МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
імені Ю.М. ПОТЕБНІ

КАФЕДРА МІСЬКОГО БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проєкт)

магістр
(рівень вищої освіти)

на тему Розвиток застосування піноскла у будівництві

Виконав: студент 2 курсу,групи 8.1923-мопа-дн
спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Містобудування та об'ємно-просторова архітектура
(назва освітньої програми)
Еззіат Абдельхамід
(ініціали та прізвище)

Керівник проф., д.т.н, Банах В.А.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент доц., к.т.н, Фостащенко О.М.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
імені Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра міського будівництва і архітектури
Рівень вищої освіти магістр
Спеціальність 192 Будівництво та цивільна інженерія
(код та назва)
Освітня програма Містобудування та об'ємно-просторова архітектура

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
«01» 10 2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Еззіату Абдельхаміду
(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи (проєкту) Розвиток застосування піноскла у будівництві

керівник роботи проф., д.т.н, Банах В. А.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «30» 09 2024 року № 1486-с .

1 Строк подання студентом роботи 01.02.2025

2 Вихідні дані до роботи Актуальність обраного напрямку досліджень, значимість у сучасному житті, можливість розвинення проблематики, перспективи впровадження майбутніх досягнень, мета роботи, завдання до виконання обраних досліджень, об`єкт досліджень, предмет досліджень, передбачувані методи виконання досліджень

3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Літературний огляд. Виявити переваги піноскла перед найбільш часто використовуваними теплоізоляційними матеріалами. Порівняти значення теплових потоків через огороджувальну конструкцію з різними варіантами матеріалу теплоізоляційного шару.Визначити клас небезпеки конструкцій, що захищають, при застосуванні різних теплоізоляційних матеріалів.

4 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язк
креслень) Презентація із результатами аналітичних обґрунтувань науков
напряму досліджень, результатами експериментальних дослідж
результати розрахунків із застосуванням сучасних інформаційних мет
досліджень

5 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийня
1	Банах В.А.		
2	Банах В.А.		
3	Банах В.А.		

6 Дата видачі завдання 01.09.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим
1	Літературний огляд	01.10	
2	Розділ 1	01.11	
3	Розділ 2	15.11	
4	Розділ 3	01.12	
5	Розробка графічної частини	15.12	
6	Оформлення роботи	15.01	
7	Попередній захист	01.02	

Студент _____ Еззіат Абдельхамід
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту) _____ Банах В. А.
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Гребенюк І.В.
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Еззіат Абдельхамід. Розвиток застосування піноскла у будівництві.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 192 - Будівництво та цивільна інженерія, науковий керівник В.А. Банах. Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю.М. Потебні ЗНУ, кафедра міського будівництва і архітектури, 2025.

У роботі проведена порівняльна оцінка використання піноскляних і найпоширеніших матеріалів утеплення за показниками тепловтрат і витрат на опалення конструкцій з їх застосуванням. Крім того, були порівняні вартості та терміни окупності цих конструкцій.

За отриманими результатами видно, що піноскло значно програє екструдованому пінополістиролу та мінеральній ваті за початковими вкладеннями та часом окупності витрат на зведення огороджувальної конструкції з його застосуванням. Однак термін служби піноскла різними джерелами встановлюється понад 50 років або протягом усього терміну служби будівлі, оскільки він більш міцний і не піддається впливу води та агресивних середовищ.

Ключові слова: ПІНОСКЛО, МІНЕРАЛЬНА ВАТА, ВОГНЕЗАХИСТ, ПОКРИТТЯ, УТЕПЛЕННЯ, ТЕПЛОВТРАТИ.

ABSTRACT

Ezziat Abdelhamid. Development of the Use of Foam Glass in Construction.

Qualifying graduation thesis for obtaining a master's degree of higher education in specialty 192 - Construction and civil engineering, supervisor V.A. Banach. Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebni ZNU, Department of Urban Construction and Architecture, 2025.

The work has carried out a comparative assessment of the use of foam glass and the most common insulation materials in terms of heat loss and heating costs

of structures with their use. In addition, the costs and payback periods of these structures were compared.

According to the results obtained, it is clear that foam glass significantly loses to extruded polystyrene foam and mineral wool in terms of initial investments and payback time for the construction of an enclosing structure with its use. However, the service life of foam glass is set by various sources at more than 50 years or throughout the entire service life of the building, since it is more durable and is not exposed to water and aggressive environments.

Keywords: FOAM GLASS, MINERAL WOOL, FIRE PROTECTION, COATING, INSULATION, HEAT LOSS.

ЗМІСТ

	ВСТУП……	8
Розділ 1	СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ……..	12
1.1	Класифікація матеріалів та виробів з піноскла……...	12
1.2	Технологія виробництва піноскла……	13
1.3	Порівняльний аналіз характеристик піноскла та інших теплоізоляційних матеріалів……..	18
1.4	Застосування виробів із піноскла……..	24
1.5	Досвід застосування виробів із піноскла……..	27
1.5.1	Зарубіжний досвід……	27
1.5.2	Вітчизняний досвід……	34
1.6	Висновки за першим розділом……	36
Розділ 2	ТЕОРІЯ ТЕПЛОФІЗИКИ ТА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ……	37
2.1	Механізми теплопередачі……...	37
2.1.1	Теплопровідність……	37
2.1.2	Коефіцієнт теплопровідності матеріалу……...	40
2.1.3	Стаціонарний режим тепломасоперенесення……..	40
2.1.4	Умови однозначності……..	41
2.1.5	Граничні умови поверхні досліджуваного об'єкта……..	41
2.2	Методика теплотехнічного розрахунку……	42
2.3	Моделювання процесів теплоперенесення……..	45
2.3.1	Методика проведення теоретичних розрахунків будівельних конструкцій із використанням програми «COMSOL Multiphysics»..	46
2.3.2	Методика розрахунку тепловтрат будівлі через огороджувальні конструкції за опалювальний період……	47
2.4	Висновки за другим розділом……	48

Розділ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ, СПРЯМОВАНІ НА ПОРІВНЯННЯ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ПОЗИЦІЇ ЕНЕРГО- ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ……... 50
3.1 Розрахунок теплових втрат будівлі…….. 50
3.2 Розрахунок теплового потоку в COMSOL Multiphysics ……. 53
3.3 Розрахунок тепловтрат будівлі через огороджувальні конструкції за опалювальний період …….. 55
3.3.1 Розрахунок тепловтрат будівлі через огороджувальні конструкції за опалювальний період варіанта утеплення пінополістиролом..... 57
3.3.2 Розрахунок тепловтрат будівлі через огороджувальні конструкції за опалювальний період варіанта утеплення мінеральною ватою…. 59
3.3.3 Розрахунок тепловтрат будівлі через огороджувальні конструкції за опалювальний період варіанта утеплення піностеклом……... 60
3.4 Розрахунок класу небезпеки огороджувальної конструкції…….. 62
3.5 Розрахунок витрат на опалення за розрахунковий період…… 64
3.6 Економічна ефективність…….. 66
3.7 Рекомендації щодо застосування…… 70
3.8 Висновки за третім розділом……... 73
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ…….. 75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……. 77

ВСТУП

Актуальність теми. Проектування будівель має на меті створення об'єкта, в якому умови для проживання, ведення будь-якої діяльності або утримання тварин були б не тільки комфортними, а й безпечними. Для досягнення цієї мети при проектуванні необхідно дотриматися комплексу вимог, серед яких виділяються вимоги механічної та пожежної безпеки, енергетичної ефективності, безпечних для здоров'я людини умов проживання та перебування, а також безпечного рівня впливу будівель та споруд на навколишнє середовище [1-2]. Ці вимоги, у тому числі, відносяться і до будівельних матеріалів, що дуже впливає на їх вибір.

Серед великого асортименту представлених на ринку матеріалів вимогам більшою мірою відповідає такий матеріал, як піноскло.

Про піноскло стало відомо ще в першій половині XX століття. Спочатку передбачалося застосовувати піноскло в якості плаваючого матеріалу, але незабаром з'ясувалося, що воно додатково має високі тепло і звукоізоляційні властивості, легко піддається механічній обробці та склеюванню. Виявилося, що новий матеріал здатний з успіхом конкурувати у галузі промислового теплозахисту та будівельної теплоізоляції. Дані відомості стали базисом для подальшого вивчення цього матеріалу, розвитку технології виробництва та пошуку застосування його у різних сферах.

Найбільш широке застосування піноскло отримало як теплову ізоляцію, хоча область його застосування не обмежується тільки теплозахисною функцією. При цьому порівняно з кам'яною (49%) та скляною (22%) ватою та пінополістиролом (20%) частка використання піноскла в будівельному секторі дуже мала і становить менше 2% (рис. 1.1) [10].

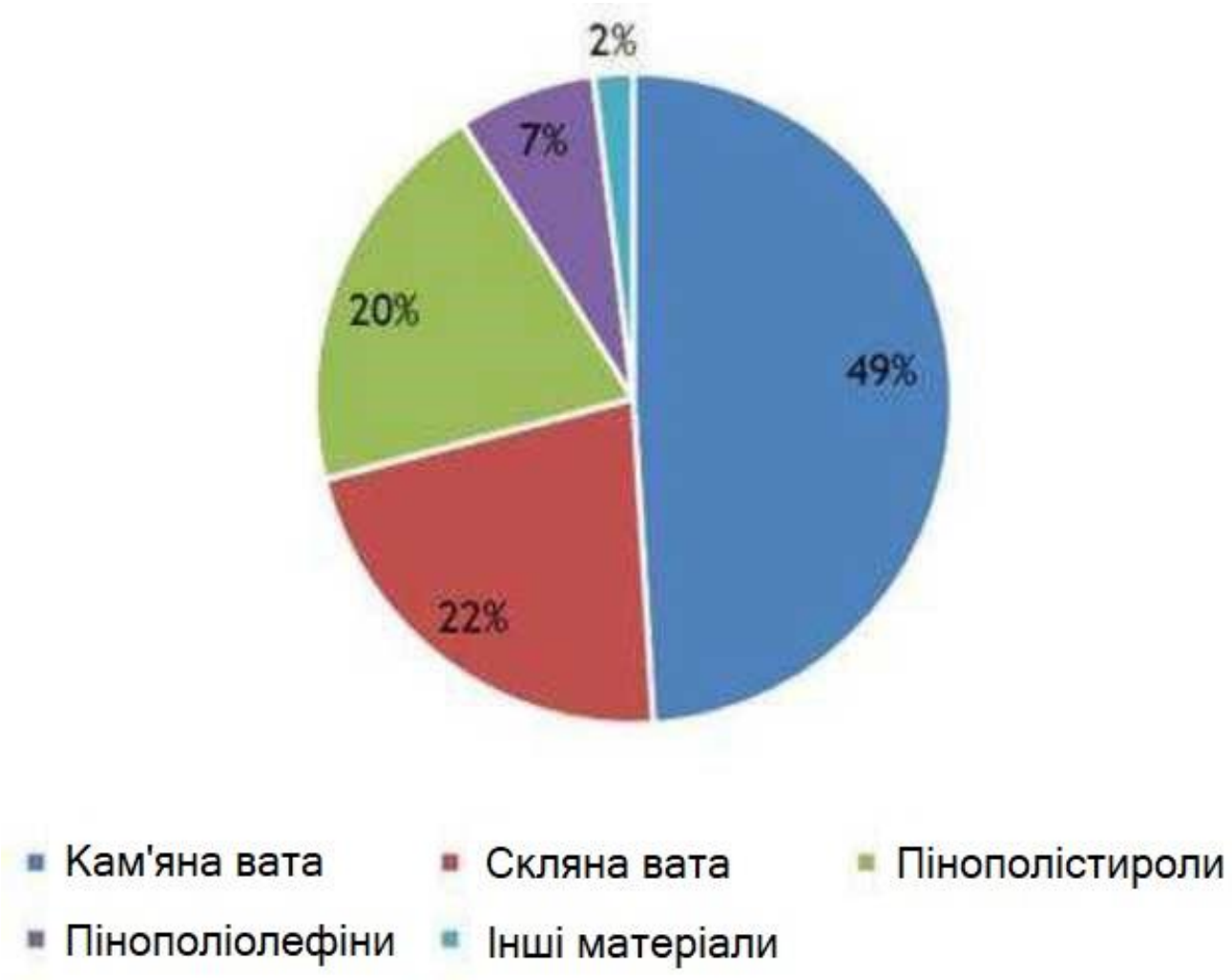


Рисунок 1.1 - Структура ринку теплоізоляційних матеріалів в Україні

Широко використовувані у Україні технології виробництва теплоізоляційних матеріалів припускають використання високотемпературних процесів (900-1600°С) чи екологічно шкідливих речовин - алюмінієвої пудри (газобетон), клееканіфольних, смолосапонінових, алюмосульфонафтенових піноутворювачів (пінобетон); в якості сполучного в мінераловатних виробах часто служать органічні смоли, що підвищують токсичність виробів, що одержуються, і не задовольняють санітарно-технічним вимогам.

За кордоном піноскло є досить затребуваним теплоізоляційним матеріалом, і такі країни, як Японія та Китай, мають власних великих незалежних виробників піноскла. Однак розвиненою технологією

промислового виробництва піноскла мають на сьогодні лише США (у тому числі на європейських заводах у Бельгії, Чехії та Німеччині), Японія, Китай [11-12]. В Україні в основному є невеликі виробництва, які не можуть повністю задовольнити потреби будівельної галузі в подібному теплоізоляційному матеріалі.

Тим не менш, перспективність застосування теплоізоляції з піноскла обумовлена його довговічністю, екологічністю, а також можливістю переробки відходів скляної промисловості та інших виробництв.

Мета і завдання роботи. Мета роботи є розробка рекомендацій щодо застосування виробів із піноскла у будівництві.

Для вирішення мети поставлено такі завдання:

- Виявити переваги піноскла перед найбільш часто використовуваними теплоізоляційними матеріалами;
- Порівняти значення теплових потоків через огороджувальну конструкцію з різними варіантами матеріалу теплоізоляційного шару;
- Визначити клас небезпеки конструкцій, що захищають, при застосуванні різних теплоізоляційних матеріалів;
- Порівняти економічні показники з урахуванням довговічності конструкцій.
- Розробити рекомендації щодо застосування піноскла з урахуванням його технічних та економічних характеристик.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є вироби із піноскла..

Предмет дослідження. Предметом дослідження є застосування виробів із піноскла у будівництві з урахуванням його технічних та економічних характеристик.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених завдань використовувалися узагальнення, аналіз теоретичних та практичних досліджень на тему роботи та комплексні дослідження експлуатаційних властивостей фасадних панелей.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна роботи

полягає у розгляді теплових потоків з урахуванням кріплення матеріалу до конструкцій, що несуть, визначенні класу небезпеки стінових конструкцій при розгляді переходу будівельного матеріалу в розряд відходів, в економічній оцінці застосування теплоізоляційних матеріалів з урахуванням їх довговічності.

Практичне значення одержаних результатів. Порівняння характеристик теплоізоляційних матеріалів. Чисельне визначення теплових потоків через конструкцію, що захищає, з урахуванням кріплення теплоізоляційного матеріалу. Визначення класів небезпеки конструкцій, що захищають. Економічна доцільність використання піноскла для теплової ізоляції.

Особистий вклад дослідника. Постановка мети і завдання дослідження. Збір і аналіз даних для проведення дослідження.

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, трьох розділів, основних висновків, списку використаних джерел, містить 81 сторінок, 18 рисуноків, 15 таблиць, 55 список використаних джерел.

РОЗДІЛ 1
СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Класифікація матеріалів та виробів з піноскла

Комірчасте скло (піноскло) - високопористий теплоізоляційний матеріал пористої структури, в якому рівномірно розподілені пори розділені тонкими перегородками зі склоподібної речовини.

Характеристики та властивості матеріалів та виробів із піноскла регулюються такими нормативними документами: ДСТУ EN 13167:2019 «Матеріали теплоізоляційні для будівель. Промислові вироби з піноскла (CG). Технічні умови» [14].

Видів і форм виробів із піноскла в даний час існує велика кількість.

Матеріали та вироби з піноскла класифікують відповідно до ДСТУ Б ГОСТ 16381:2011 «Матеріали та вироби будівельні теплоізоляційні. Класифікація та загальні технічні вимоги» [15] за такими ознаками:

- Призначення;
- Форма;
- Структура осередків піни.

За призначенням матеріали та вироби з піноскла поділяють на:

- теплоізоляційні;
- звукоізоляційні та звукопоглинаючі (для захисту від шуму та створення умов акустичного комфорту в будинках);
- спеціального призначення (захист від електромагнітних хвиль, дорожнє будівництво, системи гідроізоляції, як малі архітектурні форми та ін.).

За формою матеріали та вироби поділяють на:

- Сипучі матеріали (піноскло у формі дискретних частинок комірчастої структури, що застосовується як заповнювач для легких бетонів та засипок у конструкціях житлових, цивільних, промислових будівель та

будівель спеціального призначення);

- Блоки (вироби з прямокутним поперечним перерізом товщиною, що незначно відрізняється від ширини виробів);
- Плити (вироби з піноскла з прямокутним поперечним перерізом, товщина якого істотно менша за інші розміри і незмінна по всьому виробу);
- Фасонні вироби складної геометричної форми (вироби, що мають задану форму, відмінну від форми прямокутних (плит і блоків) та ухилетворних виробів);
- Уклоноутворюючі вироби (вироби з піноскла змінної товщини, що застосовуються для розухилення поверхні, що теплоізолюється).

