{i} 5,7 \left(\frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}\right)$$

$R_{\Sigma i}$ – опір теплопередачі стіни, $R_{\min} = 4,0 \left(\frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}\right)$;

a_B – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, Вт/(м²·К), який згідно з нормативами для стін приймається рівним 8,7 Вт/(м²·К);

0,02 – товщина цементно-піщаної штукатурки, м;

0,3 – товщина газоблоку класу D500, м;

0,13 – товщина утеплювача з екструдованого пінополістиролу, м;

0,01 – товщина захисно-декоративного штукатурного шару, м;

0,76 – коефіцієнт теплопровідності цементно-піщаної штукатурки, Вт/м·К;

0,2 – коефіцієнт теплопровідності газоблоку класу D500, Вт/м·К;

0,035 – коефіцієнт теплопровідності утеплювача з екструдованого пінополістиролу, Вт/м·К;

0,7 – коефіцієнт теплопровідності захисно-декоративного штукатурного шару, Вт/м·К;

a_3 – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні конструкції, Вт/(м²·К), який для зовнішніх стін у зимовий період становить 23 Вт/(м²·К).

Наступним кроком є визначення точкових коефіцієнтів теплопередачі для обчислення додаткових втрат теплоти через елементи кріплення. Оскільки товщина (і, відповідно, маса) термоізоляційного шару суттєво зростає, для забезпечення надійної механічної фіксації приймається конструктивне припущення про використання 8 тарілчастих дюбелів із металевим розпірним осердям на 1 м² площі поверхні зовнішньої стіни.

З урахуванням оновлених геометричних та конструктивних параметрів виконується розрахунок приведенного опору теплопередачі зовнішньої стіни:

$$R_{\Sigma \square} = \frac{A_{\Sigma \square}}{\sum_{i=1}^I \frac{A_i}{R_{\Sigma i}} + \sum_{j=1}^J k_j L_j + \sum_{k=1}^K \Psi_k N_k} = \frac{905,033}{\frac{905,033}{5,7} + 23,65 + 36,2} = 4,14 \left(\frac{M^2 \cdot K}{Bm} \right)$$

R_{Σ} – приведений опір теплопередачі конструкції, $\left(\frac{M^2 \cdot K}{Bm} \right)$;;

A_{Σ} – повна площа поверхні огорожувальної конструкції, м²;

A_i – площа однорідної зони (елемента) поверхні, м²;

$R_{\Sigma i}$ – термічний опір теплопередачі окремого однорідного елемента, $\left(\frac{M^2 \cdot K}{Bm} \right)$;

Ψ_k – точковий коефіцієнт теплопередачі k-го теплового містка, Вт/К;

N_k – кількість однойменних точкових містків теплоти, шт.

Таким чином, на основі проведених теплотехнічних обчислень можна зробити висновок, що використання екструдованого пінополістиролу товщиною 140 мм є цілком достатнім для забезпечення нормативного приведенного опору теплопередачі зовнішньої стіни відповідно до чинних вимог.

Після остаточного узгодження товщини термоізоляційного шару виконується розрахунок теплової потужності (трансмісійних тепловтрат) для зовнішньої стіни, утепленої екструдованим пінополістиролом:

$$q_{\square} = A_{\square} \cdot U_{\square} \cdot (t_{in} - t_{out}) = 905,033 \cdot 0,24 \cdot (20 - 0,4) = 4257,275 \text{ (кВт)}$$

$q_{ц}$ – теплова потужність (трансмісійні тепловтрати) через огорожувальну конструкцію, Вт;

$A_{ц}$ – загальна площа зовнішньої стіни, м²;

$U_{ц}$ – коефіцієнт опору теплопередачі;

t_{in} – розрахункова температура внутрішнього повітря в приміщенні;

t_{out} – розрахункова температура зовнішнього повітря (для Івано-Франківська приймається за найхолоднішою п'ятиденкою).

На основі визначеної теплової потужності проводиться розрахунок сезонних енерговитрат через утеплену огорожувальну конструкцію за весь опалювальний період:

$$Q_{ц} = A_{ц} \cdot U_{ц} \cdot (t_{in} - t_{out}) \cdot 24 \cdot n = 905,033 \cdot 0,24 \cdot (20 - 0,4) \cdot 24 \cdot 200 = 20,435 \text{ (млн. кВт}\cdot\text{год)};$$

$Q_{ц}$ – сумарні витрати теплової енергії через стіну за опалювальний сезон;

$A_{ц}$ – розрахункова площа зовнішньої стіни;

$U_{ц}$ – коефіцієнт опору теплопередачі;

t_{in} – нормативна температура внутрішнього повітря в приміщенні;

t_{out} – середня температура зовнішнього повітря за опалювальний період;

n – тривалість опалювального сезону.

