

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ННІ лісового і садово-паркового господарства**

**УДК 674.8**

**ПОГОДЖЕНО**  
**Директор ННІ**  
Лісового і садово паркового  
господарства  
**Роман ВАСИЛИШИН**  
\_\_\_\_\_  
(підпис) (ПБ)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**  
**Завідувач кафедри**  
Технологій та дизайну виробів з  
деревини  
**Андрій СПРОЧКІН**  
\_\_\_\_\_  
(підпис) (ПБ)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**на тему Обґрунтування доцільності виготовлення теплоізоляційних плит з  
добавленням деревних частинок**

Спеціальність 187 «Деревообробні та меблеві технології»

Освітня програма «Деревообробні та меблеві технології»

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

**Гарант освітньої програми**

канд. техн. наук, доц.  
(науковий ступінь та вчене звання)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Андрій СПРОЧКІН  
(ПБ)

**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи**

канд. техн. наук, доц.  
(науковий ступінь та вчене звання)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Андрій СПРОЧКІН  
(ПБ)

**Виконав**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Дмитро КУШНІР  
(ПБ)

**Київ – 2024 рік**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ННІ лісового і садово-паркового господарства**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**В.о. завідувача кафедри**  
Технологій та дизайну виробів з деревини  
к.т.н., доц. \_\_\_\_\_ Андрій СПИРОЧКІН  
науковий ступінь, вчене звання (підпис) (ПІБ)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
СТУДЕНТУ**

Кушніру Дмитру Віталійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 187 «Деревообробні та меблеві технології»

(код і назва)

Освітня програма «Деревообробні та меблеві технології»

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи Обґрунтування доцільності  
виготовлення теплоізоляційних плит з додаванням деревних частинок

затверджена наказом ректора НУБіП України від “31” 10 2023 р. № 1981 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру \_\_\_\_\_

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи

Звіти з наукової роботи кафедри. Результати попередніх експериментальних  
досліджень за обраною тематикою

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Детальний аналіз існуючих теплоізоляційних матеріалів

2. Аналіз технологічних процесів виготовлення різних теплоізоляційних  
матеріалів

3. Дослідження режимних параметрів виготовлення теплоізоляційних матеріалів  
з додаванням деревних частинок

Дата видачі завдання “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ р.

**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи** \_\_\_\_\_

(підпис)

(прізвище та ініціали)

**Завдання прийняв до виконання** \_\_\_\_\_

(підпис)

(прізвище та ініціали студента)

## РЕФЕРАТ

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів та висновків. Основна частина викладена на 81 сторінці, проілюстровано 30 рисунками та 22 таблицями. Список використаної літератури включає 50 назв.

У вступі викладено доцільність та актуальність обраної теми магістерської кваліфікаційної роботи.

В першому розділі проведено аналітичний огляд існуючих теплоізоляційних матеріалів та особливості їх застосування. Описано способи утеплення будинків, різновиди, їх переваги та недоліки. Методи утеплення різних видів дерев'яних будинків. Описано принципи утеплення різних частин будівель та споруд. Також розглянуто та описано сучасні матеріали, які використовують для утеплення будівель та споруд. Проведено аналіз існуючих досліджень з виготовлення композитних теплоізоляційних матеріалів, який показує зростання питання щодо екологічності теплоізоляційних матеріалів, переробка сільськогосподарських та інших відходів в теплоізоляційні матеріали.

У другому розділі проведено аналіз існуючих методик щодо визначення теплофізичних властивостей різних матеріалів. Описано основні показники теплофізичних властивостей та опис стаціонарних і нестаціонарних методів. Проведено аналіз літератури та існуючих досліджень, на основі якого визначено і описано режимні параметри, які враховуються під час виготовлення композитних матеріалів.

В третьому розділі за допомогою методу аналізу ієрархій визначено пріоритетне в'язуче для виготовлення теплоізоляційних плит з додаванням деревних частинок. На основі розрахунків обрано такі в'язучі речовини як цемент, вапно та гіпс з якими в подальшому виготовлено дослідні зразки.

У четвертому розділі описано методику виготовлення дослідних зразків, описано обрані в'язучі матеріали. Наведено дати контрольних зважувань, зміну маси дослідних зразків. Наведено економічну складову по виготовленню зразків та приблизних прорахунків на  $1\text{м}^2$  плити. Проведено дослідження та проаналізовано методику проведення досліду з визначення коефіцієнта

теплопровідності для виготовлених зразків. Наведено результати досліджень та проведено порівняння з існуючими матеріалами. Зроблено рекомендації до виготовлення і використання теплоізоляційного матеріалу на основі отриманих результатів досліджень та запропоновано технологічний процес з виготовлення плит, цеглинок і блоків на основі результатів дослідження.