Сипучі матеріали поділяють на:

- Гранульоване (піноскло у вигляді частинок розміром у діапазоні 5-40 мм, що мають форму, близьку до сферичної, та нерозвинену поверхню, відмінну від внутрішньої комірчастої будови частинок, що випускається у вигляді фракцій розміром 5-10, 10-20, 20-40 мм ; в тому числі і мікрогранульоване з розміром частинок менше 5 мм) піноскло;
- Щебінь (піноскло у вигляді частинок неправильної форми, що мають розвинену комірчасту поверхню). За структурою осередків піни виділяють вироби:
- З переважно закритими осередками;
- З частково закритими осередками.

1.2 Технологія виробництва піноскла

Вибір компонентів для виготовлення піноскла впливає на технологію отримання і, відповідно, властивості готових виробів.

Вибір компонентів для виготовлення піноскла істотно впливає на властивості готових виробів [4, 15].

Сировиною для піноскляних матеріалів можуть бути відходи скляного

виробництва і склогранулятів певного мінералогічного складу. Також як сировинний компонент можуть бути використані кремній, що містять гірські породи (перліт, діатоміт, трепел та ін.), відходи лужних гірських порід, що легко спекаються (трахіт, сієніт, нефелін, та ін.) і відходи виробництв (золи і шлаки ТЕС та ін.) .) [17-31].

Крім того при отриманні піноскла велика роль вибору виду і кількості газоутворювача, що вводиться в шихту. Він впливає на те, чи буде пористість переважно замкненою або ж пори повідомлятимуться між собою. Залежно від того, які властивості необхідно надати піноскліному матеріалу (теплоізоляційні або звукоізоляційні), можуть бути застосовані наступні два види газоутворювачів: вуглецевмісні та карбонатні.

До вуглецевмісних газоутворювачів відносяться кокс, антрацит, графіт, сажа. Даний вид газоутворювача при термообробці сприяє утворенню в піносклі рівномірно розподілених замкнутих пор. Піноскло, отримане із застосуванням вуглецевмісних газоутворювачів, має досить високий опір теплопередачі (коефіцієнт теплопровідності ≤ 0,065 Вт/(м^°С)) і застосовується як теплова ізоляція.

Газоутворювачі на основі карбонатних порід (вапняк, доломіт, мармурова крихта і т.п.) приводять при спінюванні до утворення сполучених пір за рахунок виділення вуглекислого газу. Таке відкритопористе піноскло має значне водопоглинання та хороші звукозахисні показники, що робить можливим його застосування як звукопоглинаючого та фільтруючого матеріалу, а також як сорбент.

При виробництві гранульованого піноскла важливим фактором є застосування сполучних та опудрюючих добавок. Сполучні компоненти (рідке скло, розчин карбоксиметилцелюлози (КМЦ), крохмальний клейстер або сульфітно-спиртова барда) служать для покращення формування сирцевих гранул. Опудрюючі компоненти (тугоплавкі порошки, такі як тальк і технічний глинозем; емульсії на водній основі, що складаються з каоліну або графіту) не дозволяють сформованим гранулам злипатися при спінювання в

печі.

Для поліпшення характеристик або надання пеностеклу особливих властивостей можуть застосовуватись спеціальні добавки, наприклад, діоксид цирконію, ільменітовий (титановий) концентрат, арсенід галію, вуглецеві нанотрубки та ін [32-37].

Схема основних компонентів піноскла представлена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Компоненти піноскла

Скло	Відходи скляного виробництва	Віконне (листове) скло Тарне (пляшкове) скло
	Склогранулятів	Зі спеціально звареного скла На основі лужних гірських порід На основі відходів виробництва На основі крем'янистих гірських порід
Газоутворювач	Вуглецевмісні	Антрацит; кам'яновугільний кокс; торф'яний напівкокс; графіт; карбід кремнію та кальцію; сажа; деревне вугілля
	Карбонатні	Крейда; мармур; вапняк
Добавки	Опудруючі	Емульсії на водній основі: каолін, графіт Тугоплавкі порошки: тальк, технічний глинозем, високоглиноземний шамотний пил, відходи корундових вогнетривів
	Сполучні	Рідке скло; КМЦ; полівініловий спирт; феноло формальдегідні смоли; лігніни; лігносульфонати; крохмальний клейстер
	Спеціальні	діоксид цирконію; титановий концентрат; арсенід галію; УНТ

Сутність отримання піноскла полягає в попередній підготовці піноутворюючої суміші, подальшому її спінювання в печі та відпалу. Повільне охолодження (відпал) сприяє рівномірному остиганню виробів за обсягом, тому в них не виникають внутрішні напруження і не утворюється тріщин.

Відомо кілька способів отримання комірчастого скла [16, 38-39]:

- Спучування в скловарній печі або спеціальному апараті скломаси, що знаходиться у в'язкому пластичному стані при одночасному газовиділенні тонкоподрібненого газоутворювача;
- Продування скляного розплаву повітрям чи газами;
- Спучування розм'якшеного скла під вакуумом внаслідок розширення повітря, що міститься у скломасі;
- Прохолодний спосіб;
- Спікання суміші, що складається з порошкоподібного скла та газоутворювача (порошковий спосіб).

У вітчизняній практиці найбільшого застосування отримав порошковий спосіб, який дозволяє спрямовано регулювати властивості ніздрюватого скла в широких межах. На рисунку 1.2 показано основну технологічну схему даного способу.



Рисунок 1.2 - Технологічна схема виробництва піноскла

Скляний гранулят або скляний бій розмелюють, використовуючи кульові млини у суміші з газоутворювачем у тонкий порошок. Отриману шихту завантажують у форми з жаротривкої сталі з каоліновою обмазкою. Форми на вагонетках та по роликовому конвеєру подають у тунельну піч. В результаті нагрівання до 800-900°С частинки скла розм'якшуються до в'язкорідкого стану, а вуглець окислюється з утворенням газоподібних CO_2 і CO, які і спінюють скломасу.

При охолодженні утворюється матеріал із комірчастою структурою. Повільне охолодження (відпал) сприяє рівномірному остиганню виробів за обсягом, тому в них не виникають внутрішні напруження і не утворюється тріщин. Охолоджені вироби розпилюють, оправляють на обпилювальному устаткуванні. Далі виконується розбракування отриманих плит. Плити, що пройшли контроль, складують на піддонах та упаковують. Готову продукцію надсилають на склад.

Обріз піносклочного матеріалу, отримана в процесі механічної обробки блоків - заготовок, а також забраковані піносклові плити направляють на дроблення. В результаті виходить супутній товарний продукт - піносклінні гранули та мікрогранули, які класифікують за фракціями та фасують у м'які контейнери. Розфасовані гранули направляють складу готової продукції. Піноскляні мікрогранули та вловлений пил розпилювання направляють на виробництво сухих будівельних сумішей.

Час перебування матеріалу в тунельній печі становить близько 24 годин. Температурна крива за часом перебування матеріалу печі представлена на рисунку 1.3.

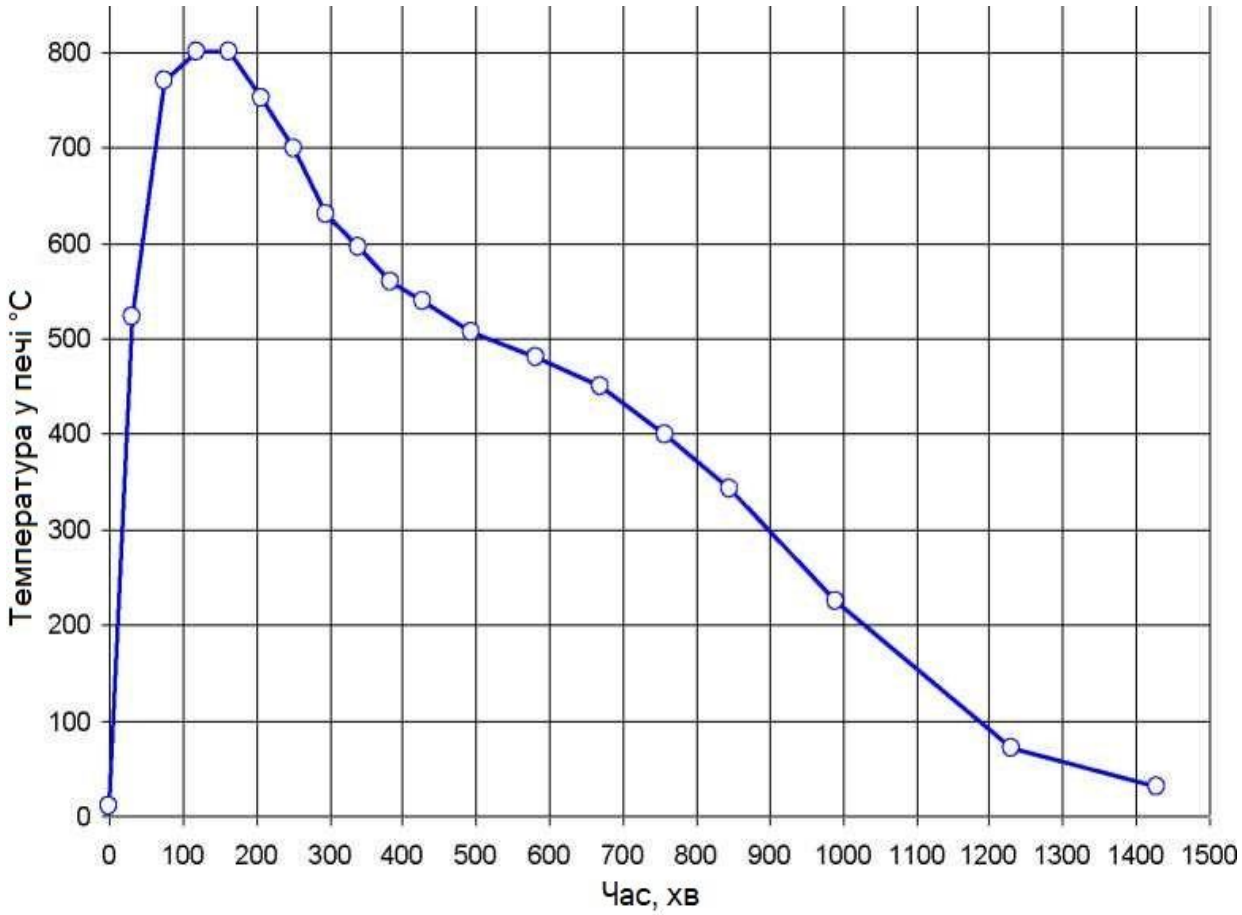


Рисунок 1.3 - Температурна крива за часом перебування матеріалу в печі

Як видно з малюнка 3, відпал займає значний проміжок часу і становить близько 18 год, що пояснюється складністю фіксації структури піноскла, якому не властиве різке твердіння при охолодженні.

1.3 Порівняльний аналіз характеристик піноскла та інших теплоізоляційних матеріалів

Сьогодні в Україні підприємства будіндустрії випускають теплоізоляційні матеріали, які можна об'єднати у дві основні групи [15]: органічні та неорганічні волокнисті (відкритопористі) теплоізоляційні матеріали.

Однак вони мають недоліки. Органічні теплоізоляційні матеріали на основі пінополістиролів та пінополіуретанів не відповідають вимогам пожежної безпеки та довговічності [40]. Неорганічні волокнисті

теплоізоляційні матеріали - мінераловатні, скловатні, базальтові утеплювачі мають у складі сполучний матеріал, який в основному є органічним продуктом, нерідко екологічно небезпечним та недовговічним. Також ці неорганічні матеріали мають велике вологонакопичення, значне усадження і нестійкість до гризунів.

З вище сказаного ясно, що для застосування в капітальному будівництві потрібен теплоізоляційний матеріал, здатний надійно працювати протягом усього терміну служби конструкції, без втрати теплоізоляційних властивостей. Тому в промисловості будівельних матеріалів дедалі більше застосування знаходять неорганічні теплоізоляційні матеріали із залученням скляного бою за енергозберігаючою технологією. До таких матеріалів відносяться піноскло, пенокремнезит, пінобетон, перлітокремнезит, склопенокремнезит, піносклокристалічні матеріали та ін [41].

Піноскло є склоподібним матеріалом, пронизаним численними рівномірними порами. Для нього характерні такі цінні властивості, як мала об'ємна вага, низький коефіцієнт теплопровідності, мале водопоглинання. Піноскло може бути отримане безбарвним, пофарбованим, покритим глазур'ю для декорування фасадів будівель. Виробляють його у вигляді плит різних розмірів.

Повністю неорганічний склад переважно з вищих оксидів та стільникова структура піноскла визначили його наступні властивості:

- Стабільність розмірів (відносна зміна довжини та ширини не перевищує 0,5%, відносне зменшення товщини – 1,0%);
- Мала щільність (80-200 кг/м^3);
- Відмінні теплоізоляційні властивості (для закритопористого піноскла коефіцієнт теплопровідності не більше 0,065 Вт/(м °С));
- Високі звукоізоляційні якості (для піноскла зі сполученими порами);
- Висока міцність на стиск (0,3 - 2,0 МПа);

- Малі водопоглинання (не більше 5% за обсягом) та паропроникність (0,004 мг/(мш^Па)) (для піноскла із закритою пористістю);
- Висока морозостійкість (не менше 50 циклів);
- Широкий діапазон температур експлуатації (від -260 до +450°С);
- Пожежна безпека (належить до негорючих матеріалів);
- Стійкість до більшості агресивних середовищ (за винятком плавикової кислоти та концентрованих розчинів лугів);
- Біологічна та бактеріологічна стійкість, непрохідність для всіх гризунів та комах.

Дані властивості регулюються ДСТУ EN 13167:2019 та зумовлюють довговічність виробів із піноскла, що може перевищувати 50 років.

Крім того вироби з піноскла не токсичні, екологічно безпечні, не надають шкідливого впливу на навколишнє середовище та здоров'я людини. Також вони легко піддаються механічній обробці столярними інструментами та прості у монтажі.

Найбільший інтерес викликає поєднання високої міцності піноскла при його малій щільності порівняно з іншими матеріалами. Наприклад, у пористого скла та пористого бетону марки 300 коефіцієнти конструктивної якості відповідно дорівнюють 10 і 3,3. Це більш високою щільністю і міцністю межпоровых перегородок, сформованих зі скла. Матриця вузлів і зв'язків структури піноскла є найбільш оптимальною просторово-об'ємною конфігурацією, здатною при мінімальній щільності витримувати максимальні навантаження [13].

Тим не менш, піноскло має деякі недоліки, які гальмують його широке застосування. Серед недоліків, як правило, виділяють такі: висока вартість та крихкість.

Основний мінус піноскла – його висока вартість, що перевищує вартість мінераловатних та пінополістирольних теплоізоляційних матеріалів більш ніж у 3 рази. Це зумовлено складною технологією виготовлення та необхідністю використовувати у виробництві спеціальне дороге обладнання.

Також піноскліний матеріал досить крихкий і погано витримує ударні

навантаження. При роботі з ним необхідно суворо дотримуватись технології, будь-які відхилення можуть призвести до розтріскування плит.

Порівняльна характеристика плитних та блокових теплоізоляційних матеріалів наведена в таблиці 1.2. Порівняльна характеристика сипких теплоізоляційних матеріалів наведена у таблиці 1.3.

На Українському ринку сертифіковано та застосовується блокове піноскло наступних виробників: «FOAMGLAS®» (США, Бельгія); ТОВ «НВП Технологія» (Україна, м. Шостка); (рис. 1.4).

При цьому характеристики піноскла можуть відрізнятися в залежності від виробника. Це з особливостями технології виробництва, якістю і складом сировинних матеріалів. Порівняльна таблиця наведена у таблиці 1.4.