3.2 Аналіз результатів досліджень

На основі проведених комплексних досліджень та перевірочних обчислень встановлено оптимальні параметри теплоізоляційного шару для забезпечення нормативного приведенного опору теплопередачі зовнішньої стіни:

Мінераловатний утеплювач: необхідна товщина термоізоляційного шару для досягнення нормативних показників становить 200 мм (рис. 3.14).

Графітовий пінополістирол: завдяки нижчому коефіцієнту теплопровідності матеріалу, достатньою є товщина 150 мм (див. рис. 3.15).

Екструдований пінополістирол: дозволяє зменшити товщину теплоізолятора до 140 мм (рис. 3.16).

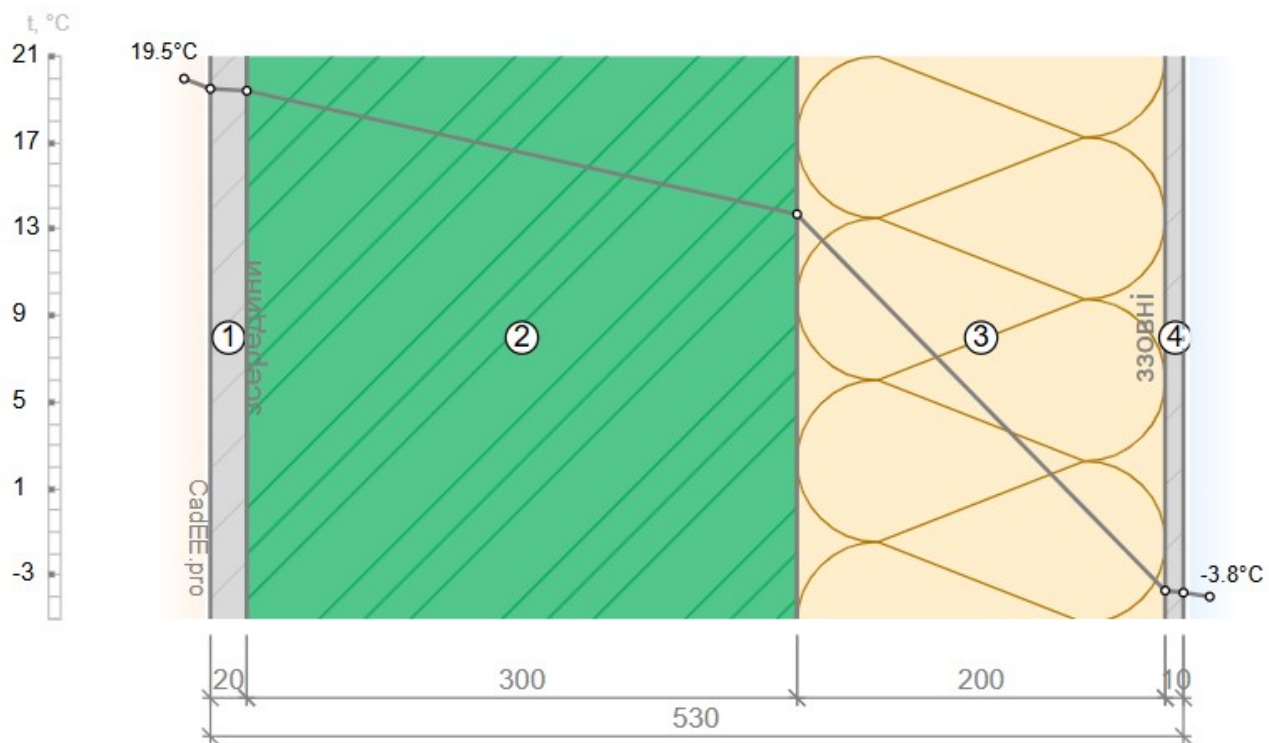


Рисунок 3.14 – Конструкція стіни з мінераловатним утеплювачем та розподіл температури