Ключові слова: теплоізоляційний матеріал, теплофізичні властивості, композит, в'язуче, деревні частинки, коефіцієнт теплопровідності.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ.....	8
1.1. Особливості утеплення будинків різної конструкції .....	8
1.2. Аналіз матеріалів, які можуть бути використані у якості теплоізоляції... 23	
1.3. Аналіз існуючих досліджень з виготовлення композитних теплоізоляційних матеріалів.....	30
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ .....	33
2.1. Аналіз існуючих методик визначення теплофізичних властивостей різних матеріалів.....	33
2.2. Визначення режимних параметрів, що враховуються під час виготовлення композитних матеріалів.....	37
РОЗДІЛ 3. ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПРІОРИТЕТНОГО В'ЯЖУЧОГО ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ПЛИТ З ДОДАВАННЯМ ДЕРЕВНИХ ЧАСТИНОК..	39
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	46
4.1. Методика виготовлення зразків .....	46
4.2. Економічна складова .....	52
4.3. Методика проведення досліду з визначення коефіцієнта теплопровідності .....	57
4.4. Опрацювання результатів досліджень та порівняння з існуючими матеріалами.....	63
4.5. Рекомендації до виготовлення і використанню теплоізоляційних плит та запропонування технологічного процесу.....	70
ВИСНОВКИ.....	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76

## ВСТУП

Будівельна галузь є однією з найбільш економічно динамічних серед усіх галузей народного господарства. У ХХ столітті, внаслідок індустріалізації, були розроблені різноманітні теплоізоляційні матеріали, які містять хімічно похідні компоненти. Останні дослідження вказують на негативний вплив таких матеріалів на здоров'я людини у довгостроковій перспективі. Їх переробка є складним і дорогим процесом, що призводить до накопичення небезпечних відходів. У ХХІ столітті акцент ставиться на розробку нових екологічно чистих теплоізоляційних матеріалів.

Актуальність теми даної кваліфікаційної роботи обумовлена постійним зростанням цін на енергоносії та підвищенням вимог до енергозбереження при експлуатації будівель відповідно до державних і галузевих нормативно-технічних документацій, міжнародних стандартів. Це стосується як нових, так і вже експлуатованих об'єктів. Дослідження, що проводяться в рамках теми роботи, також можуть допомогти вирішити проблему відходів деревообробки, перетворюючи їх на екологічно безпечний теплоізоляційний матеріал, практично з нульовою вартістю основного компонента. У роботі розглядаються інноваційні рішення – використання деревних частинок у поєднанні з різними в'язучими матеріалами як основи для утеплювальних елементів будівель та споруд. Результати досліджень можуть підвищити енергоефективність будівель і зменшити витрати на їх експлуатацію, що, в свою чергу, підвищить їх конкурентоспроможність на ринку будівництва.

Метою роботи є отримання теплоізоляційних матеріалів на основі деревних частинок, які доцільно використовувати для теплоізоляції огорожувальних конструкцій в житловому і промисловому будівництві.

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

- розробити можливі технологічні підходи для отримання теплоізоляційних матеріалів з додаванням деревних частинок;
- визначити коефіцієнт теплопровідності даних матеріалів;

- порівняти коефіцієнт теплопровідності отриманих матеріалів з коефіцієнтом теплопровідності відомих матеріалів;
- створити рекомендації щодо практичного застосування і запропонувати технологічний процес щодо їх виготовлення.

Об'єктом дослідження є зразки, виготовлені на основі деревних частинок з різними в'язучими матеріалами та додатковими компонентами у вигляді керамзиту та піску.

Предметом дослідження є процес теплопровідності отриманих теплоізоляційних матеріалів на основі деревних частинок.

Методами дослідження є аналіз існуючих досліджень щодо виготовлення композитних теплоізоляційних матеріалів, аналіз існуючих методик визначення теплофізичних властивостей різних матеріалів, натурний експеримент з виготовленими зразками, приладом для визначення коефіцієнта теплопровідності, апроксимація результатів експериментальних досліджень, їх порівняння та узагальнення.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

### 1.1. Особливості утеплення будинків різної конструкції

Утеплення будинку – це процес додавання ізоляційного матеріалу до внутрішніх або зовнішніх стін будівлі, що дозволяє зберегти тепло всередині будинку і заощадити на витратах на опаленні та кондиціонуванні в різні сезони року, підвищити енергоефективність будівлі, а також підвищити комфорт для мешканців. Вибір ізоляційних матеріалів, способів монтажу та потенційних проблем, з якими можна зіткнутися, залежить від конструкції будівлі.



Рис. 1.1. Точка роси в будівлі без утеплення [3]

Коли будинок немає жодного з виду утеплення, холод з вулиці легко просочується всередину приміщення, стіни промерзають (рис. 1.1), накопичують холод і вогкість (приміщення буде відчуватись сирым), навіть якщо будинок опалюється чи обігривається стіни будуть віддавати холод тим самим знижуючи температуру приміщень. Цей процес буде тривати протягом всього терміну експлуатації будівлі, через це будуть витрачатись колосальні кошти на опалення чи кондиціонування.

Приватні будинки можна утеплювати зсередини або ззовні. Якщо підлогу утеплюють тільки зсередини, то стіни або стелю можна утеплити як зсередини, так і ззовні, і перед людьми постає складний вибір, який спосіб обрати. На

сьогоднішній день найбільшою популярністю користуються три найпоширеніші способи утеплення стін [1–2]:

- внутрішнє;
- внутрішньостінове;
- зовнішнє [2].