Таблиця 1.2 – Характеристики теплоізоляційних матеріалів

Найменування параметра	Пінополіуретан	Пінополістирол	Екструдований пінополістирол	Мінеральна вата	Газобетон	Піноскло
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м°С)	0,036	0,04	0,031	0,043	0,14	0,042
Щільність, г/см^3	0,06	0,035	0,035	0,15	0,4	0,15
Міцність на стиск, МПа	0,4	0,2	0,3	0,4	1,5	1,5
Паропроникність, мг/(мгг Па)	0,05	0,05	0,005	0,31	0,23	0,004
Верхня температурна межа експлуатації, °С	130	75	75	400	750	450
Нижня температурна межа експлуатації, °С	-80	-60	-70	-190	-	-260
Довговічність, років	20-50	30-50	30-50	25-40	100	80-100

Таблиця 1.3 – Характеристики сипких теплоізоляційних матеріалів

Найменування параметра	Гравій із шлаків	Перліт спучений	Вермікуліт спучений	Гравій керамзитовий	Піноскло
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м°С)	0,14	0,087	0,080	0,130	0,053
Щільність, г/см^3	500	400	200	400	150
Паропроникність, мг/(мгтПа)	0,24	0,3	0,23	0,24	0,004
Водопоглинання, %	25	50	70	25	5
Товщина шару з термічним опором рівним 1 (м^2°С) / Вт, м	0,14	0,087	0,08	0,13	0,053
Маса 1 м^2 шару з термічним опором рівним 1 (м^2°С)/Вт, кг	70,0	34,8	16,0	52,0	7,95

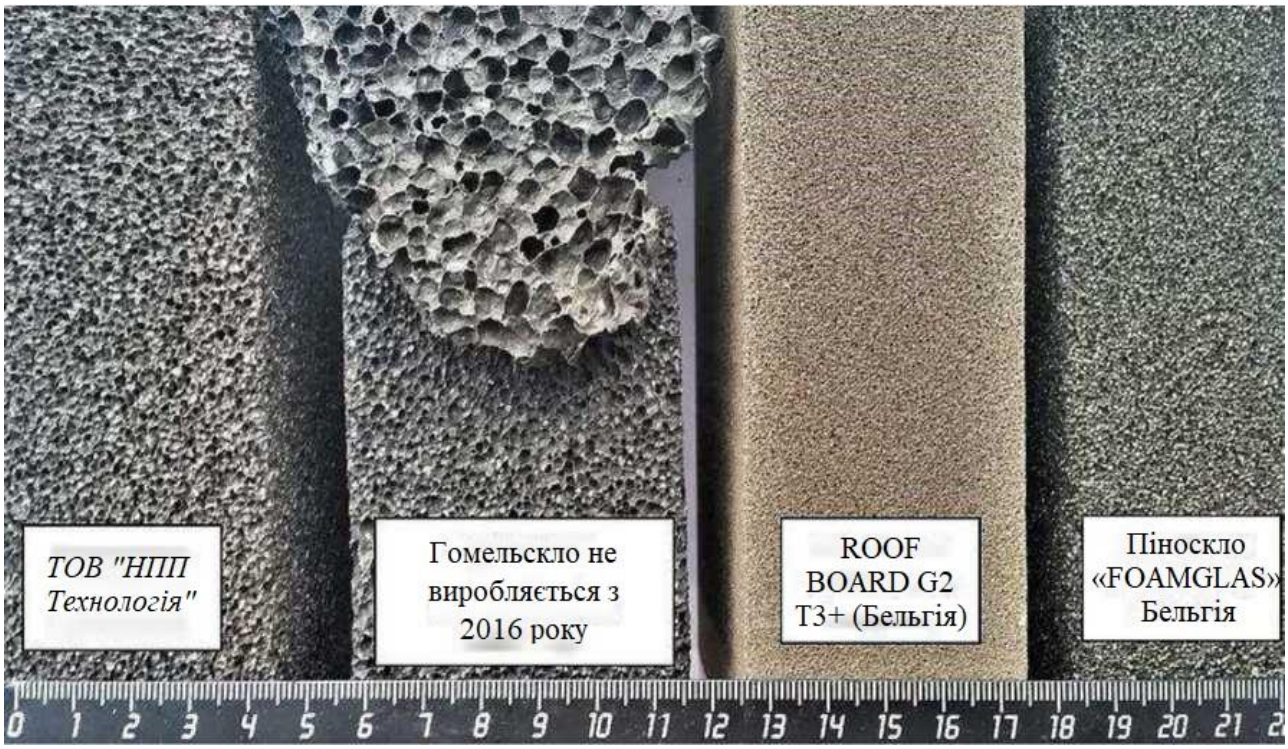


Рисунок 1.4 - Піноскло сертифікованих виробників

Таблиця 1.4 - Порівняння технічних характеристик піноскла різних виробників

Параметри	ROOF BOARD G2 T3+ (Бельгія)	ТОВ "НВП Технології",(Україна)	Foamglas ® T4+, (Бельгія)	Foamglas ® S3, (Бельгія)	Foamglas ® F, Бельгія)
Довжина та ширина блоку, мм	600 x 500, (600x450)	600 X 450	600 x 450	600 X 450	600 X 450
Товщина, мм (крок 10 мм)*	30-150	30-160	40-180	40-180	40- 160
Щільність + 10%, кг/м^3	130	130	115	135	160
Теплопроводность в сухом состоянии, Вт (м*К)	0.047	0.046	0.042	0.046	0.052
Паропроникність, мг(м-год - Па), не більше	0,0009	0,0005	0 (0.0005)	0 (0.0005)	0 (0.0005)
Межа міцності на стиск, МПа	0,7	1	0,6	0,9	1,6
Межа міцності при згинанні, МПа	0,45	0,5	0,45	0,5	0,6
Водопоглинання при короткочасному та частковому зануренні, кг/м^2, не більше	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Водопоглинання при тривалому зануренні, кг/м^2, трохи більше	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Температура застосування, °С	-260 ... +400	-260... +480	-260... 480	-260 ... +400	-260 ... +400
Група горючості	НГ	НГ	НГ	НГ	НГ
Необхідні дозволи та сертифікати для застосування в Україні	+	+	+	+	+
* Можливе збільшення зазначеної товщини за рахунок склеювання блоків у заводських умовах за допомогою клейових складів					

1.4 Застосування виробів із піноскла

Поєднання всіх зазначених властивостей дозволяє сказати, що піноскло - це універсальний теплоізоляційний матеріал, що поєднує ефективну теплопровідність, високу міцність, абсолютну негорючість та високу вогнестійкість, екологічність та відсутність водопоглинання. Це дозволяє застосовувати його у всіх галузях будівництва та промисловості, де необхідна якісна та довговічна теплоізоляція.

Виділяється три напрямки застосування теплової ізоляції:

- Будівельна;
- Високотемпературна ізоляція;
- Холодоізоляція.

Будівельна ізоляція дозволяє знизити втрати теплоти через елементи будівельних конструкцій (стіни, підлоги, покрівлі тощо) і, відповідно, знизити витрати енергії при опаленні або кондиціонуванні (рис.1.5).

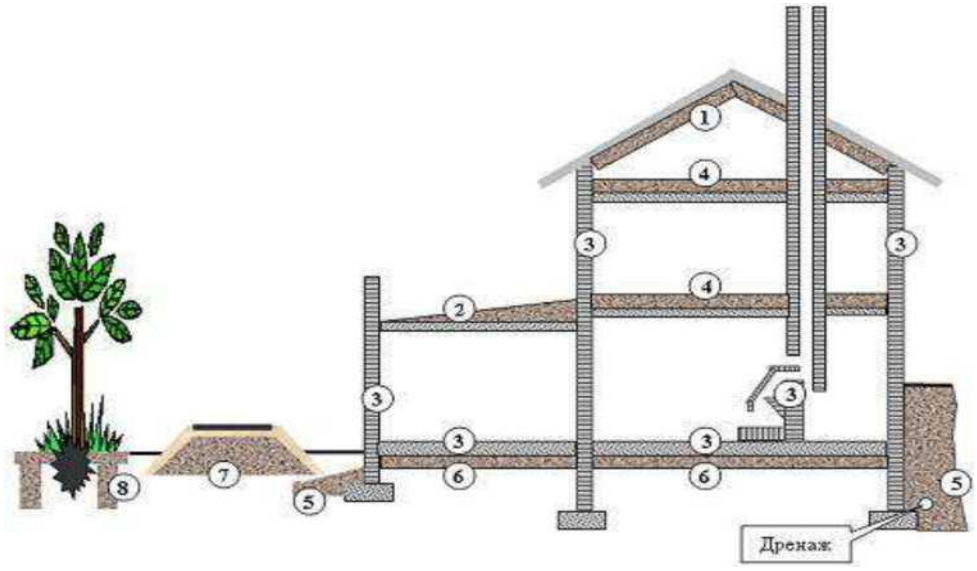


Рисунок 1.5 - Застосування піноскла для будівельної теплоізоляції :
1 – утеплення покрівлі; 2 – організація ухилів покрівлі; 3 - утеплення стін гранульованим піностеклом; 4 – утеплення міжповерхових перекриттів; 5 - утеплення фундаменту, дренажу та трубопроводів; 6 – утеплення перекриттів цоколя або плити підлоги; 7 - утеплення колодязів та приямків; 8 - утеплення коренів дерев піностеклом

Як теплова ізоляція піноскло найчастіше зустрічається в громадських та адміністративних будівлях, рідше в житлових, які можна розділити на такі категорії [42]:

- Будинки для тимчасового проживання людей (будинки готелів);
- Великопрогонові будівлі з плоскою та малоухильною покрівлею покрівлі (гіпермаркети, термінали аеропортів, складальні конвеєри, стадіони та спортивні майданчики);
- Будівлі висотою понад 75 метрів (головні відділення банків, корпорацій та фірм, інші офісні будівлі);
- Будівлі та споруди, що мають складні конструкції, криволінійні поверхні та оригінальні архітектурні рішення складної форми (спортивні комплекси, кінотеатри, громадські центри, технопарки);
- Будинки з історичними формою та фасадами (палаці, театри, університети, храми).

Високотемпературна ізоляція застосовується з метою скорочення тепло-втрат через огороджувальні конструкції теплових агрегатів та теплопроводів з робочою температурою до 450°С, економії цінної вогнетривкої сировини, теплового захисту будівельних конструкцій та обладнання від шкідливого впливу високих температур, інтенсифікації технологічних процесів, створення нормальних людей у гарячих цехах.

Холодоізоляція застосовується для ізоляції різноманітних холодильних установок приміщень та ємностей, усередині яких підтримується негативна температура.

Постійні коливання температури та вологості, агресивні умови, що сприяють конденсатоутворенню, та високі гігієнічні вимоги - все це тягне за собою особливі претензії до теплоізоляційного матеріалу. Далеко не кожен матеріал здатний ефективно працювати як холодоізолятор в таких жорстких умовах. Ізоляційний матеріал повинен бути непористим або містити тільки закриті пори, інакше волога конденсуватиметься всередині теплоізоляційного шару, і матеріал скоро втратить свої властивості. Закрита пористість,

вологонепроникність, бактеріологічна стійкість визначають найбільш ефективне застосування піноскла в якості холодоізоляції.

Крім того піноскло може застосовуватися як гідроізоляція (вологозахисне, що характеризується водопоглинанням за 360 діб не більше 1,8% за обсягом), тепло- та електроізоляції приладів і апаратів (безлужний і висококремнеземистий), фільтрату.

Мікрогранульоване піноскло застосовують як наповнювач для теплоізоляційних штукатурок, тампонажних розчинів; вирівнюючих стяжок, розчинів кладок, плиткових клеїв і шпаклівок, фарб і мастик. Також його застосовують як полегшуючий наповнювач для декоративних виробів.

Існують перспективні напрямки застосування піноскла [43-46]. Таким є виробництво високоміцного конструкційного теплоізоляційного піноскла, що виконує одночасно і несучі, і теплозахисні функції. Вироби з нього можуть замінити класичні багатошарові конструкції стін, що складаються з основного шару, що несе, в якості якого виступають цегла, блоки та ін, і шару теплоізоляції. Однак на вітчизняному ринку будівельних матеріалів піноскло з подібними характеристиками не представлене.

Перспективне використання глазурованого піноскла, поверхня якого вже має декоративний шар, що дозволяє відмовитися від нанесення штукатурних складів або конструкції вентильованого фасаду.

Інший напрямок полягає у розвитку піносклочних матеріалів спеціального призначення, що особливо захищають від електромагнітного та радіаційного випромінювання. Це пов'язано з тим, що кількість джерел електромагнітного випромінювання (електротранспорт, лінії електропередач, комп'ютери, супутниковий зв'язок і т.п.), що зростає, призводять до електромагнітного забруднення навколишнього середовища, що згубно впливає як на фізіологічний, так і на психологічний стан живих організмів [47].

1.5 Досвід застосування виробів із піноскла

1.5.1 Зарубіжний досвід

Теплоізоляція з піноскла є однією з найбільш затребуваних у Західній Європі, де за рік виробництво та споживання виробів із піноскла становить понад 1 млн. м^3. У Китаї понад 10 заводів, що виробляють піноскло, мають загальну продуктивну потужність понад 1,5 млн. м^3 на рік [48]. Така затребуваність піноскла матеріалу пов'язана не тільки з його перевагами, але і з явними недоліками мінеральної вати і пінополістиролу.

Побудована в Чехії, у місті Брно, в 1964 році висотна адміністративна будівля адміністрації виставкового комплексу (рис. 1.6) має каркас, що складається з залізобетону і сталі, і заповнення з піноскла.

Як заповнення огороджувальних конструкцій в даній будівлі було вибрано блокове піноскло чеського виробництва, далі ці блоки були облицьовані декоративними панелями.

Використання піноскла, що має поєднання таких технічних характеристик як низька щільність, висока механічна міцність, високий опір теплопередачі, стабільність властивостей у часі, разом із каркасною конструкцією будівлі призвели до створення легковагої, енергоефективної та надійної в експлуатаційному відношенні споруди.

Вибір у використанні піноскла як утеплення покрівлі, що експлуатується, не безпідставний. У порівнянні з іншими теплоізоляційними матеріалами воно має у 3-5 разів більше значення механічної міцності на стиск, що становить близько 1,5 МПа. Крім цього воно має високі гідроізоляційні здібності, так як воно водонепроникне, і пожежобезпекою.



Рисунок 1.6 - Будівля виставкового комплексу у Брно

У місті Брно крім будівлі виставкового комплексу піноскло застосовувалося і в інших будівлях та спорудах. Наприклад, у торговому центрі «Олімпія» воно було застосоване для теплоізоляції покрівлі, що експлуатується. Також блоковим піностеклом, що має високу температурну межу експлуатації близько +450-+500°С, було здійснено теплозахист конструкції димової труби однієї з ТЕС. Крім того, блокові вироби з піноскла знайшли місце в утепленні стінових, покрівельних конструкцій і цоколя приватної вілли.

Ще одним об'єктом в Брно, в якому знайшло застосування піноскло, є Моравська галерея, що є комплексом будівель, побудованих у другій половині 19 століття - початку 20 століття. У даній будівлі піноскло було використане при реконструкції як додаткова теплова ізоляція. Цей комплекс є історичним, і з метою збереження історичного вигляду фасаду утеплення проводилося з

внутрішньої сторони стін. У країнах Європи при реконструкції для утеплення стін зсередини перевага надається саме пеносклу завдяки його негорючості та гігієнічності (хімічній, бактеріологічній та біологічній стійкості, непрохідності для гризунів).

Серед міст Європи виділяється німецьке місто Франкфурт-на-Майні, яке насичене будинками та спорудами, утепленими піносклом. У великому відсотку значущих архітектурних об'єктах міста (починаючи від «Ейфелевої вежі» міста, міської домінанти - будівлі Commerzbank (рис. 1.7) і закінчуючи найвідомішою спорудою - найбільшим у світі аеропортом Франкфурта-на-Майні) застосовувалася теплова ізоляція з піносклочних матеріалів. вироблених на території Європи. Підставою такого вибору німецьких замовників, архітекторів і будівельників з'явилися все ті ж наведені вище переваги піноскла: довговічність експлуатації, стійкості до механічних впливів та впливу води та водяної пари, міцності та легкої ваги. Це більш ніж актуально щодо висотних будівель, що стоять на болотистому ґрунті у заплаві річки. Крім цього, за перше десятиліття 21 століття у Франкфурті-на-Майні піноскло було застосоване ще на 187 серйозних будівельних об'єктах.



Рисунок 1.7 - Будівля Commerzbank у Франкфурт-на-Майні

При реконструкції великопрогонових будівель і споруд, що мають велику площу покрівлі та значним навантаженням на несучі конструкції, поширена технологія демонтажу мінераловатного або полімерного утеплювача, що накопичив вологу, і монтування замість них покриття з блоків з піноскла.

Однією з таких споруд є побудована в 1982 році будівля олімпійського басейну в Люксембурзі. Спочатку воно мало теплоізоляцію покрівлі з мінераловатних та полімерних матеріалів. В результаті моніторингу, який регулярно проводився, було виявлено, що теплозахисні властивості теплоізоляційного шару покрівлі будівлі були повністю втрачені, і через 18 років експлуатації споруди в результаті накопичення вологи було відзначено значне збільшення навантаження на несучі конструкції будівлі. Для вирішення цієї проблеми було прийнято рішення замінити існуючі полімерні та мінераловатні матеріали з покрівлі басейну на водонепроникні та легкі блокові вироби з піноскла.

В області теплоізоляції покрівлі особливо актуальним стало застосування піноскла на покрівлях автомобільних конвеєрів, де площа становить сотні тисяч квадратних метрів і особливо важливими є питання вогнестійкості, не збільшення ваги теплоізоляційного шару та навантаження на несучі конструкції за час експлуатації покрівлі, стійкості утеплювача до впливу вологи. Більшість покрівель європейських автомобільних конвеєрів утеплені з використанням саме піноскла як теплоізоляційний матеріал.

Цікавим аспектом використання піноскла є теплоізоляція будівель готелів та готелів. Справа в тому, що необхідні характеристики експлуатації таких об'єктів суттєво відрізняються від звичайних житлових будинків. Є дві основні причини, через які замовники та архітектори в подібних спорудах як основний теплоізоляційний матеріал вибирають саме піноскло. По-перше, в готелях йде дуже інтенсивне споживання води, що проживає, що впливає на навантаження водяної пари на будівельні конструкції будівлі, особливо на матеріал теплоізоляційних шарів конструкцій, що огороджують.

Більше того, у готельному комплексі розташовуються пральні, басейни, сауни, кухні, які також додають навантаження водяної пари на теплоізоляційний матеріал. На сьогодні єдиним ефективним утеплювачем, здатним протистояти такому впливу, є піноскло. По-друге, до готелів виявляються жорсткіші протипожежні вимоги щодо застосовуваних будівельних матеріалів.