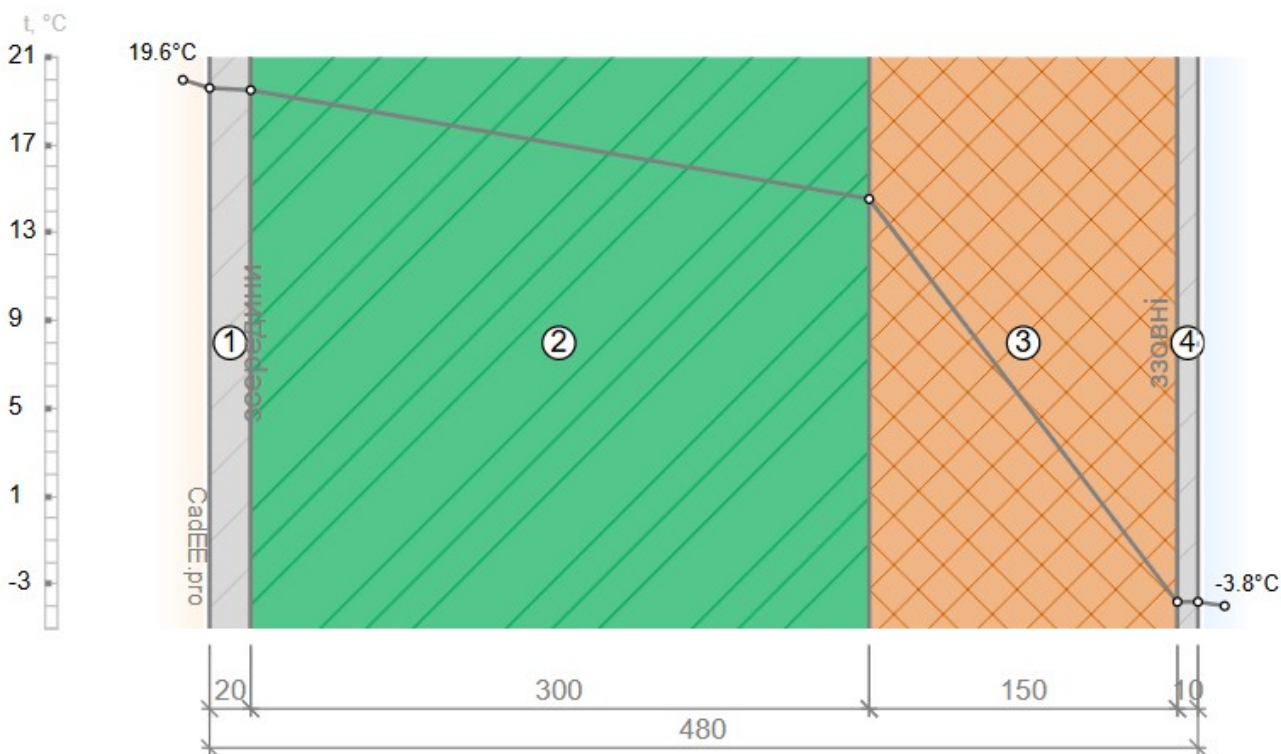


Рисунок 3.15 – Конструкція стіни з графітовим пінополістирольним утеплювачем та розподіл температури

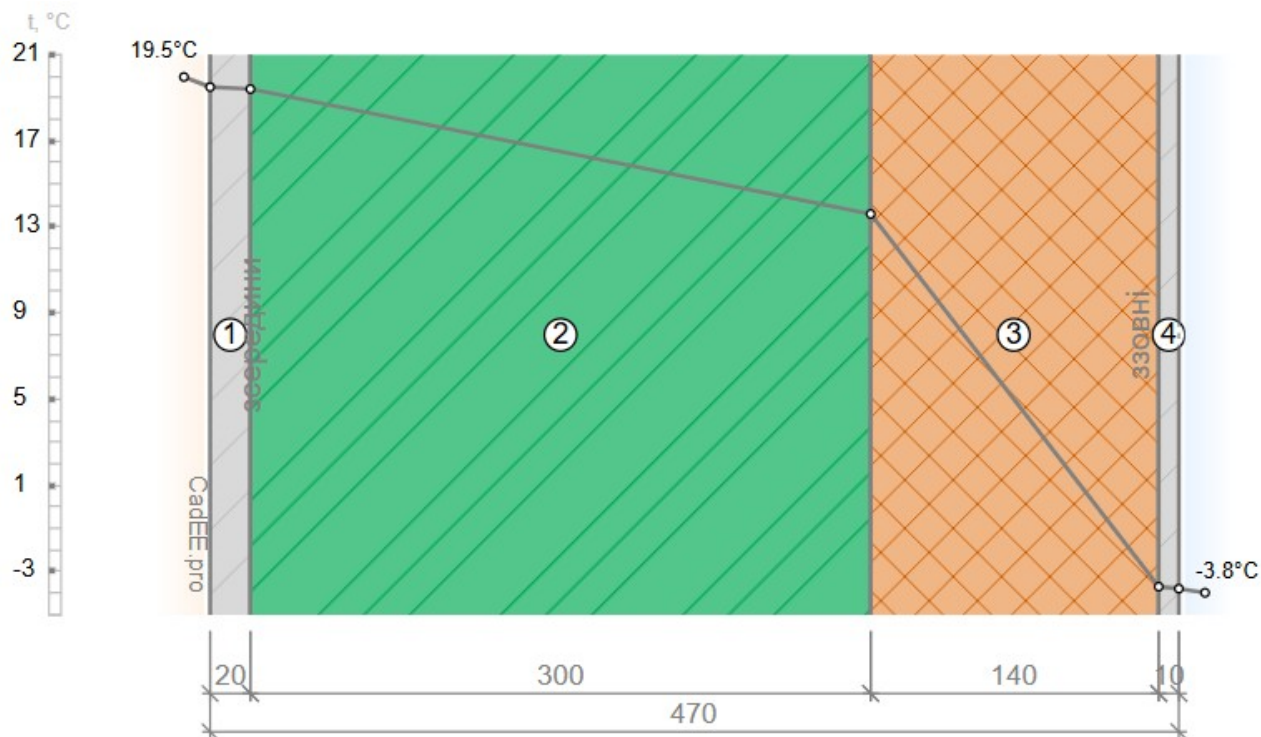


Рисунок 3.16 – Конструкція стіни з утеплювачем із екструдованого пінополістиролу та розподіл температури

Найбільшу ефективність демонструє графітовий пінополістирол товщиною 150 мм, який дозволяє знизити як пікові, так і сезонні втрати тепла майже на 42% (рис. 3.17).