Розглянемо внутрішній та зовнішній способи утеплення, їх переваги та недоліки. Внутрішньостіновий спосіб здебільшого використовується при будівництві каркасних будинків або при колодязній кладці, тому роздивимось його окремо.

Внутрішнє утеплення будинку. Під внутрішнім утепленням мається на увазі додавання ізоляційного матеріалу на стіни зсередини будівлі. Зазвичай встановлюється між дерев'яними або металевими стійками (каркасом), а потім, найчастіше, закривається гіпсокартоном. Також може використовуватись вагонка, плити ДСП або OSB [3].

До основних переваг внутрішнього утеплення можна віднести те, що даний процес за таким способом можна проводити в любий період року, навіть під час сильних морозів. Не потрібно облаштовувати громіздкі підмостки та обрешітку. Вигляд будинку залишається незмінним. Доволі простий монтаж та зазвичай витрачається менше коштів [1–3].

До основних недоліків можна віднести те, що при використанні даного способу втрачається площа приміщення в якому проводяться заходи по утепленню за рахунок збільшення товщини стін. Утеплення зсередини несе за собою погіршення мікроклімату, погіршується циркуляція повітря, підвищується температура та вологість в приміщенні через появу конденсату, тому що зсувається точка роси усередину приміщення (рис.1.2). За рахунок цього підвищується ризик виникнення плісняви та грибків що може нести за собою проблеми зі здоров'ям, а також може призвести до пошкодження стін та інших частин будівлі. Деякі матеріали, що використовуються для утеплення, можуть бути досить горючими та сприяти швидкому поширенню вогню в будівлі [1–3].

Зсередини будівлю утеплюють тільки, якщо існує заборона на проведення фасадних робіт або з яких-небудь причин які унеможливають дану роботу

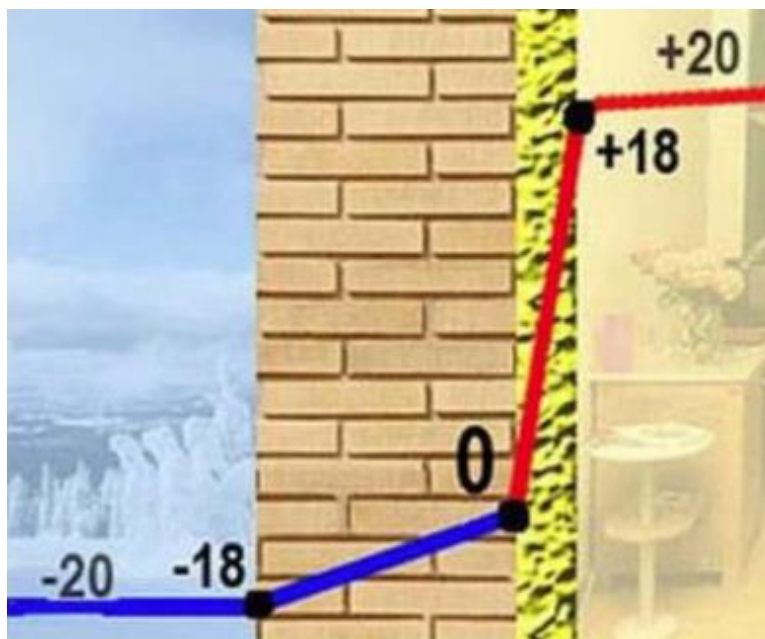


Рис. 1.2. Точка роси при утепленні зсередини [3]

Зовнішнє утеплення будинку. Під зовнішнім утепленням мається на увазі додавання ізоляційного матеріалу на стіни ззовні будівлі. Зазвичай встановлюється між дерев'яними або металевими стійками (каркасом), а потім закривається сайдингом, панелями, штукатуркою, цеглою, облицюванням [3].

До переваг зовнішнього утеплення можна віднести те, що зберігається корисна площа будинку. Утеплення ззовні дозволяє покрити всю поверхню будівлі і створити суцільний шар утеплювача, що сприяє зменшенню тепловтрат через стіни. Зменшується ризик виникнення конденсату, адже точка роси знаходиться ззовні приміщення (рис.1.3). Зовнішня ізоляція дозволяє успішно протистояти появі вогкості, цвілі, грибка, хвороботворних мікроорганізмів і бактерій всередині приміщень. Вона також дозволяє змінювати зовнішній вигляд будівлі, додаючи нові облицювальні матеріали або змінюючи колір фасаду. Запобігає деформації стін під час усадки та герметизує шви та стики в панельних будинках. Забезпечує хорошу звукоізоляцію [1–4].

Значних недоліків у даному способі немає, тому він користується найбільшою популярністю. До незначних недоліків можна віднести те, що цей спосіб може змінюватись зовнішній вигляд будинку. Для проведення робіт

повинні дотримуватись певні погодні умови. Не завжди є можливість або дозвіл для утеплення ззовні будівлі. Іноді є потреба облаштовувати громіздкі конструкції та є можливість витратити більше коштів ніж при утепленні зсередини.