Матеріали не тільки не повинні горіти, але й у жодному разі не виділяти токсичних парів та газів при нагріванні до високих температур. Такі властивості знову ж таки притаманні лише піностеклу. І по-третє, готель має бути побудований так, щоб максимально подовжити термін між капітальними ремонтами об'єкта. Тому в Європі та Північній Америці відомі «брендові» готельні холдинги використовують у своїх будинках як теплоізоляційний матеріал найчастіше виключно піноскло.

Крім того, в останні два десятиліття по всій Європі набуло широкого розмаху будівництво пасивних будинків. На території Бельгії та Німеччини реалізовано безліч проектів, побудованих за технологією пасивного будинку, де для утеплення фундаментів було використано піноскло FOAMGLAS®.

Особливою проблемою при проектуванні пасивного будинку є якісне утеплення підошви та стін фундаменту матеріалом, який виконуватиме свої функції протягом усього терміну експлуатації об'єкта. Справа в тому, що в ґрунті та ґрунтових водах можуть міститися агресивні хімічні речовини, такі як частково галогенізовані вуглеводні, гумінові кислоти, які є продуктами розкладання мертвих організмів. Тому в умовах підвищеної вологості та агресивності ґрунтових вод необхідно, щоб теплоізоляція зберігала стабільні теплотехнічні характеристики, а також мала хімічну стійкість. Мало того, теплоізоляція повинна бути екологічною, мати високу міцність на стиск і здатність протистояти корінням рослин, мікроорганізмам, комахам і гризунам.

Одночасно всім вимогам, що пред'являються до теплоізоляції фундаментів, на даний момент відповідає тільки піноскло FOAMGLAS®. Тому вироби з піноскла FOAMGLAS® були сертифіковані інститутом «Пасивного Дому» (PHI) у Дармштадті як вироби, які можуть

використовуватися для будівництва пасивного будинків. Утеплення підошви та стін фундаменту – основна сфера застосування піноскла FOAMGLAS® у конструкціях пасивного будинку.

Одним із таких проектів, реалізованих на території Бельгії, є вілла, збудована у селі Бельселі (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 - Вілла у селі Бельселі

Найбільшим із побудованих у Німеччині об'єктів є навчальний центр у місті Неккаргермюнд (земля Баден-Вюнтенберг) (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 - Навчальний центр у Неккаргермюнді

Вивчаючи питання зарубіжного застосування піноскла як утеплювача, слід зазначити, що в Європейському Союзі воно є визнаним і одним із найефективніших теплозахисних будівельних матеріалів.

Параметри будівельного піноскла обумовлені у загальноєвропейському спеціальному нормативно-технічному документі EN 13167-2015 Thermal insulation products for buildings - Factory made cellular glass (CG) products.

1.5.2 Вітчизняний досвід

Слід зазначити український позитивний досвід використання піноскла. Наприклад, для утеплення більшості будівель, що реанімуються і знову зводяться в центрі Києва використовується європейське і білоруське піноскло. За останні кілька років понад п'ять десятків великих та соціально значущих будівель там утеплено із застосуванням піноскла.

В Україні піноскло власного виробництва активно застосовувалося для теплоізоляції будівель та зокрема покрівель. І в наші дні при оцінці балансу ціна-якість теплоізоляції найбільш відповідальних об'єктів застосовується бельгійське піноскло.

Найбільшого поширення набуло застосування піноскла в якості теплоізоляції покрівлі при будівництві та реконструкції будівель (рис. 1.10 – 1.11).



Рисунок 1.10 - Житловий комплекс, м.Київ, вул. Грушевського, 9а

Теплоізоляційний матеріал - піноскло, домінує в таких галузях, як хімічна та нафтохімічна (завдяки стійкості до кислотно-лужного та впливу активних вуглеводневих рідин та газів), а також у харчовій та фармакологічній промисловостях (завдяки своїй унікальній санітарно-гігієнічній безпеці). — на 100% складається із звичайного силікатного скла та екологічної чистоти).

У цих сферах піноскло застосовується не тільки для теплоізоляції будівель та споруд, але й для теплозахисту обладнання, механізмів та агрегатів. Фактично безальтернативно воно у атомної промисловості, т.к. має найвищий клас пожежної безпеки та вогнестійкості серед усіх класичних будівельних теплоізоляційних матеріалів.

Однак нині в Україні спостерігається дефіцит піноскла через відсутність нормативної та правової бази. За розрахунками виробників, дефіцит становить близько 70 тис. $м^3$ на рік, що у 50 разів більше фактично виробленого піноскла.



Рисунок 1.11 - Піноскло в конструкції покрівлі

1.6 Висновки за першим розділом

Аналіз літературних даних щодо застосування ефективних теплоізоляційних виробів із піноскла показав:

1. Переваги застосування піноскляної ізоляції перед широко поширеними мінераловатними та пінополістирольними теплоізоляційними матеріалами.

2. Широкий спектр застосування піноскла в конструкціях будівель та споруд. Його можливість застосування в покрівельних, стінових конструкціях, фундаментах, конструкціях підлог та басейнів та інших конструкціях. Крім того, використання фасонних елементів з піноскла для ізоляції різних трубопроводів, резервуарів, контейнерів, труб ТЕС та інших інженерних споруд.

3. Застосування піноскла охоплює всі галузі, котрим може бути здійснено будівництво. Це такі галузі як: цивільне будівництво (житлові будівлі, адміністративні будівлі, громадські будівлі, у тому числі спортивні об'єкти, готелі та ін.), промислове будівництво (нафтовидобувна, хімічна, фармакологічна, харчова, сільськогосподарська та ін. промисловість).

4. Використання піноскла в Україні значно відстає від темпів його застосування у зарубіжних країнах. Проте на території нашої країни будуються підприємства щодо його виробництва. Поява заводів свідчить про наявність попиту даний теплоізоляційний матеріал, отже, і тому, що застосування піноскла перспективно.

РОЗДІЛ 2
ТЕОРІЯ ТЕПЛОФІЗИКИ ТА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ

2.1 Механізми теплопередачі

Теплопередачею називають фізичний мимовільний необоротний процес перенесення енергії у формі теплоти від гарячішого тіла до менш гарячого в просторі або безпосередньо (при контакті), або через перегородку, що розділяє (тіла або середовища) з якого-небудь матеріалу. Теплообмін здійснюється трьома способами.

У твердих тілах основним способом передачі теплової енергії є теплопровідність, у рідинах та газах - конвекція, у вакуумі та деяких газах - випромінювання. Як правило, теплопередача майже завжди здійснюється, одночасно поєднуючи декілька способів.

Процес теплообміну нерозривно пов'язаний з процесом перенесення маси речовин різної концентрації з одного середовища до іншого в різних точках простору. У системі, де фізичні тіла перебувають за різної температури, тепломасообмін протікає незворотно до встановлення термодинамічного рівноваги. Внаслідок другого закону термодинаміки, мимовільна передача тепла завжди походить від гарячішого тіла до менш гарячого.

2.1.1 Теплопровідність

Теплопровідність – це молекулярне перенесення енергії (теплоти) при безпосередньому контакті більш нагрітих частин тіла (або середовища) з менш нагрітими частинами тіла (або середовища), обумовлене тепловим хаотичним рухом мікрочастинок (молекул, атомів, електронів тощо). Даний теплообмін може відбуватися в будь-яких тілах за наявності градієнта температури і без макроскопічних переміщень речовини, але механізм перенесення теплоти залежатиме від агрегатного стану речовини.

Процес теплопровідності супроводжується розподілом температури всередині тіла у просторі та у часі.

Аналітичне дослідження теплопровідності полягає у вивченні зміни температури у просторово-часових межах, що описуються рівнянням:

$$t = f(x,y,z,\tau), \tag{2.1}$$

де x, y, z – просторові координати в декартовій системі;

τ - час.

Теплові поля можуть бути двох видів: стаціонарними та нестаціонарними. Якщо температура тіла залежить від координат і не змінюється з часом, то поле називається стаціонарним. При температурі, яка залежить від часу, поле називається нестаціонарним.

Рівняння (2.2) описує математичний вираз температурного поля, яке є сукупністю значень температури в даний момент часу для всіх точок досліджуваного простору, тобто стаціонарне температурне поле.

$$T = f(x,y,z). \tag{2.2}$$

При цьому $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$, тобто з часом температура залишається незмінною.

Градієнт температури є вектором, спрямованим до ізотермічної поверхні, де відбувається найбільший перепад температур на одиницю довжини:

$$\text{grad}T = n_0 \frac{\partial T}{\partial n} = \bar{\imath}\frac{\partial T}{\partial x} + \bar{\jmath}\frac{\partial T}{\partial y} + \bar{k}\frac{\partial T}{\partial z}, \tag{2.3}$$

де n_0 - одиничний вектор, спрямований нормалі до ізотермічної поверхні у бік зростання температури;

$\frac{\partial T}{\partial n}$ - похідна температури за напрямом цієї нормалі до ізотермічної

поверхні;

$\bar{\imath},\bar{\jmath},\bar{k}$ до - ортогональні між собою вектори одиничної довжини, спрямовані координатними осями.

Щільність теплового потоку є величиною, чисельно рівну кількості тепла, що проходить за одиницю часу через одиницю площі[50], визначається за формулою:

$$q = \frac{Q}{F}, \tag{2.4}$$

де Q – кількість теплоти, Вт;

F – площа, м^2.

В основу теорії теплопровідності увійшли роботи Фур'є, виконані ним на початку XIX століття. Рівняння теплопровідності твердого тіла описується згідно із законом Фур'є [50]:

$$q = -\lambda * n_0 \frac{\partial T}{\partial n} = -\lambda * gradT, \tag{2.5}$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності, Вт / (м * К).

Диференціальне рівняння температурного поля Фур'є для стаціонарного режиму має вигляд [50]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0, \tag{2.6}$$

Внаслідок того, що процес нагрівання твердого тіла є складним фізичним процесом, при якому зміна величин відбувається у просторі та часі, кореляція між цими величинами представляє дуже трудомісткий процес.

2.1.2 Коефіцієнт теплопровідності матеріалу

Коефіцієнт теплопровідності λ, Вт/(м°С) є однією з основних теплових характеристик матеріалу, який відображає властивість речовини проводити тепловий потік q, Вт, через 1 м^2 площі. Чим більше значення λ, тим інтенсивніше матеріал проводить тепло. Тому теплоізоляційними матеріалами прийнято вважати матеріали з коефіцієнтом теплопровідності менше ніж 0,3 Вт/(м°С).

Коефіцієнт теплопровідності значною мірою залежить від стану вологості матеріалів. У свою чергу на вологий стан конструкції впливає кліматичні умови району будівництва та вологий режим приміщень, з цього за ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель» виділяють два типи умов експлуатації огороджувальних конструкцій: А та Б [52].

2.1.3 Стаціонарний режим тепломасоперенесення

Одним із визначальних факторів, що впливає на проектування теплового режиму приміщень будівлі, є передача теплоти через зовнішні огороджувальні конструкції.

При стаціонарному режимі тепломасопереносу відбувається процес теплопередачі, коли розподіл температур в огорожах змінюється за координатами, але залишається постійним за часом.

Для аналізу даного процесу розроблені прості аналітичні прийоми, що дозволяють визначати термічний опір теплопередачі, а, отже, і кількість теплоти, що передається від внутрішнього повітря зовнішньому середовищі однорідних і складних конструкцій, що захищають, за наявності повітряних прошарків і з урахуванням вологопровідності і повітропроникності[53].

2.1.4 Умови однозначності

Для повного математичного опису конкретного процесу теплопровідності необхідно задати умови однозначності або крайові умови завдання разом із диференціальним рівнянням [50].

Умови однозначності описують параметри конкретного завдання, а саме:

- Геометричні умови, що характеризують форму та розміри тіла;
- Фізичні умови, що характеризують фізичні властивості тіла (X, c, p та ін) та їх залежність від температури;
- Початкові умови, тобто. температурне поле в тілі в початковий час. Зокрема температура тіла в момент часу t = 0 може бути задана як постійна величина для всіх точок тіла. Для стаціонарної теплопровідності початкові умови немає сенсу;
- Граничні умови, що характеризують вплив довкілля на поверхню тіла.

2.1.5 Граничні умови поверхні досліджуваного об'єкта

Для вирішення диференціальних завдань теплопередачі граничних умов можуть бути задані трьома способами.

Граничне умови першого роду - розподіл температури лежить на поверхні тіла сприймається як функція часу. У найпростішому випадку температура може бути задана як постійна величина у всіх її точках і не змінюватись у часі.

Граничною умовою другого роду є математична модель, в якій розподіл густини теплового потоку на межах тіла є функцією часу. Зокрема, ця величина може бути постійною всім точок поверхні і змінюватися в часі.

Гранична умова третього роду, це ускладнений вид граничної умови першого роду, де початковою умовою є задана температура тіла, наступний

теплообмін між поверхнею та навколишнім середовищем протікає за законом Ньютона - Ріхмана:

$$q = \alpha*(T_{int} - T_{ext}), \quad (2.8)$$

де а - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м^2*К), що характеризує інтенсивність теплообміну між поверхнею тіла і навколишнім середовищем;

T_{int} -температура внутрішнього повітря, °С;

T_{ext}-температура зовнішнього повітря, °С

2.2 Методика теплотехнічного розрахунку

При проектуванні будівель у холодних умовах є потреба у використанні теплоізоляційних матеріалів. При цьому прийняті рішення повинні бути оптимальними і економічними, оскільки недостатній теплоізоляційний шар призведе до втрат тепла через конструкцію, що захищає, і, як наслідок, значним витратам на опалення, і з іншого боку застосування зайвої товщини теплоізоляційного шару призведе до необґрунтованих витрат на матеріал. Для підбору оптимальної товщини теплоізоляційного шару існує методика, описана у ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель» [52], та заснована на загальній теорії теплопровідності.

Відповідно до методики мають бути задані такі параметри:

- Розрахункова температура зовнішнього повітря, $t_з$,^{o}С, із забезпеченістю 0,92, визначається за [54];
- Розрахункова температура внутрішнього повітря, $t_в$, ^{0}С;
- Відносна вологість внутрішнього повітря, φ_{int},%;
- Коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні, $\alpha_з$, Вт/(м^2^{o}С) огородження;
- Коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні, $\alpha_в$, Вт/(м^2^{o}С) огородження;

▪ тривалість опалювального періоду, $z_{оп}$,діб (з середньодобовою температурою зовнішнього повітря трохи більше 8°С), обумовлена по [54];

▪ середня температура зовнішнього повітря протягом опалювального періоду, $t_{оп}$, °С

▪ Товщина шару огороджувальної конструкції δ_s, м;

▪ Розрахункова теплопровідність матеріалу шару λ_s, Вт/(м°С), у разі відсутності даних приймається за додатком Т [52].

Нормативне значення наведеного опору теплопередачі огороджувальної конструкції визначається за формулою:

$$R_0^{норм} = R_0^{необ} * m_p, \quad (2.9)$$

де $R_0^{необ}$ - базове значення необхідного опору теплопередачі огороджувальної конструкції, м^2°С/Вт, що визначається за формулою 10;

m_p - коефіцієнт, що враховує особливості регіону будівництва. У розрахунку за формулою (1) приймається рівним 1.

Звідси $R_0^{норм} = R_0^{необ}$.

$$R_0^{необ} = a * ГДОП + b, \quad (2.10)$$

де a, b - коефіцієнти, значення яких слід набувати за даними таблиці 3 [52] залежно від типу будівлі та виду огороджувальної конструкції.

ГДОП - градусо-доба опалювального періоду, °С доба/рік, для конкретного пункту, що визначається за формулою:

$$ГДОП = (t_{ві} - t_{от})*z_{от}, \quad (2.11)$$

де $t_{от}$, $z_{от}$ - середня температура зовнішнього повітря, ° С, і тривалість, доба/рік, опалювального періоду, що приймаються по [54] для житлових та громадських будівель для періоду із середньодобовою температурою

зовнішнього повітря не більше 8 ° С;

$t_{вi}$ - розрахункова температура внутрішнього повітря в і-му типі приміщень будівлі, °С.

Умовний опір теплопередачі однорідної частини фрагмента теплозахисної оболонки будівлі і-го виду, м^2°С./Вт, яка визначається за формулою:

$$R_0^{\text{пр}} = R_0^{\text{ум}} * r = \left(\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \sum R_s + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}\right) * r, \quad (2.12)$$

де $\alpha_{\text{в}}$ - коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні огороджувальної конструкції, Вт/(м^2°С);

$\alpha_{\text{н}}$ - коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні огороджувальної конструкції, Вт/(м^2°С);

$\sum R_s$- термічний опір шару однорідної частини фрагмента Вт/(м^2°С) /Вт, що визначається за формулою:

$$R_s = \frac{\delta_s}{\lambda_s}, \quad (2.13)$$

δ_s - товщина шару, м;

λ_s - розрахункова теплопровідність матеріалу шару, Вт/(м°С).