Рисунок 3.17 – Енергозбереження у % сумарних витрат теплової енергії через стіну за опалювальний сезон

Мінеральна вата (200 мм) йде практично нарівні з ним, забезпечуючи 40,5% економії та додатково покращуючи пожежну безпеку конструкції. Екструдований пінополістирол (140 мм) демонструє трохи меншу, але все одно високу ефективність у 36% енергозбереження.

Отже оптимальним з точки зору енергозбереження та витрат на термомодернізацію є графітовий пінополістирол.

3.3 Висновки за результатами дослідження

Проведені дослідження дозволили ідентифікувати ключові проблеми термомодернізації об'єкта. Встановлено, що будинок характеризується понаднормативними втратами теплової енергії та низьким опором теплопередачі стін, що безпосередньо впливає на технічний стан фасаду та призводить до його руйнування.

На основі проведеного комплексу досліджень визначено найбільш ефективний термоізоляційний матеріал, впровадження якого гарантує досягнення нормативних показників приведенного опору теплопередачі. Встановлено, що реалізація запропонованих заходів із термомодернізації дозволяє знизити пікову теплову потужність огорожувальної конструкції та скоротити сезонні енерговитрати на 36–42 % від початкового рівня.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці

4.1.1 Законодавча та нормативна база України з охорони праці

Законодавча та нормативна база України у сфері охорони праці [37-40] ґрунтується насамперед на положеннях Конституції України, яка закріплює право людини на працю, на відпочинок і на соціальний захист [41]. Конституційні норми формують загальний правовий принцип: держава зобов'язана створювати умови для реалізації трудових прав, а праця не може здійснюватися за рахунок погіршення безпеки, здоров'я чи соціальних гарантій працівника.

Базовим спеціальним актом у цій сфері є Закон України «Про охорону праці», який прямо визначає, що законодавство про охорону праці складається з цього Закону, Кодексу законів про працю України, Закону України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування» та прийнятих відповідно до них нормативно-правових актів. У цьому ж законі державна політика в галузі охорони праці орієнтована на створення належних, безпечних і здорових умов праці та на запобігання нещасним випадкам і професійним захворюванням.

Для будівельної галузі особливе значення має те, що вимоги охорони праці поширюються на етапи проєктування, будівництва, реконструкції та капітального ремонту об'єктів. Закон вимагає, щоб будівлі, споруди, технологічні процеси, машини та механізми відповідали нормативно-правовим актам з охорони праці, а проєктування здійснювалося з урахуванням безпекових вимог. Крім того, самі нормативно-правові акти з охорони праці визначаються як правила, норми, регламенти, положення, інструкції та інші обов'язкові документи, а роботодавець зобов'язаний забезпечити функціонування системи управління охороною праці, створити відповідні служби, розробити інструкції та організувати профілактичні заходи.

Окремо законодавство встановлює обов'язковість навчання, інструктажів і перевірки знань з питань охорони праці, зокрема для робіт із підвищеною небезпекою. Це є особливо важливим для будівництва, де значна частина операцій пов'язана з висотою, механізмами, електрообладнанням, вантажопідіймальними роботами та тимчасовими конструкціями. Закон також передбачає громадський контроль за дотриманням вимог охорони праці з боку профспілок та уповноважених працівниками осіб.

У законодавстві окремо врегульовано захист вразливих категорій працівників. Так, забороняється використання праці жінок на важких, шкідливих і небезпечних роботах та обмежується залучення неповнолітніх до небезпечних видів робіт, нічних і надурочних змін; для осіб з інвалідністю роботодавець зобов'язаний створювати умови праці з урахуванням медичних рекомендацій та спеціальних заходів безпеки.

Соціальний аспект охорони праці забезпечується системою загальнообов'язкового державного соціального страхування. Закон визначає страхування у зв'язку з тимчасовою втратою працездатності та страхування від нещасного випадку на виробництві й професійного захворювання як складові цієї системи, а також передбачає страхові виплати у разі настання страхового випадку [39].

Отже, нормативна база України у сфері охорони праці є багаторівневою і охоплює конституційні гарантії, спеціальні закони, підзаконні нормативні акти та внутрішньооб'єктові інструкції. Для будівництва це означає, що безпечна організація робіт, професійне навчання персоналу, контроль ризиків і дотримання нормативних вимог є не факультативною, а обов'язковою складовою будь-якого проєкту чи виробничого процесу.