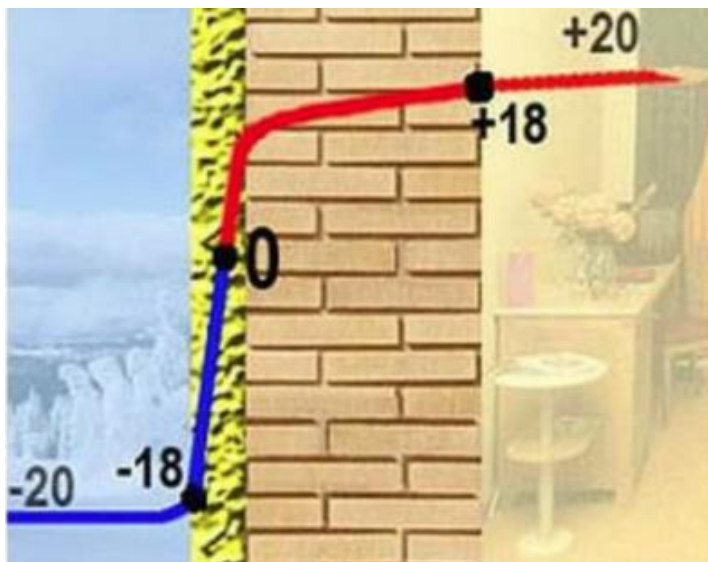


Рис. 1.3. Точка роси при утепленні ззовні [3]

Для зовнішнього способу існують два найпопулярніших методів або так званих технологій утеплення фасаду: мокрий та сухий (або вентильований) [3–6].

Мокрі фасади (рис.1.4) – це назва усіх методів утеплення, в яких для кріплення облицювального матеріалу, утеплювача і армуючої сітки використовуються рідкі або напіврідкі клейові розчини. Цей спосіб утеплення включає 3 основні шари [3–6]:

1. теплоізоляційний матеріал (мінеральна вата, екструдований пінополістирол, пінопласт), який кріпиться до чорнової стіни за допомогою клею;
2. базовий шар, який утворює жорсткий прошарок і захищає утеплювач від механічних впливів, а також служить основою для декоративного покриття;
3. декоративне покриття [3–6].

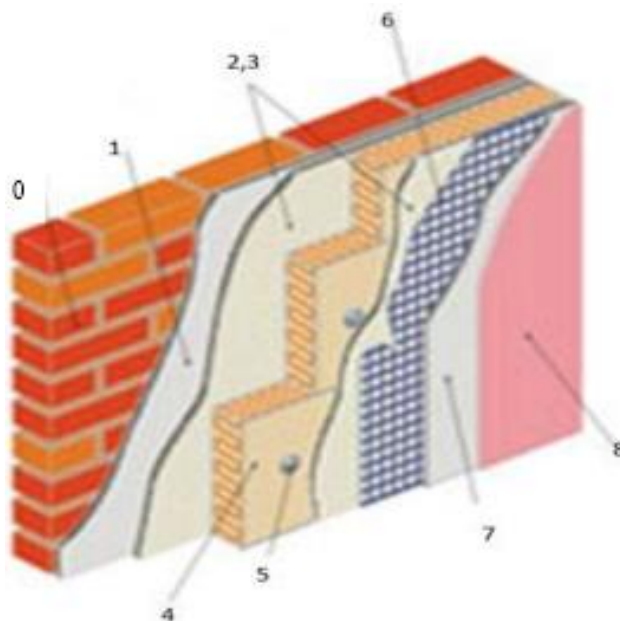


Рис. 1.4. Схема мокрого фасаду: 0 – зовнішня стіна будинку; 1 – ґрунтовка глибокого проникнення; 2 – клей для приклеювання утеплювача; 3 – базовий шар клею на мінеральній основі; 4 – утеплювач (пінополістирол або мінеральна вата); 5 – спеціальний фасадний забивний або гвинтовий дюбель (анкер); 6 – склосітка фасадна, для армування базового шару клею; 7 – ґрунтовка з домішками кварцового піску; 8 – декоративний штукатурний шар [5].

Залежно від виду, мокрий фасад може бути легким або важким:

- Легкі є найпопулярнішими і відносно недорогими. Легка конструкція складається з теплоізоляційних матеріалів, закріплених за допомогою кріплень і полімерцементного клею, фінішного покриття (яке також виконує захисну функцію) і набору допоміжних елементів: алюмінієвих профілів, матеріалів для герметизації і ущільнення утеплювача тощо;

- Важкі відрізняються потовщеним шаром зовнішньої штукатурки, який може досягати 50 мм. Це значно подовжує термін служби і підвищує стійкість матеріалів до механічних впливів. Для кріплення використовуються анкери, дюбелі та армована сітка, які забезпечують рухливість плит і запобігають деформації штукатурного шару та утеплювача [3–6].

Основними перевагами цього методу є те, що він забезпечує надійну звукоізоляцію та надає високий рівень теплоізоляції стін. Застосовуються легкі

конструкції, які надають високий рівень захисту без втрати теплостійкості. Дозволяє проводити монтаж на різних видах огорожувальних конструкцій і навіть старих ослаблених (цегляна кладка, бетон, збірні, монолітні тощо) [3–6].