Температурний перепад між температурою внутрішнього повітря $t_{\text{в}}$ та температурою внутрішньої поверхні до огороджувальної конструкції визначається за формулою :

$$\Delta t = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{з}}}{R_0^{\text{ум}} \alpha_{\text{в}}}, \quad (2.14)$$

де $\alpha_{\text{в}}$ - те саме, що і у формулі (2.12);

$t_{\text{в}}$ - те саме, що у формулі (2.11);

$t_{\text{з}}$ - розрахункова температура зовнішнього повітря в холодний період

року, °С, що приймається рівною середній температурі найбільш холодної п'ятиденки забезпеченістю 0,92 [54];

$R_0^{ум}$ - умовний опір теплопередачі, що визначається за формулою 2.12.

Температура на внутрішній поверхні огороджувальної конструкції визначається за формулою:

$$t_0 = t_в - \Delta t, \quad (2.15)$$

де $t_в$ - те саме, що у формулі (2.11);

Δt - температурний перепад між температурою внутрішнього повітря $t_в$ та температурою внутрішньої поверхні до огороджувальної конструкції, що визначається за формулою 2.14.

2.3 Моделювання процесів теплоперенесення

Через складність, тривалість і дорожнечу натурних досліджень процесів теплоперенесення, все більшого поширення набуває їх моделювання.

Моделювання може бути поділено на два методи: фізичне моделювання або метод подібності та математичне моделювання.

У цій роботі перевага надається математичному моделюванню, тобто дослідженню впливу певних параметрів на ідеальній моделі шляхом вирішення систем диференціальних рівнянь із заданими граничними умовами.

В силу того, що елементи кріплення теплоізоляційних матеріалів до стінових конструкцій є неоднорідними включеннями, відбувається спотворення теплових потоків і ускладнюється розрахунок. У зв'язку з цим виникає необхідність застосування математичного моделювання в програмних комплексах, наприклад, COMSOL Multiphysics.

2.3.1 Методика проведення теоретичних розрахунків будівельних конструкцій із використанням програми «COMSOL Multiphysics»

Програмний комплекс «COMSOL Multiphysics» є програмним забезпеченням з потужним інтерактивним середовищем, що дозволяє проводити розрахунки різних наукових та інженерних завдань, заснованих на диференціальних рівняннях методом кінцевих елементів.

Програма дозволяє використовувати одне диференціальне рівняння для розрахунку пов'язаних між собою фізичних явищ завдяки змісту більше 30 додаткових розрахункових модулів. Програма заснована на системі диференціальних рівнянь у приватних похідних. Розрахунок не потребує глибокого знання математичної фізики та методу кінцевих елементів. Це можливо завдяки вбудованим фізичним режимам, де коефіцієнти PDE задаються як зрозумілі фізичні властивості та умови, такі як: теплопровідність, теплоємність, коефіцієнт тепловіддачі, об'ємна потужність тощо. залежно від обраного фізичного розділу [55].

Існує три математичні способи завдання таких систем:

- Коефіцієнтна форма, призначена для лінійних та близьких до лінійного вигляду моделей;
- Генеральна форма – для нелінійних моделей;
- Слабка форма (Weak form), для моделей з PDE на кордонах, ребрах або для моделей, що використовують умови зі змішаними та похідними за часом. Застосовуючи ці способи, можна використовувати різні типи аналізу: стаціонарний, лінійний та нелінійний, а також модальний аналіз та аналіз власних частот [55].

За допомогою програми COMSOL Mutiphysics були знайдені теплові потоки через огороджувальні конструкції з різними видами теплоізоляційного матеріалу з урахуванням кріплення цих матеріалів до несучих конструкцій стін. Для визначення значення теплових потоків через вузли кріплення були зроблені такі дії:

1. Визначено тип створюваної моделі;
2. Розроблено геометрію моделі;
3. Вказано граничні умови;
4. Задано теплофізичні властивості;
5. Задано параметри сітки елементів та її побудову;
6. Налаштовано параметри розрахунку та запущено розрахунок;
7. Налаштовано режим відображення результатів розрахунку;
8. Проведено аналізи отриманих результатів.

2.3.2 Методика розрахунку тепловтрат будівлі через огороджувальні конструкції за опалювальний період

Після визначення теплових втрат через однорідні та неоднорідні огороджувальні конструкції необхідно розрахувати сукупні тепло втрати за опалювальний період. Цей розрахунок здійснюється за методикою, описаною в [52].

Загальні тепловтрати будівлі за опалювальний період через огороджувальні конструкції $Q_{\text{заг}}^{\text{рік}}$, кВгод/рік, визначаємо за формулою:

$$Q_{\text{заг}}^{\text{рік}} = 0{,}024 * \text{ГДОП} * \text{V}_{\text{оп}} * \text{k}_{\text{об}}, \qquad (2.16)$$

де ГДОП - те саме, що в (2.11);

$\text{V}_{\text{оп}}$ - опалювальний об'єм будівлі, м^3;

$\text{k}_{\text{об}}$ - питома теплозахисна характеристика будівлі Вт/(м^3°С).

Питома теплозахисна характеристика будівлі, $k_{об}$, Вт/(м^3°С), розраховується за формулою :

$$k_{об} = \frac{1}{V_{оп}} * \sum \left(n_{t,i} * \frac{A_{Ф,i}}{R_{о,i}^{нав}} \right), \quad (2.17)$$

де $R_{о,i}^{нав}$ - наведений опір теплопередачі і-го фрагмента теплозахисної оболонки будівлі (м2 ^ ° С) / Вт;

$A_{Ф,i}$ - площа відповідного фрагмента теплозахисної оболонки будівлі, м2;

$V_{оп}$ - те саме, що і у формулі 2.16;

$n_{t,i}$ - коефіцієнт, що враховує відмінність внутрішньої або зовнішньої температури у конструкції від прийнятих у розрахунку, що визначається за формулою :

$$n_{t,i} = \frac{t_{в.i} - t_{оп}}{t_{в.1} - t_{оп}}, \quad (2.18)$$

де $t_{в.i}$ - середня температура внутрішнього повітря для даного приміщення, °С;

$t_{в.1}$ - середня температура внутрішнього повітря приміщення, прийнятого за основне, °С;

$t_{оп}$ - те саме, що і у формулі 2.11.

2.4 Висновки за другим розділом

1. Існуюча та описана в нормативній документації методика розрахунку теплових потоків важко застосовується для ручного розрахунку складних конструкцій з неоднорідними включеннями. Тим не менш, ця методика є прийнятною для попереднього завдання товщини теплоізоляційного шару без урахування його кріплення.

2. Для визначення теплових потоків з неоднорідними включеннями (лінійними та точковими) зручно використовувати математичне моделювання, наприклад, у програмному комплексі COMSOLMutiphysics.

3. На даних теплових потоках, отриманих у програмному комплексі COMSOLMutiphysics, можна проводити подальший розрахунок теплових втрат будівлі за рік за методикою.

РОЗДІЛ 3
ДОСЛІДЖЕННЯ, СПРЯМОВАНІ НА ПОРІВНЯННЯ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ПОЗИЦІЇ ЕНЕРГО- ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

3.1 Розрахунок теплових втрат будівлі

Розрахунок теплових втрат визначаємо на прикладі запроектованої моделі двоповерхового одноквартирного житлового будинку (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 - Модель будівлі

1. Наведений опір теплопередачі зовнішньої огороджувальної конструкції має бути не меншим за нормоване значення $R_0^{\text{норм}}$ (поелементний вимоги);

2. Питома теплозахисна характеристика будівлі повинна бути не

більшою за нормоване значення (комплексна вимога);

3. Температура на внутрішніх поверхнях огороджувальних конструкцій повинна бути не нижчою від мінімально допустимих значень (санітарно-гігієнічна вимога).

Розрахункові параметри зовнішнього та внутрішнього середовища представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Розрахункові параметри зовнішнього та внутрішнього середовища

Параметри	Значення параметрів
Розрахункова температура зовнішнього повітря, $t_з$, С, із забезпеченістю 0,92	-25
Розрахункова температура внутрішнього повітря, $t_в$, °С: - житлові кімнати, вітальня - (1) - кухня - (2) - санвузол, ванна-(3) - тамбур, коридор, хол - (4) - гараж, комора, ІТП - (5)	 +23 +20 +24 +18 +5
Відносна вологість внутрішнього повітря, φ_{int},%: - (1); - (2); - (3); - (4); - (5)	 55% 60% 65% 55% 50%
Температура точки роси tp, °С: - (1); - (2); - (3); - (4); - (5)	 13,48 12,0 17,02 8,83 -4,03
Коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні, $\alpha_н$, Вт/(м^2°С) стінового огородження	23
Коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні, $\alpha_в$, Вт/(м^2°С) стінового огородження	8,7
Тривалість опалювального періоду, $z_{от}$,доба(з середньодобовою температурою зовнішнього повітря не більше 8°С)	235

продовження таблиці 3.1

Середня температура зовнішнього повітря протягом опалювального періоду, $t_{оп}$, °С	-6,5
Вологісний режим експлуатації приміщень: - (1); - (2); - (3); - (4); - (5)	 нормальний нормальний вологий нормальний сухий
Зона вологості	Суха
Умови експлуатації огороджувальних конструкцій	А (1, 2, 4, 5) Б (3)

Градусо-доба опалювального періоду, визначена за формулою 2.11:

за умови (1):

ГДОП = (23 - (-6,5)) * 195 = 6933 [°С*доб]

$R_0^{тр}$ = 0,00035 * 6933 + 1,4 = 3,83 °С/Вт;

за умови (2):

ГДОП = (20 - (-6,5)) * 195 = 6228 [°С*доб]

$R_0^{тр}$ = 0,00035 * 6228 + 1,4 = 3,58 °С/Вт;

за умови (3):

ГДОП = (24 - (-6,5)) * 195 = 7168 [°С*доб]

$R_0^{тр}$ = 0,00035 * 7168 + 1,4 = 3,*1* 1 °С/Вт;

за умови (4):

ГДОП = (18 - (-6,5)) * 195 = 5758 [°С*доб]

$R_0^{тр}$= 0,00035 * 5758 + 1,4 = 3,42 °С/Вт;

за умови (5):

ГДОП = (5 - (-6,5)) * 195 = 2703 [°С*доб]

$R_0^{тр}$= 0,00035 * 2703 + 1,4 = 2,3 5 °С/Вт.

Підбір товщини теплоізоляційного шару стінових, покрівельних цокольних конструкцій та конструкції перекриття техпідпілля виробляємо у відповідність до методики. Також визначаємо конструкції заповнень отворів.

3.2 Розрахунок теплового потоку в COMSOL Multiphysics

Після попереднього підбору товщини теплоізоляційного шару визначаємо тепловий потік через конструкцію, що захищає, за допомогою програмного комплексу COMSOL Multiphysics. Для цього створюємо моделі стінової конструкції, задаючи параметри матеріалів та граничних умов. Також враховуємо рекомендації виробників теплоізоляційних матеріалів за видом та кількістю кріпильних елементів. Моделі стінової конструкції для трьох варіантів матеріалу теплоізоляційного шару та їх температурні поля наведено на рисунках 3.2-3.4.

Значення теплових потоків, обчислені за допомогою програмного комплексу COMSOL Multiphysics, наведено у таблиці 3.2.

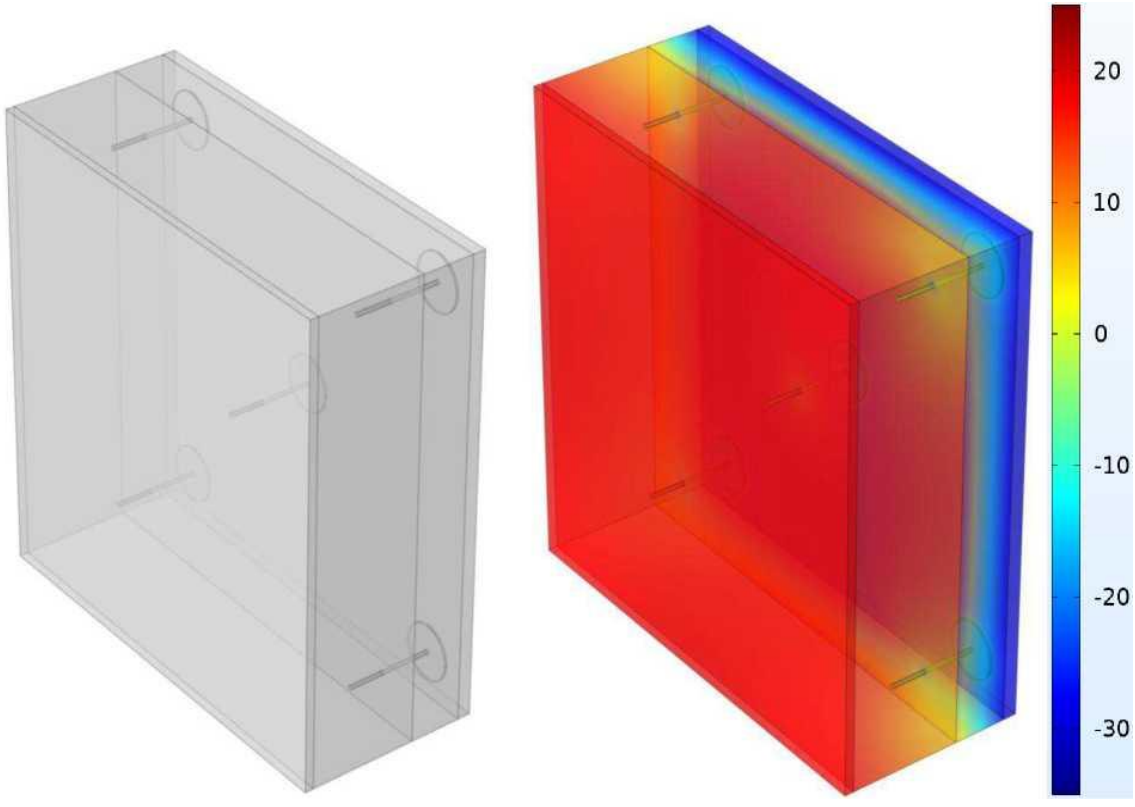


Рисунок 3.2 - Модель стінової конструкції з пінополістиролом та її температурне поле

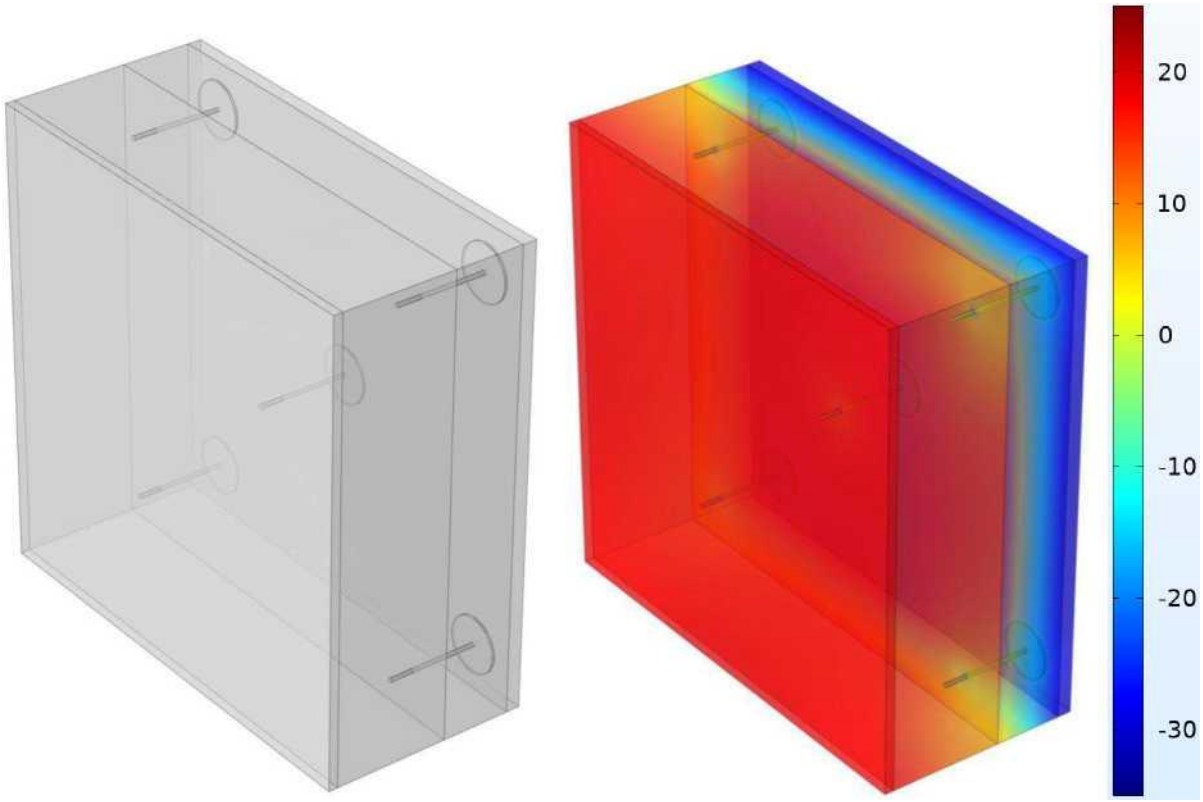


Рисунок 3.3 - Модель стінової конструкції з мінеральною ватою та її температурне поле