4.1.2 Організація робіт на тимчасових будівельних майданчиках та безпека висотних робіт

Проведення термомодернізації житлового будинку заввишки 16,5 м та глибиною підвалу 3 м потребує дотримання вимог НПАОП 45.2-7.03-17 «Мінімальні вимоги з охорони праці на тимчасових або мобільних будівельних майданчиках»[42]. До початку виконання будь-яких робіт замовник або керівник будівництва забезпечує складання плану з охорони праці будівельного майданчика. Якщо тривалість робіт перевищує 30 робочих днів при одночасному залученні понад 20 працівників або якщо загальний планований обсяг перевищує 500 людино-днів, роботодавець зобов'язаний направити попередню інформацію про початок робіт до Держпраці. За координацію безпеки на об'єкті відповідає генеральний підрядник, який згідно з п. 4.13 ДБН А.3.2-2-2009[40] визначає відповідальну особу або організацію.

Оскільки висота будівлі перевищує 1.3 м, усі фасадні роботи належать до робіт на висоті та регулюються Правилами охорони праці під час виконання робіт на висоті[43-48]. До таких робіт допускаються особи віком від 18 років, які пройшли спеціальне навчання та періодичний медичний огляд. Роботи виконуються за нарядом-допуском, який визначає місце, час початку й закінчення, заходи безпеки та склад бригади.

Установлення будівельних риштувань має відповідати таким вимогам безпеки:

Риштування та помости заввишки до 4 м приймає в експлуатацію безпосередній керівник робіт, а понад 4 м – спеціальна комісія з оформленням відповідного акта.

Для забезпечення стійкості стійки риштувань мають бути закріплені до тривких частин будівлі по всій висоті. Перевірка засобів підмоцнування та риштувань компетентною особою проводиться не рідше ніж через кожні 10 днів.

Настили риштувань на висоті понад 1.1 м повинні мати захисне огороження заввишки не менше ніж 1.1 м (згідно з п. 7.3.10 ДБН А.3.2-2-2009), один проміжний горизонтальний елемент та бортову дошку заввишки не менше 15 см.

При обштукатурюванні фасаду відстань від робочого настилу до стіни не повинна перевищувати 150 мм.

Забороняється виконувати роботи на відкритому повітрі під час несприятливих метеорологічних умов: при швидкості вітру 10 м/с і більше, ожеледиці, грозі, сильному тумані чи зливі.

Процес монтажу теплоізоляції супроводжується специфічними ризиками для здоров'я монтажників систем утеплення. Контакт із мінеральною ватою без захисних засобів викликає серйозне механічне подразнення шкіри, свербіж та мікротравми через руйнування волокон. Найбільшу загрозу несе потрапляння частинок волокон в очі або легені.

Основні заходи безпеки при поводженні з матеріалом включають:

Обов'язкове використання засобів індивідуального захисту: повністю закритого спецодягу, щільних захисних рукавиць, окулярів закритого типу та респіраторів. Також під час свердління отворів під дюбелі у газоблоці дрилем чи перфоратором обов'язково захищати очі від пилу.

Усі робітники повинні постійно носити захисні каски на території майданчика.

Після закінчення роботи з мінеральною ватою вмиватися рекомендується виключно холодною водою, оскільки тепла вода розширює пори шкіри, що сприяє глибшому проникненню мікропилу й появі тривалого свербіжжю.

Видалення відходів мінеральної вати з висоти риштувань має проводитися механізованим способом у закритих ящиках або закритими жолобами (рукавами).

Монтажникам забороняється користуватися несправним ручним чи електроінструментом, захаращувати проходи й робочі місця, класти інструменти на необгороджений край риштувань або використовувати неінвентарні підставки (бочки, ящики) для збільшення висоти настилу.

4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Безпека в надзвичайних ситуаціях є невід’ємною складовою загальної системи захисту населення та функціонування об’єктів господарювання, зокрема у будівельній галузі, де ризики техногенного та природного характеру мають підвищену ймовірність. В Україні ці функції реалізуються в межах державної системи цивільного захисту, яка спрямована на попередження надзвичайних ситуацій, мінімізацію їх наслідків та забезпечення стійкості інфраструктури як у мирний, так і у воєнний час.

Організаційна структура цивільного захисту базується на територіально-виробничому принципі, що передбачає інтеграцію органів державного управління, місцевого самоврядування, підприємств і спеціалізованих формувань у єдину систему реагування. Такий підхід дозволяє враховувати регіональні особливості ризиків і забезпечувати завчасну підготовку до можливих загроз. Управління системою здійснюється на різних адміністративних рівнях — від державного до локального, що забезпечує оперативність прийняття рішень та ефективність координації дій у кризових умовах.

Ключовими функціональними завданнями системи цивільного захисту є прогнозування та запобігання виникненню надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру, своєчасне інформування населення про загрози, організація евакуаційних заходів, а також забезпечення життєдіяльності населення в умовах кризових ситуацій. Особливе значення має створення та підтримка систем моніторингу, оповіщення і зв’язку, що дозволяють здійснювати безперервний контроль стану довкілля та технічних систем. Не менш важливим є систематичне навчання населення і персоналу підприємств діям у надзвичайних ситуаціях, що суттєво знижує рівень потенційних втрат.