Сухі (або вентилязовані) фасади (рис.1.5) – це метод, для якого створюється спеціальна конструкція (каркас) і утеплювач розміщується між пустотами конструкції. Даний метод містить повітряний прошарок між облицювальними і теплоізоляційними матеріалами (утеплювач накривається паропроникною мембраною), тим самим забезпечується хороша вентиляція (рис.1.6). Цей спосіб утеплення має 4 шари [3–6]:

1. зовнішній облицювальний шар;
2. підоблицювальний шар (обрешітка);
3. повітряний або вентиляційний шар;
4. теплоізоляційний шар [3–6].

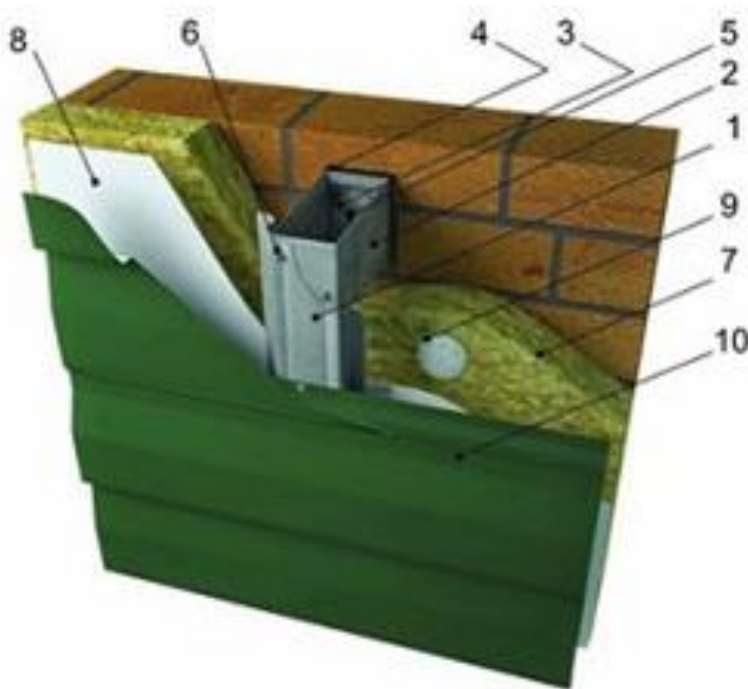


Рис. 1.5. Схема сухого (вентильованого) фасаду: 1 – несучий кронштейн; 2 – сферична шайба; 3 – теплоізоляційна прокладка під кронштейн; 4 – анкерний дюбель для кріплення кронштейну до несучої стіни; 5 – Саморіз по металу або заклепка; 6 – утеплювач; 7–8 – гідро- та вітрозахисна мембрана; 9 – дюбель для кріплення утеплювача; 10 – зовнішній облицювальний матеріал [5].

Залежно від виду, сухий (вентильований) фасад також може бути легким або важким:

- Для легких використовуються легкі оздоблювальні матеріали, панелі або дошки різних розмірів. Вони кріпляться до каркасу прибиванням або прикручуванням за допомогою метизів. Цей метод ідеально підходить для будівель будь-якого типу;
- Для важких використовуються важкі матеріали, плити з каменю або керамограніту. Каркас має високу міцність і може витримувати значні навантаження. Елементи облицювання фіксуються за допомогою спеціальних кронштейнів. Цей метод створює значне навантаження на будівлю, і тому він підходить лише для будинків з міцними стінами та фундаментами з високим допуском навантаження [3–6].

Основними перевагами цього методу є те, що монтаж може проходити на нерівних стінах без особливої їх підготовки та на весь процес затрачається менше часу ніж при мокрому методі. Вентильована конструкція є більш надійною та довговічною, вплив факторів навколишнього середовища (опадів) на несучі конструкції та утеплювач зводиться до мінімуму. Також є можливість швидко та зручно знімати та замінювати пошкоджені частини конструкції [3–6].

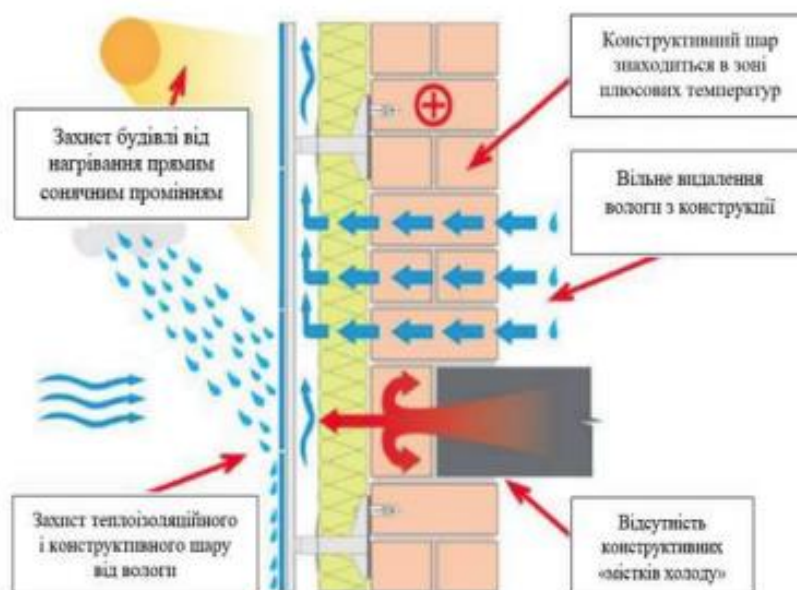


Рис. 1.6. Схема системи вентильованого фасаду [6]