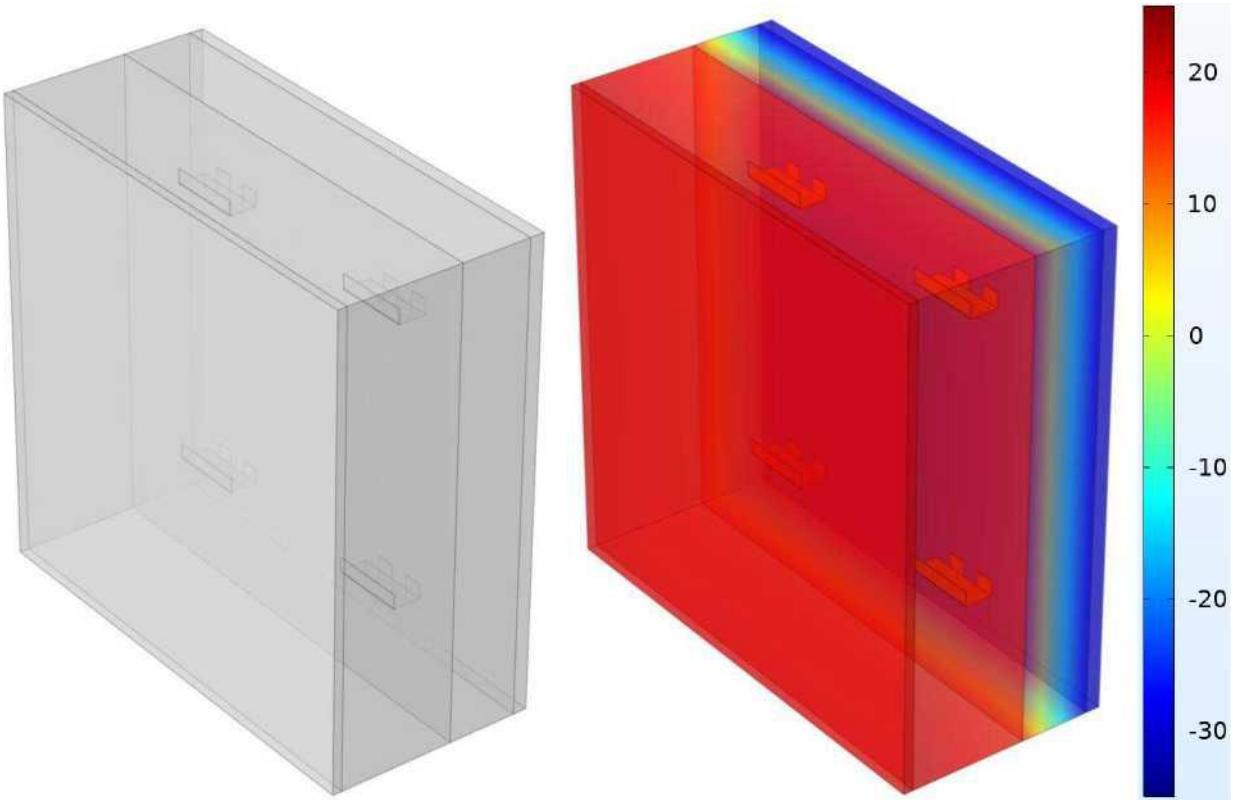


Рисунок 3.4 - Модель стінової конструкції з піностеклом та її температурне поле

Таблиця 3.2 - Максимальні та мінімальні температури поверхні та значення теплових потоків при різних температурах

Розрахункова температура внутрішнього повітря, °С	Пінополістирол			Мінеральна вата			Піноскло		
	t_{max}, °С	t_{min}, °С	q, Вт/м^2	t_{max}, °С	t_{min}, °С	q, Вт/м^2	t_{max}, °С	t_{min}, °С	q, Вт/м^2
+5 (гараж, комора, ІТП)	+3,5	-30,7	15,16	+3,5	-30,7	14,28	+3,9	-30,6	9,02
+18 (тамбур, коридор, хол)	+15,9	-30,5	20,63	+16,0	-30,5	19,43	+16,6	-30,5	12,27
+20 (кухня)	+17,9	-30,5	21,47	+17,9	-30,5	20,23	+18,5	-30,5	12,77
+23 (житлові кімнати, вітальня)	+20,7	-30,5	22,74	+20,8	-30,5	21,42	+21,5	-30,4	13,52
+24 (санвузол, ванна кімната)	+21,5	-30,5	24,79	+21,6	-30,4	23,47	+22,4	-30,4	13,99

Як видно з отриманих даних кріплення піноскла блоків за допомогою анкера прихованого кріплення, можливого завдяки міцності цих блоків, призводить до більш низьких теплових втрат, ніж при кріпленні мінераловатної та пінополістирольної теплоізоляції тарілчастими дюбелями. При цьому температури на внутрішніх поверхнях стін при кріпленні тарілчастим дюбелем пінополістиролу та мінеральної вати дещо нижче за розрахункові значення, отримані в п.3.3.1 та 3.3.2 відповідно, тоді як температура на внутрішній поверхні стіни з піностеклом дещо майже не відрізняється від розрахункових значень, отриманих у п.3.3.1 та 3.3.3.

3.3 Розрахунок тепловтрат будівлі через огороджувальні конструкції за опалювальний період

Загальні тепловтрати будівлі за опалювальний період через

огороджувальні конструкції $Q_{\text{заг}}^{\text{рік}}$, кВт*год/рік, визначаємо за формулою 2.16, питому теплозахисну характеристику будівлі, $k_{об}$, Вт/(м^3°С), розраховуємо за формулою 2.17.

За базову середню температуру внутрішнього повітря приймаємо температуру, яка відповідає умові експлуатації (1), тобто. для житлових приміщень $t_{\text{в.1}}$ = 23°С.

- за умови (2):

$$n_{t,2} = \frac{20 - (-6{,}5)}{23 - (-6{,}5)} = 0{,}898.$$

- за умови (3):

$$n_{t,3} = \frac{24 - (-6{,}5)}{23 - (-6{,}5)} = 1{,}034.$$

- за умови (4):

$$n_{t,4} = \frac{18 - (-6{,}5)}{23 - (-6{,}5)} = 0{,}831.$$

- за умови (5):

$$n_{t,5} = \frac{5 - (-6{,}5)}{23 - (-6{,}5)} = 0{,}39.$$

Теплотехнічні характеристики будівлі, необхідні для розрахунку питомої теплозахисної характеристики будівлі, представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Теплотехнічні характеристики будівлі

Параметр	Разом
Опалюваний обсяг $V_{оп}$, м^3	602,62
Сума площ поверхів будівлі $A_{от}$, м^2	188,88
Площа житлових приміщень $A_{ж}$, м^2	69,69
Розрахункова кількість мешканців $m_{м}$, чол.	5

Продовження таблиці 3.3

Параметр	Разом
загальна площа зовнішніх ОК $А_н^{сум}$, м^2	532,28
з них фасадів будівлі$А_{фас}$., м^2	309,76
у тому числі:	
площа стін житлової частини будівлі $А_{ст}$., м^2	260,96
площа вікон та балконних дверей $А_{вік}$., м^2	36,75
площа вхідних дверей $А_{дв}$., м^2	12,05
площа експлуатованого покриття, $А_{покр1}$., м^2:	22,77
площа неексплуатованого покриття, $А_{покр2}$., м^2:	96,31
площа перекриття над підпіллям, $А_{цок}$., м^2	103,44

3.3.1 Розрахунок тепловтрат будівлі через огороджувальні конструкції за опалювальний період варіанта утеплення пінополістиролом

Розрахунок питомої теплозахисної характеристики робимо в табличній формі (табл. 3.4).

$$k_{об} = \frac{1}{602,62} * 136,76 = 0,227 \frac{Вт}{м^3 °С}$$

$$Q_{заг}^{рік} = 0,024 * 6933 * 602,62 * 0,227 = 22754 \text{ кВт*год/рік.}$$

Перекладаємо тепловтрати будівлі у Гкал/рік (1 кВт*год = 0,00086 Гкал).

$Q_{\text{заг.}}^{\text{рік}}$ = 19,57 Гкал .

Таблиця 3.4 - Розрахунок питомої теплозахисної характеристики при утепленні пінополістиролом

Найменування фрагмента	$n_{t,i}$	$A_{ф,i}$, м^2	$R_{o,i}^{нав}$, $\frac{м^2°C}{Вт}$	$n_{t,i} * \frac{A_{Ф,i}}{R_{o,i}^{нав}}$ Вт/°С	%
Стінова огорожа	1,000	127,38	2,37	53,75	29,6%
	0,898	9,04	2,38	3,41	1,9%
	1,034	26,00	2,22	12,11	6,7%
	0,831	50,90	2,38	17,76	9,8%
	0,390	47,63	2,37	7,84	4,3%
Експлуатоване покриття	0,390	22,77	4,08	2,18	1,2%
Неексплуатоване покриття	1	56,73	6,08	9,33	5,1%
	1,034	14,25	5,86	2,51	1,4%
	0,831	25,33	6,08	3,46	1,9%
Перекриття над техпідпілля	1,000	16,94	5,37	3,15	1,7%
	0,898	11,81	5,37	1,98	1,1%
	1,034	6,01	5,19	1,20	0,7%
	0,831	34,36	5,37	5,31	2,9%
	0,390	34,32	3,7	3,62	2,0%
Вікна	1	23,39	0,75	31,19	17,2%
	0,898	3,36	0,75	4,02	2,2%
	0,831	10,00	0,75	11,08	6,1%
Вхідні двері	0,831	3,27	0,8	3,39	1,9%
	0,39	8,79	0,8	4,28	2,4%
Сума		532,28		181,57	100,0%

3.3.2 Розрахунок тепловтрат будівлі через огороджувальні конструкції за опалювальний період варіанта утеплення мінеральною ватою

Розрахунок питомої теплозахисної характеристики робимо в табличній формі (табл. 3.5).

$$k_{\text{об}} = \frac{1}{602{,}62} * 139{,}45 = 0{,}231 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3\text{°С}}$$

$$Q_{\text{заг}}^{\text{рік}} = 0{,}024 * 6933 * 602{,}62 * 0{,}231 = 23202 \text{ кВт*год/рік.}$$

Перекладаємо тепловтрати будівлі у Гкал/рік (1 кВт*год = 0,00086 Гкал).

Таблиця 3.5 – Розрахунок питомої теплозахисної характеристики будівлі при утепленні мінеральною ватою

Найменування фрагмента	$n_{t,i}$	$A_{\text{ф},i}$, м^2	$R_{\text{о},i}^{\text{нав}}$, $\frac{\text{м}^2\text{°С}}{\text{Вт}}$	$n_{t,i} * \frac{A_{\text{Ф},i}}{R_{\text{о},i}^{\text{нав}}}$, Вт/°С	%
Стінова огорожа	1,000	127,38	2,52	50,55	28,7%
	0,898	9,04	2,52	3,22	1,8%
	1,034	26,00	2,34	11,49	6,5%
	0,831	50,90	2,52	16,78	9,5%
	0,390	47,63	2,52	7,37	4,2%
Експлуатоване покриття	0,390	22,77	4,08	2,18	1,2%
Неексплуатоване покриття	1	56,73	6,22	9,12	5,2%
	1,034	14,25	5,81	2,54	1,4%
	0,831	25,33	6,22	3,38	1,9%

Перекриття над техпідпілля	1,000	16,94	5,37	3,15	1,8%
	0,898	11,81	5,37	1,98	1,1%
	1,034	6,01	5,19	1,20	0,7%
	0,831	34,36	5,37	5,31	3,0%
	0,390	34,32	3,7	3,62	2,1%
Вікна	1	23,39	0,75	31,19	17,7%
	0,898	3,36	0,75	4,02	2,3%
	0,831	10,00	0,75	11,08	6,3%
Вхідні двері	0,831	3,27	0,8	3,39	1,9%
	0,39	8,79	0,8	4,28	2,4%
Сума		532,28		175,84	100,0%

3.3.3 Розрахунок тепловтрат будівлі через огороджувальні конструкції за опалювальний період варіанта утеплення піностеклом

Розрахунок питомої теплозахисної характеристики робимо в табличній формі (табл. 3.6).

$$k_{\text{об}} = \frac{1}{602{,}62} * 141{,}24 = 0{,}234 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 °\text{C}}$$

$$Q_{\text{заг}}^{\text{рік}} = 0{,}024 * 6933 * 602{,}62 * 0{,}234 = 23500 \text{кВт*год/рік.}$$

Перекладаємо тепловтрати будівлі у Гкал/рік (1 кВт*год = 0,00086 Гкал).

Таблиця 3.6 - Розрахунок питомої теплозахисної характеристики при утепленні піностеклом

Найменування фрагмента	$n_{t,i}$	$A_{ф,i}$, м^2	$R_{о,i}^{нав}$, $\frac{м^2°C}{Вт}$	$n_{t,i} * \frac{A_{Ф,i}}{R_{о,i}^{нав}}$, Вт/°С	%
Стінова огорожа	1,000	127,38	3,99	31,93	22,3%
	0,898	9,04	3,99	2,04	1,4%
	1,034	26,00	3,93	6,84	4,8%
	0,831	50,90	3,99	10,60	7,4%
	0,390	47,63	3,99	4,65	3,2%
Експлуатоване покриття	0,390	22,77	4,08	2,18	1,5%
Неексплуатоване покриття	1	56,73	5,8	9,78	6,8%
	1,034	14,25	5,79	2,54	1,8%
	0,831	25,33	5,8	3,63	2,5%
Перекриття над техпідпілля	1,000	16,94	5,37	3,15	2,2%
	0,898	11,81	5,37	1,98	1,4%
	1,034	6,01	5,19	1,20	0,8%
	0,831	34,36	5,37	5,31	3,7%
	0,390	34,32	3,7	3,62	2,5%
Вікна	1	23,39	0,75	31,19	21,7%
	0,898	3,36	0,75	4,02	2,8%
	0,831	10,00	0,75	11,08	7,7%
Вхідні двері	0,831	3,27	0,8	3,39	2,4%
	0,39	8,79	0,8	4,28	3,0%
Сума		532,28		143,41	100,0%

3.4 Розрахунок класу небезпеки огороджувальної конструкції

Розгляд властивостей теплоізоляційного матеріалу, як і будь-якого іншого будівельного матеріалу, необхідний протягом усього життєвого циклу будівельної конструкції, у тому числі під час ремонтів та знесення, коли матеріали переходять у клас відходів.

Розгляд цього аспекту важливий з погляду екології, оскільки за сучасними нормами у будівництві повинні використовуватися матеріали, що не виділяють в атмосферу шкідливих речовин, які не впливають на організм людини, а також бути екологічно безпечними.

Відходи в залежності від ступеня негативного впливу на навколишнє середовище поділяються відповідно до критеріїв, встановлених федеральним органом виконавчої влади, що здійснює державне регулювання в галузі охорони навколишнього середовища, на п'ять класів небезпеки:

I клас – надзвичайно небезпечні відходи;

II клас – високонебезпечні відходи;

III клас – помірно небезпечні відходи;

IV клас – малонебезпечні відходи;

V клас - практично безпечні відходи.

Розглядаючи клас небезпеки теплоізоляційного шару необхідно враховувати його товщину, так як різні матеріали мають різне значення опору теплопередачі. Тому розраховуємо конструкцію, що захищає в цілому, щоб знайти відсоткове співвідношення класів небезпеки шарів і загальний клас небезпеки огороджувальної конструкції.

Для всіх трьох варіантів стінових конструкцій однакові значення товщин основного шару, що несе, з повнотілої глиняної цегли (250 мм) і зовнішніх (30 мм) і внутрішніх (20 мм) штукатурних шарів. Товщина теплоізоляційного шару з пінополістиролу становить 120 мм, з мінеральної вати та піноскла – 150 мм.

Відповідно до класифікаційного каталогу відходів відходи штукатурки

відносяться до IV класу небезпеки, брухт цегляної кладки - до V класу небезпеки, відходи пінополістиролу - до IV класу, відходи мінеральної вати - до IV класу небезпеки, відходи піноскла - до V класу небезпеки.

Відсотковий вміст кожного з шарів конструкції представляється як відношення товщини шару до загальної товщини конструкції, помножене на 100%.

Клас небезпеки конструкції обчислюємо як суму творів частки змісту шару конструкції та його класу небезпеки.

Стінова конструкція з пінополістиролом має товщину 430 мм. Штукатурні верстви займають 50 мм (30 мм + 20 мм), тобто. 12% (50/430×100%). Шар цегли займає 250 мм, тобто. 60% (250/430×100%). Шар пінополістиролу займає 120 мм, тобто. 29% (250/430×100%).

Клас небезпеки конструкції обчислюватиметься так: 0,12х4+0,29х4+0,56х5=4,60.

Стінова конструкція з мінеральною ватою має товщину 450 мм. Штукатурні верстви займають 50 мм (30 мм + 20 мм), тобто. 11% (50/450×100%). Шар цегли займає 250 мм, тобто. 56% (250/450×100%). Шар минвати займає 150 мм, тобто. 33% (250/450×100%).

Клас небезпеки конструкції з пеностеклом обчислюватиметься так: 0,11х4+0,33х4+0,56х5=4,56.

Стінова конструкція з піносклом має товщину 450 мм. Штукатурні верстви займають 50 мм (30 мм + 20 мм), тобто. 11% (50/450×100%). Шар цегли займає 250 мм, тобто. 56% (250/450×100%). Шар піноскла займає 150 мм, тобто. 33% (250/450×100%).

Клас небезпеки конструкції з пеностеклом обчислюватиметься так: 0,11х4+0,33х5+0,56х5=4,89.