У контексті будівництва та експлуатації будівель значна увага приділяється вимогам до проектування об’єктів з урахуванням їх стійкості до дії небезпечних факторів. Зокрема, передбачається дотримання нормативних протипожежних розривів між будівлями, функціональне зонування території з відокремленням

адміністративних і виробничих приміщень, а також застосування конструктивних рішень, що підвищують опір будівель до дії вибухових навантажень і ударних хвиль. Для підвищення безпеки використовуються вогнестійкі матеріали, а конструкції проєктуються з урахуванням можливості герметизації, що є критично важливим для об'єктів підвищеної небезпеки.

Інженерна інфраструктура будівель також повинна відповідати вимогам безпеки. Це стосується організації внутрішніх транспортних шляхів із твердим покриттям та забезпечення альтернативних під'їздів до об'єкта, проєктування каналізаційних систем із резервними випусками, а також створення умов для проведення санітарної обробки персоналу. Такі заходи спрямовані на підвищення надійності функціонування об'єкта в умовах аварійних ситуацій.

Оцінка стійкості об'єкта господарювання є важливим етапом аналізу його безпеки та включає визначення здатності конструктивних і інженерних систем зберігати працездатність при впливі екстремальних навантажень. При цьому враховуються як технічні параметри будівлі, так і можливі сценарії розвитку аварій. Об'єкт вважається стійким у разі забезпечення безперервності функціонування основних систем і мінімізації ризику для життя та здоров'я людей.

Окрему роль у системі безпеки відіграє захист інформації, який передбачає комплекс організаційних, технічних і програмних заходів, спрямованих на забезпечення цілісності, конфіденційності та доступності даних. У сучасних умовах цифровізації будівельної галузі це набуває особливого значення, оскільки порушення інформаційної безпеки може призвести до серйозних техногенних наслідків.

Важливим компонентом загальної системи безпеки є також протипожежний захист, який включає обов'язкове проведення інструктажів для працівників на всіх етапах їхньої діяльності. Систематичне навчання правилам пожежної безпеки, використанню первинних засобів пожежогасіння та діям у разі виникнення пожежі є необхідною умовою запобігання аварійним ситуаціям і мінімізації їх наслідків.

Таким чином, безпека в надзвичайних ситуаціях у будівельній сфері формується як багаторівнева система, що поєднує інженерні, організаційні та

управлінські заходи. Її ефективність визначається комплексністю підходу, відповідністю нормативним вимогам та рівнем готовності персоналу до дій в умовах підвищеного ризику.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У сучасних умовах сталого розвитку та європейської інтеграції України енергоефективність будівель є стратегічно важливим пріоритетом. Вона дозволяє одночасно розв'язати три ключові проблеми: зменшити фінансове навантаження на споживачів через зниження платіжок, скоротити споживання дефіцитних енергоресурсів на державному рівні та мінімізувати викиди вуглекислого газу в атмосферу.

Для підвищення енергоефективності існуючого житлового фонду необхідний комплексний підхід, який включає такі заходи, як: термомодернізація огорожувальних конструкцій (утеплення зовнішніх стін, суміщених покриттів та перекриттів над підвалами); заміна світлопрозорих конструкцій на сучасні енергоефективні багатокамерні склопакети з аргоновим наповненням та низькоемісійним напиленням; модернізація інженерних систем (встановлення індивідуальних теплових пунктів (ІТП) з погодним регулюванням, балансування внутрішньобудинкових систем опалення та впровадження припливно-витяжної вентиляції з рекуперацією тепла).

Для пошуку оптимального інженерного рішення у роботі було детально розглянуто та порівняно три найбільш розповсюджені на ринку України теплоізоляційні матеріали, що мають принципово різну структуру та фізико-хімічні властивості. Мінеральна (кам'яна) вата – волокнистий негорючий матеріал з високою паропроникністю. Екструдований пінополістирол (ЕППС) – щільний, газонаповнений пластик із замкнутою комірчастою структурою та нульовим водопоглинанням. Графітовий (сірий) пінополістирол – інноваційна модифікація класичного пінополістиролу із додаванням мікрочастинок графіту, які виступають абсорбером та відбивачем теплового випромінювання

За результатами проведеного порівняльного аналізу та теплотехнічних обчислень, саме графітовий пінополістирол було визначено як найбільш раціональний та ефективний матеріал для термомодернізації фасадних стін досліджуваного будинку. Максимальна теплотехнічна ефективність дозволила

забезпечити нормативний опір теплопередачі при товщині всього 150 мм та досягти найвищого рівня енергозбереження (скорочення сезонних втрат тепла на 41,7%). Він значно легший за мінеральну вату, що мінімізує додаткове навантаження на фундаменти та споруди, а також не потребує надто товстого шару (на відміну від 200 мм мінвати). На відміну від ЕППС, графітовий має чудову природну адгезію до клейових сумішей і штукатурок «мокрого фасаду» та володіє необхідною еластичністю, що унеможливорює появу тріщин на фасаді від температурних деформацій.