Колодязна кладка (рис. 1.7) – цей метод утеплення проводиться на етапі будівництва. Утеплювач вкладається між двома шарами стінового матеріалу, стіною і облицюванням, забезпечуючи додаткову теплоізоляцію і захист від перепадів температур. Всього виходить три шари. Перевагами цього методу є покращення звукоізоляції та захист стін від конденсату. Також дозволяє зберегти простір всередині будівлі [3].

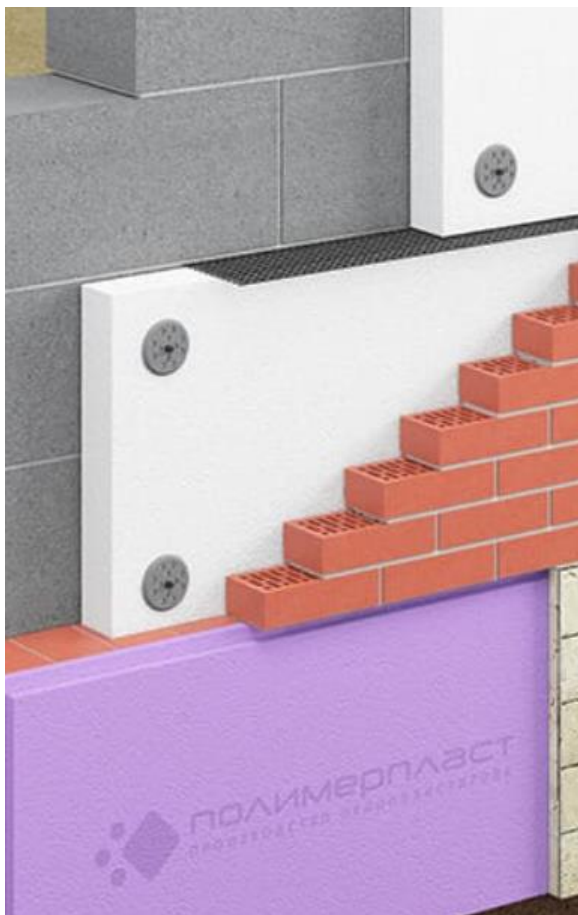


Рис. 1.7. Схема колодязної кладки [3]

Метод наплення з використанням пінополіуретану (ППУ) (рис. 1.8) – цей метод заснований на використанні легкого матеріалу як теплоізоляційного для різних конструкцій (стіни, дахи, підлоги та трубопроводи). Пінополіуретан створюється шляхом змішування ізоціанату і поліолу з каталізаторами та різними наповнювачами. Під час процесу створення матеріалу суміш розпилюється на поверхню яка знаходиться між стінками каркасу, розширюється і потім висихає, утворюючи піноподібний матеріал. Перевагами цього методу є те, що він забезпечує ефективну теплоізоляцію при невеликих товщинах, має

низький коефіцієнт теплопровідності. Крім того він є водонепроникним, що забезпечує захист від гниття та плісняви. Даний метод може використовуватись для утеплення зсередини будівлі [3].



Рис. 1.8. Метод наплення з використанням ППУ [3]

До основних типів конструкцій будинків можна віднести: дерев'яні, цегляні, бетонні та газобетонні. Для ефективного утеплення, для кожного з типу використовується індивідуальний підхід, який може повторюватись між типами і деякими моментами.

До дерев'яних будинків відносяться: каркасні, будинки з колод (зруб) та клеєного бруса. На основі них розглянемо утеплення дерев'яних будинків.

Каркасний будинок – це швидкокомтована конструкція, що складається з окремих елементів, в основі якого лежить каркас з деревини, рідше металу. Утеплення каркасного будинку це дуже важливий і невід’ємний етап будівельного процесу, якщо мова йде про комфортний, затишний і головне теплий будинок. Утеплення закладається ще на етапі зведення будинку, а саме всередині стін. Зазвичай воно робиться пошарово як конструктор, де можна самостійно обрати привабливі матеріали або ж встановлювати стіни готовими системами – панелі з прошарком, так звані сендвіч панелі [7–8].

Загалом всі поверхні каркасного будинку утепляються за одним і тим же принципом, тільки для підлоги та стелі шар повинен бути більшим ніж для стін приблизно на 40–50%, і складається з наступних шарів (рис. 1.9) [7–8]:

фасадне облицювання стін;

1. іноді додається контробрешітка;
2. гідро-, вітрозахисна мембрана;
3. каркас з утеплювачем (утеплювач вкладається в декілька шарів, тобто наступний шар утеплювача накладається на стик першого, щоб завадити проходженню повітря);
4. пароізоляційна мембрана;
5. внутрішнє облицювання стін [7–8].