Дані розрахунку зведено до таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 - Клас небезпеки огороджувальних конструкцій

	ЕПП			МВ			ПС		
Шар	δ, м	%	КО шара	δ, м	%	КО шара	δ, м	%	КО шара
Штукатурка	0,05	12	4	0,05	11	4	0,05	11	4
Утеплювач	0,12	29	4	0,15	33	4	0,15	33	5
Цегла	0,25	60	5	0,25	56	5	0,25	56	5
КО к-ції	4,60			4,56			4,89		

Як видно з розрахунку клас небезпеки відходів конструкції з піностеклом є більш безпечним і прагне до V класу - практично безпечні відходів.

3.5 Розрахунок витрат на опалення за розрахунковий період

Витрати на компенсацію теплових втрат через зовнішні огороджувальні конструкції будівлі визначаємо за формулою:

$$В = Q_{заг}^{рік} * Т_{оп}, \quad (3.1)$$

де $Q_{заг}^{рік}$ - загальні тепловтрати будівлі за опалювальний період через огороджувальні конструкції, Гкал, визначені у першій частині глави;

$Т_{оп}$ – тариф на теплову енергію, грн/Гкал.

Тарифи на теплову енергію КП "Теплоенерго" (Дніпро) з послуг теплопостачання на 2024 рік становить 1741,32 грн./Гкал.

Для варіанта утеплення пінополістиролом:

В = 25,98 * 1741,32 = 46257,73 грн.

Для варіанта утеплення мінеральною ватою:

В = 25,16 * 1780,46 = 44798, 15 грн.

Для варіанта утеплення піностеклом:

З = 20,5 2 * 1741,32 = 36533,96 грн.

Для варіанта без утеплення:

З = 106,5 9 * 1741,32 = 189757,97 грн .

Результати розрахунків зведемо до таблиці 3.9.

З таблиці видно, що варіант із утепленням із піноскла більш вигідний. Варіанти з пінополістиролом та мінеральною ватою дорожчі на 26,6% та 23,6% відповідно. При цьому витрати на опалення без утеплення значні і перевищують витрати при утепленні в 4-5 разів.

Таблиця 3.8 - Тепловтрати та витрати на опалення за розрахунковий період

Показник	Пінополістирол	Мінеральна вата	Піноскло	Без утеплення
Питома теплозахисна характеристика, $\frac{Вт}{м^3 °С}$	0,301	0,292	0,238	1,236
Загальні тепловтрати будівлі за опалювальний період, кВтгод/рік	30210	29257	23860	123928
Загальні тепловтрати будівлі за опалювальний період, Гкал	25,98	25,16	20,52	106,58
Витрати на опалення, грн	46257,73	44798,15	36533,96	189757,97

3.6 Економічна ефективність

Для визначення вартості огорож здійснено локальний кошторисний розрахунок з урахуванням різниці вартості різних видів утеплювачів базисно-індексним методом.

Використовуваний метод складання кошторисної вартості ґрунтується на перерахуванні кошторисних нормативних базових цін у поточні за допомогою індексів перерахунку. У будівництві індекси перерахунку кошторисної вартості застосовуються до різних державних елементних кошторисних норм, федеральних та територіальних одиничних розцінок та інших кошторисно-нормативних збірників.

За рахунок перемноження елементів прямих витрат у базисному рівні ціни відповідний індекс перерахунку з наступним підсумовуванням підсумків виробляється приведення до поточного рівня цен.

Виводимо вартість огороджувальних конструкцій:

- Із застосуванням ЕПП - 1125035,6 грн;
- Із застосуванням мінеральної вати - 1507253,6 грн;
- Із застосуванням піноскла - 2243474,00 грн.

Для того, щоб оцінити економічну ефективність при використанні варіантів утеплювачів, необхідно розглянути та порівняти сукупні витрати на кожну конструкцію, що захищає, за показниками, які представлені в таблиці 3.9. Для наочності порівняння побудовано гістограми витрат на опалення та вартості конструкцій, що захищають (рис. 3.5-3.6).

Таблиця 3.9 – Показники конструкцій різних варіантів утеплювачів

Показник	Пінополістирол	Мінеральна вата	Піноскло
Загальні тепловтрати будівлі за опалювальний період, кВгод/рік	0,301	0,292	0,238
Загальні тепловтрати будівлі за опалювальний період, Гкал	30 210	29 257	23 860
Витрати на опалення, грн	25,98	25,16	20,52
Вартість огороджувальних конструкцій, грн.	46257,73	44798,15	36533,96

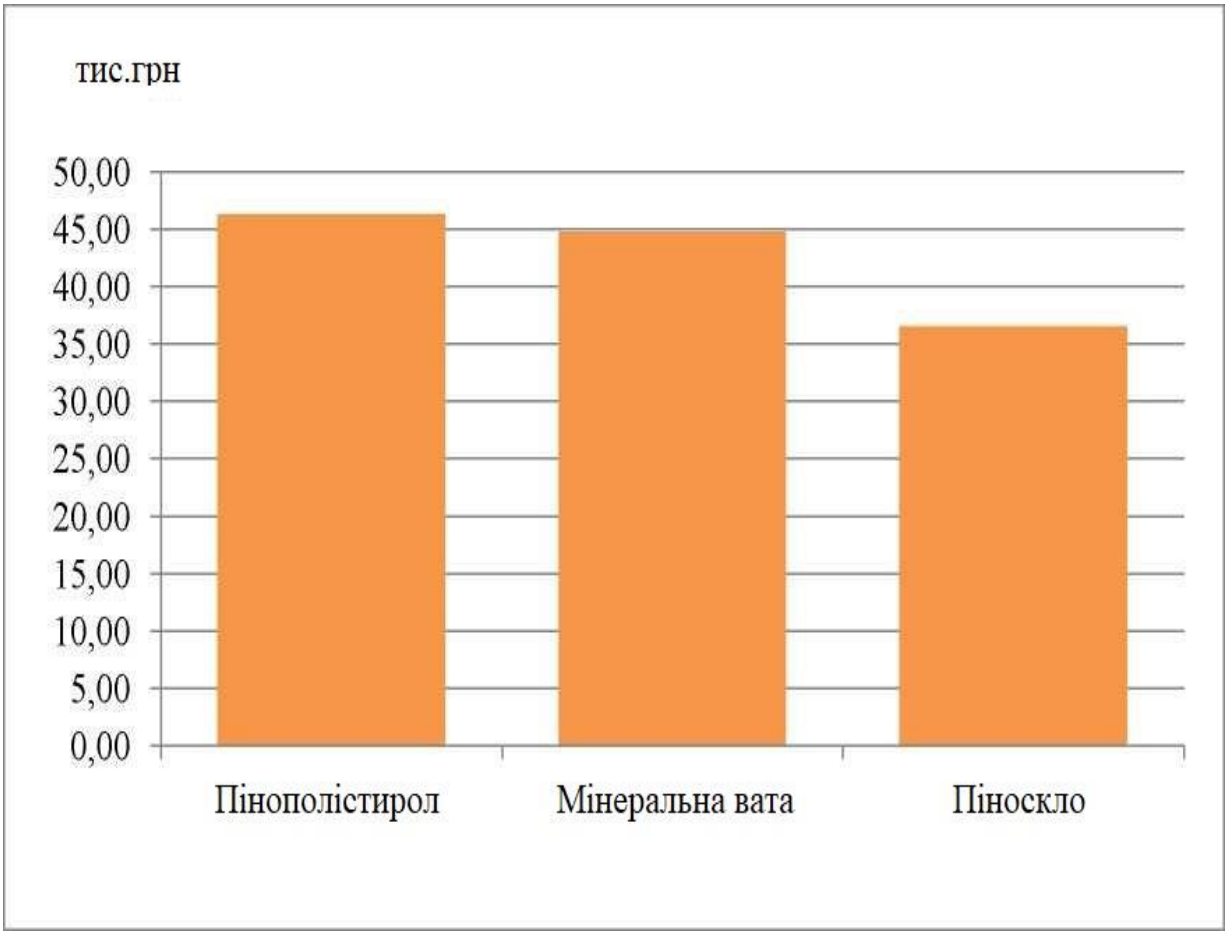


Рисунок 3.5 - Гістограма порівняння витрат на опалення

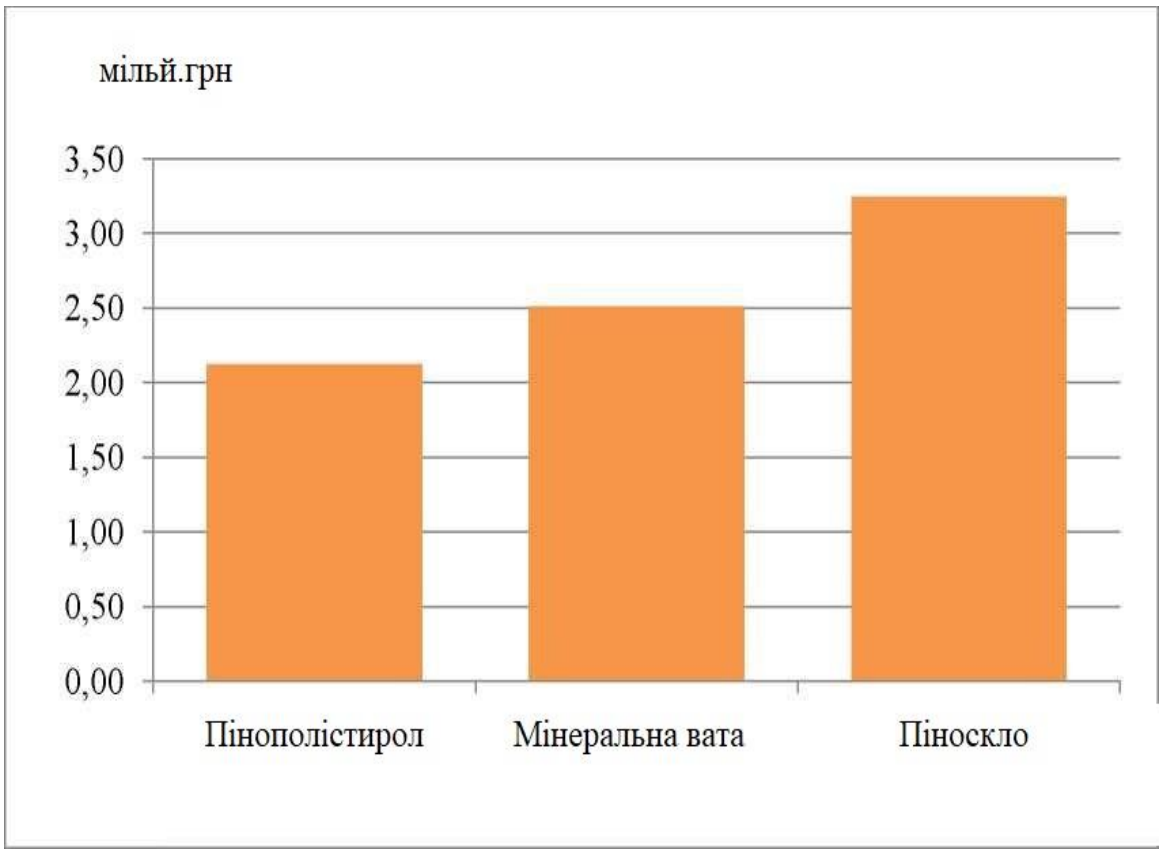


Рисунок 3.6 - Гістограма порівняння вартості конструкцій, що захищають.

Як видно з таблиці та гістограм, початкові вкладення в огороджувальні конструкції при використанні піноскла як утеплювач є найбільшими, а витрати на опалення найменшими, що свідчить про необхідність розгляду сукупних витрат даних конструкцій протягом терміну служби будівлі.

Для оцінки економічної ефективності при використанні варіантів утеплювачів розраховуємо та порівнюємо сукупні витрати на кожну конструкцію, що захищає. Розглядаємо ці витрати на термін служби будівлі (50 років) з урахуванням інфляції. Інфляція за підсумками 2023 року становитиме 12%. Надалі у міру реакцію реалізовану грошово-кредитну політику очікується повернення інфляції до цільового рівня 5% у 2030-2040 роках. Розрахунок виробляємо й у припущенні, що темп інфляції й надалі зберігатиметься лише на рівні 5%. Також враховуємо довговічність теплоізоляційних матеріалів та необхідність їх заміни протягом терміну служби будівлі. Термін служби для мінвати – 25-30 років, для пінополістиролу – 40 років, для піноскла – 80-100 років.

Також визначаємо дисконтований термін окупності конструкцій із застосуванням різних теплоізоляційних матеріалів.

Розрахунок дисконтованого терміну окупності здійснюємо, щоб уявити, наскільки прибутковим може бути застосування піноскла як теплоізоляційний матеріал.

Дисконтований термін окупності - це період часу, необхідний окупності вкладеного капіталу, у якому потік коштів дисконтований до наведеної вартості. Дисконтований термін окупності (DPBP) враховує різну цінність грошей при надходженні та виплат у часі та розраховується за умови:

$$\text{DPBP} = \min(n), \text{ при якому}, \sum_{t=1}^{N} \frac{CF_t}{(1+i)^t} > I_0, \quad (3.2)$$

де i – ставка дисконтування;

I_0 про - початкові інвестиційні витрати, грн.;

CF_t- грошовий потік у період, грн.

За початкові інвестиційні витрати приймаємо вартість зведення конструкцій, що огороджують, з різними варіантами теплоізоляційного шару. Для визначення грошового потоку як грошові надходження вважаємо економію на опаленні при утепленні, тобто. обчислюємо різницю між витратами на опалення утепленої та неутепленої конструкції. Витрати на опалення розраховані у п. 3.5.

Розрахунок сумарних витрат у довгостроковій перспективі та терміну окупності з урахуванням вищезазначених показників для кожного утеплювача наведено у додатку В. На рисунку 3.7 представлений графік накопичених грошових потоків у часі для трьох варіантів матеріалу утеплення.

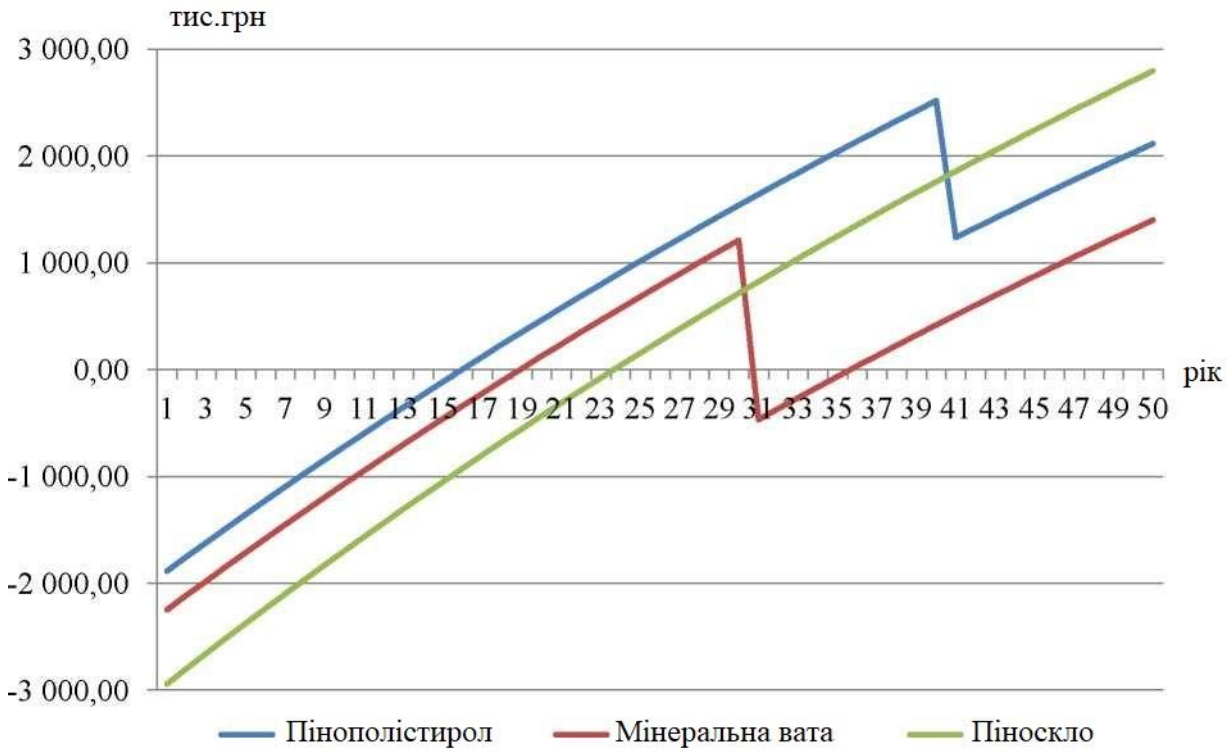


Рисунок 3.7 - Графік накопичених грошових потоків

З розрахунків та графіка видно, що термін окупності для пінополістиролу дорівнює 16 років, для мінеральної вати – 19 років, для піноскла – 24 роки.

Тим не менш, конструкція із застосуванням піноскла в перспективі терміну служби будівлі є більш економічною при тому, що початкові вкладення перевищують варіанти із застосуванням пінополістиролу та мінеральної вати.