Для досягнення аналогічного теплового ефекту нормативний розрахунок вимагає шару мінвати товщиною аж 200 мм. Це суттєво збільшує навантаження на стіни та створює серйозні незручності при облаштуванні віконних відкосів. Загальна вартість системи утеплення із мінеральної вати товщиною 200 мм виявляється значно вищою за варіант із графітовим ППС, що суттєво збільшує термін окупності проєкту. Щодо ЕППС, то він майже не пропускає вологу (паропроникність в 5 разів нижча, ніж у графітового ППС). Його монтаж на фасаді заблокував би вихід пари з приміщень, спровокувавши появу вогкості, цвілі та грибка всередині будинку. Гладка поверхня ЕППС вимагає складного ручного шліфування для створення адгезії зі штукатуркою. Крім того, низька стійкість до ультрафіолету, високих літніх температур (ризик деформації під штукатуркою) та малоеластичність матеріалу роблять його малопридатним для фасадних систем, обмежуючи його застосування виключно фундаментами та цоколями.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast). Official Journal of the European Union. 2024. L 2024/1275. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32024L1275>.

2. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель : ДБН В.2.6-31:2021. – [Чинний від 2022-09-01]. – Київ : Мінрегіон України, 2021. – 98 с. – (Державні будівельні норми України).

3. Матеріали ІХ Міжнародної студентської науково - технічної конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання» / Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя (м. Тернопіль, 24-25 квітня 2026 р.), 2025.- 398 с.

4. Muir T., Muir R. Orkneyology.com : Orkney travel guide and folklore [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.orkneyology.com>.

5. Dabaieh M. Earth vernacular architecture in the Western Desert of Egypt. 2013.

6. Food and Agriculture Organization (FAO) [Електронний ресурс] : офіційний сайт. – Режим доступу: <https://www.fao.org>.

7. Asbestos Claims Law [Електронний ресурс] : вебсайт. – Режим доступу: <https://www.asbestosclaims.law>.

8. Battle-Merchant [Електронний ресурс] : німецький онлайн-магазин та історичний ресурс. – Режим доступу: <https://www.battlemerchant.com>.

9. Scala graduum Caloris. Calorum Descriptiones & signa. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1701. Vol. 22, No. 270. P. 824–829. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstl.1700.0082>.

10. UCLA Samueli School of Engineering and Applied Science [Електронний ресурс] : офіційний сайт. – Режим доступу: <https://www.seas.ucla.edu>.

11. Samuel Cabot, Inc. Build Warm Houses with Cabot's Quilts. : Samuel Cabot, Inc., 1928.

12. Iran Stone Wool Co. [Електронний ресурс] : вебсайт виробника. – Режим доступу: <https://stonewoolco.ir>.

13. FIW München : Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. [Електронний ресурс] : офіційний сайт інституту. – Режим доступу: <https://fiw-muenchen.de>.

14. Science History Institute [Електронний ресурс] : офіційний сайт. – Режим доступу: <https://www.sciencehistory.org>.

15. Covestro AG [Електронний ресурс] : офіційний сайт компанії. – Режим доступу: <https://www.covestro.com/>.

16. Kusuda T. Early history and future prospects of building system simulation [Електронний ресурс]. IBPSA Proceedings. 1999. Режим доступу: електронний документ PDF.

17. Brown G. The BRIS simulation program for thermal design of buildings and their services. Energy and Buildings. 1990. Vol. 14, Iss. 4. P. 385–400. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(90\)90100-W](https://doi.org/10.1016/0378-7788(90)90100-W).

18. Zevero [Електронний ресурс] : платформа для вуглецевого обліку. – Режим доступу: <https://www.zevero.earth>

19. One Click LCA [Електронний ресурс] : програмне забезпечення для оцінки життєвого циклу. – Режим доступу: <https://oneclicklca.com>

20. Cannon J. R. The one–dimensional heat equation. Reading, MA : Addison-Wesley Publishing Company, Advanced Book Program, 1984. Vol. 23. 483 p. (Encyclopedia of Mathematics and its Applications). ISBN 0-201-13522-1.

21. The NBS (National Building Specification) [Електронний ресурс] : британська платформа для будівельних специфікацій та нормативів. – Режим доступу: <https://www.thenbs.com>

22. Thermal Bridging Solutions [Електронний ресурс] : інженерний вебсайт про теплові містки. – Режим доступу: <https://thermalbridgingsolutions.com/>

23. Eric Kim Photography [Електронний ресурс] : авторський блог про фотомистецтво. – Режим доступу: <https://erickimphotography.com/>

24. Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель : ДСТУ 9191:2022. – [Чинний від 2023-03-01]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. – 34 с. – (Національний стандарт України).