Іноді, для більшого утеплення будівлі можна під фасадне оздоблення стін додати плити пінопласту, які будуть слугувати не тільки як утеплення, а ще для вирівнювання стін під оздоблення [7–8].

Основними матеріалами, яким утеплюють каркасні будинки є: пінопласт, пінополістирол, мінеральна вата (скловата, шлаковата, базальтова) і ековата. Також є випадки використання тирси та соломи, але вони не зарекомендували себе для суворого клімату [7–8].

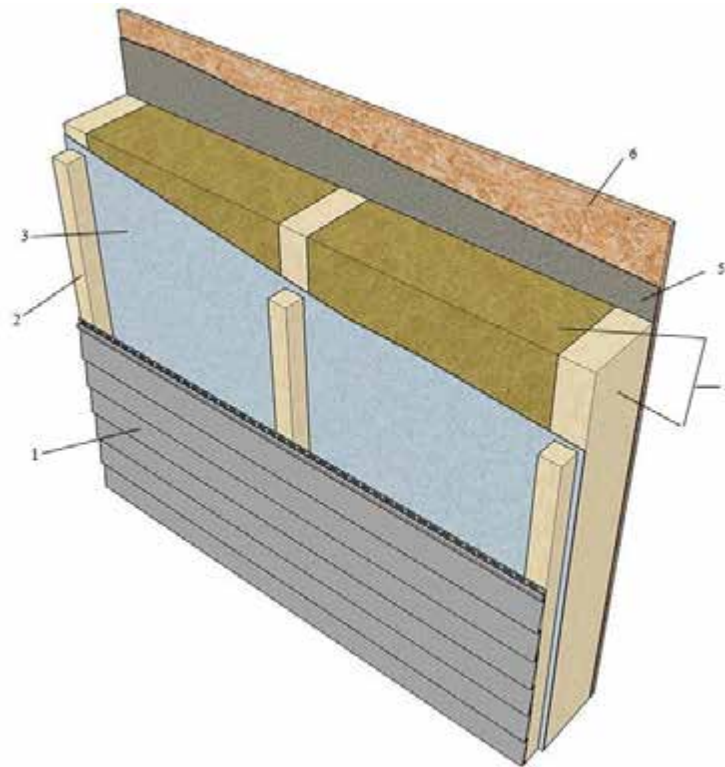


Рис. 1.9. Схема утеплення каркасного будинку [9]

Якщо планується штукатурне фасадне оздоблення, тоді складається з наступних шарів (рис. 1.10):

1. декоративна штукатурка;
2. склосітка для армування;
3. базова штукатурка;
4. зовнішня обшивка;
5. контробрешітка;
6. гідро-, вітрозахисна мембрана;

7. каркас з утеплювачем (утеплювач вкладається в декілька шарів, тобто наступний шар утеплювача накладається на стик першого, щоб завадити проходженню повітря);

8. пароізоляційна мембрана;
9. внутрішнє облицювання стін [9].

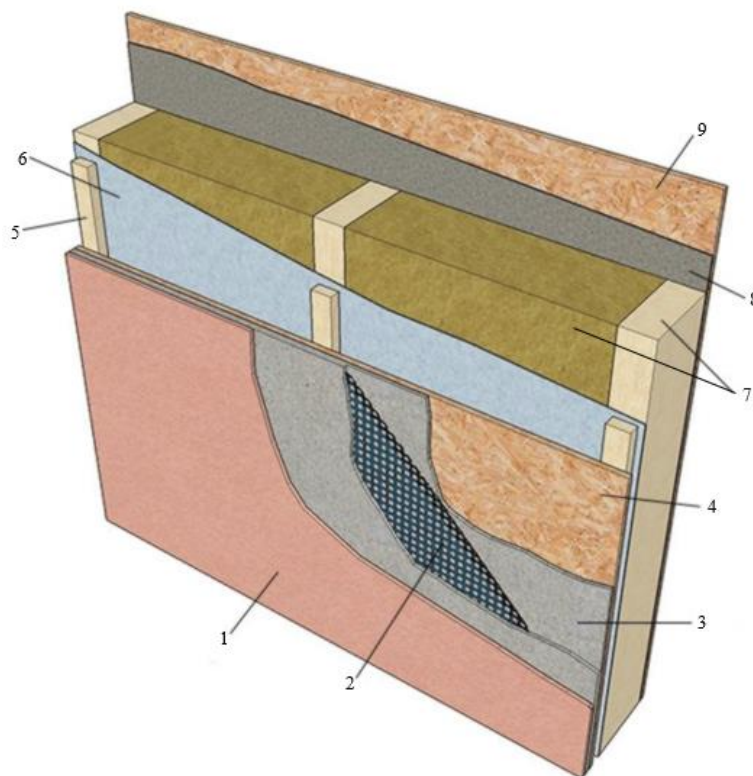


Рис. 1.10. Схема утеплення каркасного будинку зі штукатурним фасадним оздобленням [9]

Утеплення зрубу. Можна без перебільшення сказати, що зруб це найдавніший вид дерев'яних будинків у світі. В давнину даний вид будинків утеплювали вкладанням або конопаченням міжвінцевих швів мохом, рідше соломою, навіть в наші дні дуже розповсюдженим є використання даного природного матеріалу в якості утеплювача для зрубів [10–11].