3.7 Рекомендації щодо застосування

Будівлі та споруди, як правило, зводяться для виконання певної функції, тобто для розміщення у них просторів, що забезпечують різні потреби населення. До таких потреб відносяться соціальні, виробничі потреби, потреба у житлі та інші. При проектуванні будівель та споруд для тієї чи іншої функції може бути заданий певний термін служби будівлі.

За терміном служби будівлі рекомендується розділяти на 4 групи: з

терміном служби понад 100 років, понад 50 років, понад 25 років та 10 років. За цією класифікацією для кожного терміну визначено зразковий ряд типів будівель та споруд:

- 10 років - тимчасові будівлі та споруди (побутовки будівельних робітників та вахтового персоналу, тимчасові склади, літні павільйони тощо);
- Не менше 25 років - споруди, що експлуатуються в умовах сильноагресивних середовищ (судини та резервуари, трубопроводи підприємств нафтопереробної, газової та хімічної промисловості, споруди в умовах морського середовища тощо);
- Не менше 50 років - будівлі та споруди масового будівництва у звичайних умовах експлуатації (будівлі житлово-цивільного та виробничого будівництва);
- Понад 100 років - унікальні будівлі та споруди (будівлі основних музеїв, сховищ національних та культурних цінностей, твори монументального мистецтва, стадіони, театри, будівлі висотою понад 75 м, великопрогонові споруди тощо).

Грунтуючись на технічних характеристиках піноскла, його терміні служби, а також терміні окупності, воно може бути рекомендоване до застосування в якості теплоізоляції в будинках житлово-цивільного та виробничого будівництва, а також унікальних та культурно-значущих будинках та спорудах, розрахованих на тривалу експлуатацію, та мають підвищені вимоги до довговічності, надійності та вогнестійкості матеріалів, що застосовуються.

Варто зазначити, що для цивільних будівель, розрахованих терміном до 50 років, з економічної точки зору застосування дорогого піноскла менш доцільно за рахунок більшого терміну окупності, ніж при застосуванні поширених теплоізоляційних матеріалів, а також перевищенням терміну служби піноскла над терміном служби будівлі.

За рахунок хімічної та бактеріологічної стійкості застосування піноскла незамінне при утепленні споруд, що експлуатуються в умовах сильно

агресивних середовищ.

Для тимчасових будівель застосування теплової ізоляції з піноскла недоцільне, тому що їх термін служби в рази менший за можливий термін служби матеріалу, а також менше терміну, за який витрати на утеплення піносклом могли б окупитися.

Рекомендації щодо застосування піноскла як теплоізоляційного матеріалу при різних термінах служби будівель та споруд наведено в таблиці 3.10.

Крім терміну служби будівлі слід звертати увагу на матеріал несучої конструкції. Будучи вогнестійким матеріалом, застосування піноскла в якості утеплення несучих конструкцій, що згоряються, нераціонально. Відповідно несуча основа повинна бути виконана з негорючих матеріалів, таких як цегла, бетон та інші природні та штучні блокові матеріали неорганічного походження. При цьому утеплення бетонних та залізобетонних конструкцій має бути виконане з виключенням можливості виникнення лужно-силікатної реакції.

Рекомендації щодо застосування піноскла як теплоізоляційного матеріалу при різних матеріалах несучих конструкцій наведені в таблиці 3.11.

Таблиця 3.10 - Рекомендації щодо застосування піноскла при різних термінах служби будівель та споруд

Термін служби будівлі	10 років	25-50 років	50-00 років	>100 років
Рекомендації щодо застосування: "-" - не рекомендується "±" - допускається "+" - рекомендується	-	±	+	+

Таблиця 3.11 - Рекомендації щодо застосування піноскла при різних матеріалах несучих конструкцій

Матеріал несучої конструкції	Цегла	Бетон, з/б	Дерево
Рекомендації щодо застосування: "-" - не рекомендується "±" - допускається "+" - рекомендується	+	±	-

3.8 Висновки за третім розділом

1. Міцність та твердість піноскла дозволяє використовувати при монтажі анкера прихованого кріплення, тим самим значно знижуючи теплові втрати у вузлах кріплення порівняно з кріпленням тарілчастими дюбелями мінераловатної та пінополістирольної теплової ізоляції. Значення теплового потоку через огороджувальну конструкцію з піносклом менше значень для пінополістиролу в 1,7 разів для сухих умов експлуатації та в 1,8 разів для вологих умов. Значення теплового потоку через огороджувальну конструкцію з піносклом менше значень для мінеральної вати в 1,6 рази для сухих умов експлуатації та в 1,7 раза для вологих умов.

2. Крім того клас небезпеки стінової конструкції із застосуванням піноскла ближчий до V класу небезпеки (практично безпечні відходи).

3. На даному етапі видно практичні переваги у використанні піноскла перед пінополістиролом і мінеральною ватою, оскільки воно є більш енергоефективним та екологічно безпечним.

4.Були розраховані накопичені дисконтовані потоки та термін окупності конструкцій із застосуванням різних теплоізоляційних матеріалів. Терміни окупності для пінополістиролу, мінеральної вати та піноскла склали 16 років, 19 років та 24 роки відповідно. Незважаючи на більш високу вартість пристрою огороджувальної конструкції з піносклом, у перспективі терміну служби будівлі вона є більш економічною, ніж при використанні пінополістиролу та мінеральної вати, за рахунок довговічності та особливого

способу кріплення, що знижує витрати на опалення.

5.Були запропоновані рекомендації щодо застосування піноскла в якості теплоізоляційного шару будівель та споруд, що мають термін служби від 25 років, а також мають несучі конструкції з негорючих матеріалів (цегла, бетон).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У цій роботі була проведена порівняльна оцінка використання піноскляних і найпоширеніших матеріалів утеплення за показниками тепловтрат і витрат на опалення конструкцій з їх застосуванням. Крім того, були порівняні вартості та терміни окупності цих конструкцій.

2. За отриманими результатами видно, що піноскло значно програє екструдованому пінополістиролу та мінеральній ваті за початковими вкладеннями та часом окупності витрат на зведення огороджувальної конструкції з його застосуванням. Однак термін служби піноскла різними джерелами встановлюється понад 50 років або протягом усього терміну служби будівлі, оскільки він більш міцний і не піддається впливу води та агресивних середовищ.

3. Крім того, піноскло не накопичує вологу, що дозволяє йому зберігати теплозахисні характеристики, близькі до початкових, протягом усього терміну служби.

Чого не можна сказати про мінеральну вату, що володіє великим вологонакопиченням, що згодом негативно позначиться на теплозахисних характеристиках і призведе до додаткових витрат на опалення. Також заявлений термін служби мінеральної вати становить 25-30 років, що означає необхідність його трьох або чотирьох кратних замін протягом терміну служби будівлі, який може становити 100 років.

4. Екструдований пінополістирол з терміном служби близько 40 років при всій своїй дешевизні в порівнянні з мінватою і піносклом має істотний недолік - горючість, що може викликати необхідність його заміни частіше, ніж заявлений термін служби. А це також призведе до додаткових витрат.

5. Термін окупності піноскла становить 24 роки, що більше мінеральної вати та пінополістиролу на 5-8 років, але при цьому накопичений грошовий потік при терміні служби будівлі 50 років більше пінополістиролу та мінеральної вати в 1,3 та 2 рази відповідно.

6. Значення теплового потоку через огороджувальну конструкцію з піносклом менше в 1,6-1,7 раза.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Raymond Viskanta and Jongmook Lim. Analysis of heat transfer during glass forming. //Glass Sci. Technol. 74-2001 № 11/12.

2. Закон України від 21.10.2021 № 1818-IX Про енергетичну ефективність

3. Племянніков М.М., Крупа О.А. Хімія та теплофізика скла: Навчальний посібник. Київ: НТУУ"КПІ" 2000. 560с.

4. Демидович Б.К. Пеностекло: учеб. пособие / Б.К. Демидович. - Минск: изд -во Наука и техника, 1975. - 248 с.

5. Мелконян Р.Г. Піноскло. Теорія і практика виробництва силікатних піноматеріалів / Р.Г. Мелконян, Б.І. Білецький, Г.Р. Мелконян. // Скло світу. 2011. №1. С. 32–59.

6. Кетов, А.А. Тенденции развития технологии пеностекла / Кетов А.А., Пузанов И.С., Саулин Д.В. // Строительныематериалы.- №9.- 2007.- С.28-31.

7. A.Ketov. An experience of Reuse of a Glass Cullet for production of foam structure material // Recycleand Reuse of Glass Cullet: International Symposium / Dundee.United Kingdom, 2001, P. 85-91.

8. Kokura K., Tomozava M., MacCrone K.K. Defect formation in Si02 glassduring fracture // J. Non-Cryst. Solids. 1989. 111, № 2-3. P. 269-276

9. Теплоізоляційні матеріали та вироби - властивості та класифікація URL : https://blokbud.lviv.ua/teploizoljatsijni-materialu/ (дата звернення 05.01.2025)

10. Schäfer Manfred., Coriglas-Schaumglas genügt höchsten Ansprüchen // "Baupraxis", 1979. № 2. P. 21-22

11. Senna M. Smart milling for rational production of new materials / International conference on rational utilization of natural minerals. Ulaanbaatar, Mongolia. RUNM 2005. P. 34-41.

12. Дворкін, Л. Й. та Пушкарьова, К. К. та Дворкін, О.Л. та Кочевих, М. О. та Мохорт, М. А. та Безсмертний, М. П. (2009)Використання

техногенних продуктів у будівництві. НУВГП, Рівне, Україна. URL : http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/2259 (дата звернення 12.12.2024)

13. ДСТУ EN 13167:2019 Матеріали теплоізоляційні для будівель. Промислові вироби з піноскла (CG). Технічні умови (EN 13167:2012 + A1:2015, IDT)

14. ДСТУ Б ГОСТ 16381:2011 Матеріали і вироби будівельні теплоізоляційні. Класифікація і загальні технічні вимоги (ГОСТ 16381-77, IDT)

15. Штірц Л. Ю., Феськова М. Ю. Використання склобою в виробництві піноскла// Освіта, наука, виробництво: зб. пр. V Міжнар. студ. форума / Білор. держ. технолог. ун-т: БДТУ, 2011. С. 185-186.

16. Кетов А. А. Перспективи піноскла в житловому будівництві// Будівельні матеріали. 2016. № 3. С. 79-81.

17. Кулаєв Н. С., Гаркаві М. С. Піноскло з склобою // Будівельні матеріали. 2007. № 3. С. 74-76.

18. Giovanni Scarinci, Giovanna Brusatin, Enrico Bernardo "Glass Foams". Bologna, Italy. 2006. 2 c. (3)

19. Верещагин, Б. С. Семухин //Физика и химия стекла. - 2011.- № 4. - С. 501509.

20. Кетов А. А., Пузанов І. С., Сауліна Д. В. Досвід виробництва піноскляних матеріалів з склобою // Будівельні матеріали. 2007. № 3. С. 70-72.

21. Стаховська Н. Е., Червоний А. І. Піноскло з несортованих відходів скла // Будівельні матеріали. 2012. № 11. С. 24-26.

22. Fernandes H. R., Tulyaganov D. U., Ferreira J. M. F. Production and characterization of glass ceramic foams from recycled raw materials// Advances in Applied Ceramics. 2009. Vol.108, № 1. P. 9-13.

23. Сертифікати випробувань піноскла – 2024 URL : http://www.pinosklo.com/ua/dokumentatsiya.html (дата звернення 12.12.2024)

24. Aaboe R., Oiseth E. No Access Foamed Glass - An Alternative Lightweight and Insulating Material. Oslo, Norway: July 07, 2015. 5 c.

25. Піноскло: виробництво в Україні. – 2024. URL : http://www.pinosklo.com. (дата звернення 12.12.2024)

26. Вайсман Я. І., Кетов А. А., Кетов П. А. Вторинна переробка піноскла при виробництві піносклокристалічних плит // Будівельні матеріали. 2017. - № 5. С. 56-59.

27. Fernandes H. R., Tulyaganov D. U., Ferreira J. M. F. Production and characterization of glass ceramic foams from recycled raw materials// Advances in Applied Ceramics. 2009. Vol.108, No. 1. P. 9–13.

28. Patent №1803693. United States of America. US2890173 A. Production of cellulated silica/ Anderson Herbert H, Ford Walter D/ Pittsburgh Corning Corp / 19.08.1953/

29. .Beyersdorfer P. Glashuttenkunde. Deutscher Verlag fur Grund-stofindustrie. Leipzig, 1984. P. 333—337.

30. Корнілович Б.Ю., Андрієвська О.Р., Племянніков М.М., Спасьонова Л.М. Фізична хімія кремнезему і нанодисперсних силікатів: навчальний посібник за ред чл.-кор. НАН України Б.Ю. Корніловича. Київ: «Освіта України», 2013. 178 с.

31. Glass ceramic foams from coal ash and waste glass: production and characterization/ A. R. Boccaccini et al.// Advances in Applied Ceramics. - 2006. - Vol. 105, No. 1. - P. 32–39.

32. Fernandes H. R., Tulyaganov D. U., Ferreira J. M. F. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents // Ceramics International. - 2009. - Vol. 35, No. 1. - P. 229–235.

33. Preparation of foam glass from waste glass and fly ash / J. Bai et al.// Materials Letters. 2014. Vol. 136. P. 52–54.

34. Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass / M. Zhu et al.// Construction and Building Materials. 2016. Vol. 112. P. 398–405.

35. Patent №1803693. United States of America. US2890173 A. Production of cellulated silica/ Anderson Herbert H, Ford Walter D/ Pittsburgh Corning Corp.

36. atent № 2002065. France. EP2002065 A2. High strength foam glass/ Bo Wang/ World Minerals, Inc.

37. Patent №1803693. England.UK20140021419 A1. UK 14/110,152. Method for Producing Foam by Recycling a Waste Glass Mixture/ Ralf Baier, Rainer Daniel/ TDC Trade Development and Construction Ltd./23.01.14/

38. Patent №1803693. Poland . EP1803693 A1. EP20040809010. Method for producing calibrated granulated foam glass /Andrei Adolfovich Zinoviev, Mikhail Petrovich Dudko, Valentin Zinovievich Leonidov/ 4.07.2007/

39. Patent №1803693. Germany. EP0480929 B1. EP19900902663. Manufacture of foam glass/ Keith Russel Mcneill/ VERT Investments Limited/ 09.04.1995/

40. Лукінюк М.В. Контроль і керування хіміко-технологічними процесами: У кн. 1. Методи та технічні засоби автоматичного контролю хіміко-технологічних процесів: навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямком: «Хімічна технологія та інженерія» / М. В. Лукінюк. Київ: НТУУ «КПІ», 2012. 336 с.

41. Гільчук А.В., Халатов А.А. Теорія теплопровідності, ч. 1: навч. посібник, Київ, КНУ. 2017. 86 с.

42. Риндюк С. В., Дудар І. Н. Енергоефективні матеріали та конструкції для теплового захисту будівель і споруд. Сучасні технології матеріалів і конструкції в будівництві : міжнародний науково-технічний журнал. Вінниця, 2017. № 2. С. 31–35.

43. Jokūbaitis, A. Influence of technological and environmental factors on the behaviour of the reinforcement anchorage zone of prestressed concrete sleepers. Construction and Building Materials. 2016. V. 121. P. 507-518

44. ДСТУ Б В.2.7-233:2010. Будівельні матеріали. Суміші будівельні рідкімодифіковані. Загальні технічні умови. [Чинний від 2011-01 -01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 15 с.

45. Bian, J., Cao, W., Yang, L., Xiong, C. Experimental Research on the Mechanical Properties of Tailing Microcrystalline Foam Glass // Materials. 2018.

Vol. 11, no. 10: 2048. DOI: 10.3390/ma11102048

46. Ратушняк Г.С., Бікс Ю.С., Лялюк О.Г., Лялюк А.О. Алгоритм реалізації проекту управління імовірністю теплової відмови теплоізоляційної оболонки будівель. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2019. No1(26). с. 140-146

47. Douzane, O.; Promis, G.; Roucoult, J.-M.; Le, A.-D.T.; Langlet, T. Hygrothermal performance of a straw bale building: In 16.situ and laboratory investigations. J. Build. Eng. 2016, 8, 91–98.

48. Солтисік Р. А. Марущак У. Д., Позняк О. Р., Дума В. О. Аспекти сталого розвитку в будівництві. Сталий розвиток – стан та перспективи: матеріали міжнародного наукового симпозіуму SDEV'2018, м. Львів, 28 лютого–3 березня 2018 р. Львів, 2018. С. 92–93.

49. Основи виробництва стінових та оздоблювальних матеріалів : підручник / Р. Ф. Рунова та ін. 3-тє вид. Київ : Основа, 2017. 528 с.

50. Будник А.Ф.Тепломасоперенос у процесах і матеріалах дизайну матеріалів: Навчальний посібник. Суми: Вид-во СумДУ, 2008. 158 с.

51. «Охорона праці» в дипломних проектах і роботах бакалаврів хіміко-технологічного і біотехнології та біотехніки ф-тів / Уклад.: А. Т. Орленко, Н.А. Приховнік, Ю.О. Полукаров Київ: НТУУ «КПІ», 2011. 33 с.

52. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель

53. Brusatin G., Bernardo E., Scarinci G.. Production of foam glass from glass waste. Padova, Italy, 2016. – 10 c.

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

55. Комунальне підприємство "Теплоенерго" URL: https://teploenergo.dp.ua/uk/taryfy (дата звернення 20.12.2024)