25. Методика визначення енергетичної ефективності будівель [Електронний ресурс] : затверджено наказом Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 № 169. – Режим доступу: Портал ЄДЕССБ або офіційний вебсайт Верховної Ради України

26. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання : ДСТУ 9190:2022. – [Чинний від 2023-03-01]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. – 142 с. – (Національний стандарт України).

27. Конструкції будинків і споруд. Метод визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій : ДСТУ-Н Б В.2.6-101:2010. – [Чинний від 2011-07-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 38 с. – (Державний стандарт України).

28. ДСТУ EN ISO 10211. Теплові містки в будівельних конструкціях. Потoki тепла та поверхневі температури. Детальні розрахунки (EN ISO 10211, IDT; ISO 10211, IDT). – Київ : ДП «УкрНДНЦ».

29. Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року, Розпорядження Кабінету Міністрів України; План, Заходи від 29.12.2021 № 1803-р, <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1803-2021-%D1%80#Text>.

30. Кіцак І. М. Проект відпочинкового комплексу з дослідженням енергоефективності: кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю „192 — будівництво та цивільна інженерія“ / І. М. Кіцак. — Тернопіль : ТНТУ, 2022. — 65 с.

31. Wear resistant hard alloys for agricultural machines elements / Ihor Koval, Lyudmyla Bodrova, Halyna Kramar, Sergiy Marynenko, Yaroslav Kovalchuk, Nazariy Kondzelko // Visnyk TNTU. — Tern. : TNTU, 2020. — Vol 98. — No 2. — P. 33–39.

32. Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ» –/

Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя (Тернопіль 24-25 листопада 2021 року), 2021.- 53 с..

33. Гудь М. І. Оцінювання довговічності тонкостінних циліндричних оболонок при транспортуванні літаком : дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 / Михайло Іванович Гудь. — Тернопіль : ТНТУ, 2021. — 127 с.

34. Influence of temperature on the impact toughness and dynamic crack resistance of 25Kh1M1F steel. Marushchak, P O; Bishchak, R T; Gliha, B; Sorochak, A P. Materials Science; New York Vol. 46, Iss. 4, (Jan 2011): 568-572. DOI:10.1007/s11003-011-9325-5.

35. Гудь Михайло, І., Мещерякова, О., Качор, А., & Гудь, В. (2023). DESIGN AND CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES. Modern Engineering and Innovative Technologies, 1(30-01), 98–104. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2023-30-00-044>.

36. Thermomechanical analysis of nitinol memory alloy behavior / Nazarii Bykiv, Volodymyr Iasnii, Petro Yasniy, Robert Junga // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2021. — Vol 102. — P. 161–167.

37. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. Відомості Верховної Ради України. 1992. № 49. Ст. 668. (Зі змінами та доповненнями).

38. Кодекс законів про працю України : Закон, Кодекс від 10.12.1971 № 322-VIII. Відомості Верховної Ради УРСР. 1971. (Додаток до № 50). Ст. 375. (Зі змінами та доповненнями).

39. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування : Закон України від 23.09.1999 № 1105-XIV. Відомості Верховної Ради України. 1999. № 46–47. Ст. 403. (Зі змінами та доповненнями).

40. Система стандартів безпеки праці. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення (НПАОП 45.2-7.02-12) : ДБН А.3.2-2-2009. – [Чинний від 2012-01-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 75 с. – (Державні будівельні норми України).

41. Конституція України : Закон від 28.06.1996 № 254к/96-ВР // Відомості Верховної Ради України. 1996. № 30. Ст. 141. (Із змінами, ст. 43, 45, 46).

42. НПАОП 45.2-7.03-17. Мінімальні вимоги з охорони праці на тимчасових або мобільних будівельних майданчиках : затверджено наказом Міністерства соціальної політики України від 23.06.2017 № 1050. – Київ, 2017. – (Нормативно-правовий акт з охорони праці).

43. Про будівельні норми : Закон України від 05.11.2009 № 1704-VI. Відомості Верховної Ради України. 2010. № 5. Ст. 43. (Зі змінами та доповненнями).

44. Тимчасове робоче обладнання. Частина 1. Риштування. Вимоги до продуктивності та загальна конструкція (EN 12811-1:2003, IDT) : ДСТУ EN 12811-1:2022. – [Чинний від 2023-08-01]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. – (Національний стандарт України).

45. Індивідуальне спорядження для захисту від падіння з висоти. Загальні вимоги до інструкцій щодо використання, технічного обслуговування, періодичного перевіряння, ремонтування, маркування та пакування (EN 365:2004; AS:2006, IDT) : ДСТУ EN 365:2017. – [Чинний від 2019-01-01]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. – (Національний стандарт України).

46. 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>

47. Каспрук, В. Б. (2024). Методичні вказівки до написання розділу з охорони праці в будівництві для спеціальності 192" Будівництво та цивільна інженерія". І. Пулюя, 15.

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