На сьогоднішній день найбільш поширеним заміником моху є синтетичний утеплювач – синтепон, гарно зарекомендував себе в погодніх кліматичних умовах України. Його вкладають між вінцями на етапі зведення будинку. Після того як будинок буде збудований до кінця, обов'язковим кроком є герметизація (конопачення) швів спеціальними герметиками на акриловій основі, що захищає синтепон та стики від потрапляння вологи. Від звичайного конопачення джутом, клоччям ніхто не відмовлявся, але цими матеріалами краще утеплювати зсередини будівлі (рис. 1.11) [10–11].

Також є випадки утеплення зрубу методом сухого (вентильованого) фасаду. Стіна оброблюється антисептиком та антипіреном, монтується

пароізоляція і набивається обрешітка (каркас) з бруса перетином 50х50 см з кроком на 3 см менше чим ширина утеплювача, в шви прокладають джут, рулонний «Бальзатин» тощо, через не щільне прилягання основного утеплювача. Поверх утеплювача монтується гідро-, вітрозахисна мембрана і обшивається сайдингом. Підлога та стеля утепляється так само, як і в каркасному будинку [10–11].



Рис. 1.11. Конопачення швів зрубу [11]

Утеплення будинку з клеєного бруса проходить за аналогією утеплення зрубу та каркасного будинку. Прокладають синтепон між вінцями або в крайніх випадках монтують сухий (вентильований) фасад як в зрубках, а стелю з підлогою утеплюють як в каркасних будинках. Також існують готові варіанти, коли між ламелями прокладений шар утеплювача, так звані сендвіч панелі, але це дорогий і вкрай не розповсюджений варіант.

Що стосується цегляних, бетонних та газобетонних будинків, то вони утеплюються тільки зовні і зазвичай методами мокрого фасаду або ж методом колодязної кладки на етапі будівництва. Відмінностями може бути лише те, що для газобетону використовують рідкі анкери в мокрому способі, тому що матеріал доволі крихких та можуть виникнути відколи з тріщинами. Підлога утеплюється засипкою керамзиту зі стяжкою, а стеля монтажем каркасу і вкладанням утеплювача з подальшим обшиванням.

Також для усіх типів будинку діють такі рекомендації для утеплення різних конструкційних елементів:

- Якщо в будинку є цоколь, його ізолюють зовні, щоб уникнути контакту з вологою і холодною землею;
- В підвалі обов'язково потрібно облаштувати вентиляцію для запобігання появі конденсату, вогкості та плісняви;
- Підлога підвалу повинна мати бетонну стяжку, щоб зменшити вплив ґрунтових вод. Якщо стяжки немає, то на підлогу необхідно насипати товстий шар (не менше 10 см) піску. Пісок збільшить теплоізоляцію від землі і діятиме як гідроізоляція;
- Найкраще утеплювати стіни підвалу ззовні ще під час будівництва будинку. В іншому випадку доведеться звільняти стіни від ґрунту. Зовнішнє утеплення підвалу ефективніше, ніж внутрішнє, особливо якщо стіни також утеплені зовні: це дозволяє створити єдину систему теплоізоляції (рис. 1.12);
- Якщо стіни в підвалі утеплюються зсередини, враховується різниця температур між зовнішнім і внутрішнім простором. Щоб уникнути появи конденсату, в процесі утеплення потрібно подбати про гідро- і пароізоляцію (рис. 1.13);
- Будинок, який стоїть безпосередньо на землі (без підвалу), повинен мати бетонну стяжку, яка запобігає проникненню холодного повітря. Але бетон сам по собі холодний, його потрібно утеплювати (рис. 1.14);
- Теплоізоляція дерев'яної підлоги між поверхами проводиться лише у випадку значних коливань температури. Тоді проводиться паро- і теплоізоляція, а під дерев'яним настилом на лагах створюється зона з повітряною подушкою;
- Утеплення стелі проводиться лише за умови, що дах не утеплений і зверху немає житлового приміщення або горища, тобто спостерігається різке коливання температури;
- Якщо перекриття між поверхами дерев'яне, краще використовувати утеплювач з вати, який щільно укладається між лагами і додатково забезпечує звукоізоляцію;

- Якщо перекриття між поверхами з плит, то потрібно використовувати щільніший утеплювач (мінеральна вата, ековата, пінополіуретан);
- Утеплювати стелю кімнат на останньому поверсі краще з боку горища, оскільки утеплення з боку кімнати призведе до втрати простору;
- Утеплювати горище можна лише за умови, що усі конструкції знаходяться в надійному стані, в іншому випадку дозволяється проводити утеплення лише після ремонтних робіт;
- Для утеплення горища підійде мінеральна вата, ековата, пінопласт, пінополіуретан, керамзит, тирса. М'які утеплювачі більше підходять для дахів зі складною геометрією;
- Обов'язковим кроком при використанні утеплювача на горищі є укладання шарів гідроізоляції з боку покрівлі і пароізоляції з боку приміщення. Якщо на горищі є вікна для вентиляції, (провітрювання) то пароізоляцію використовувати не потрібно [1].

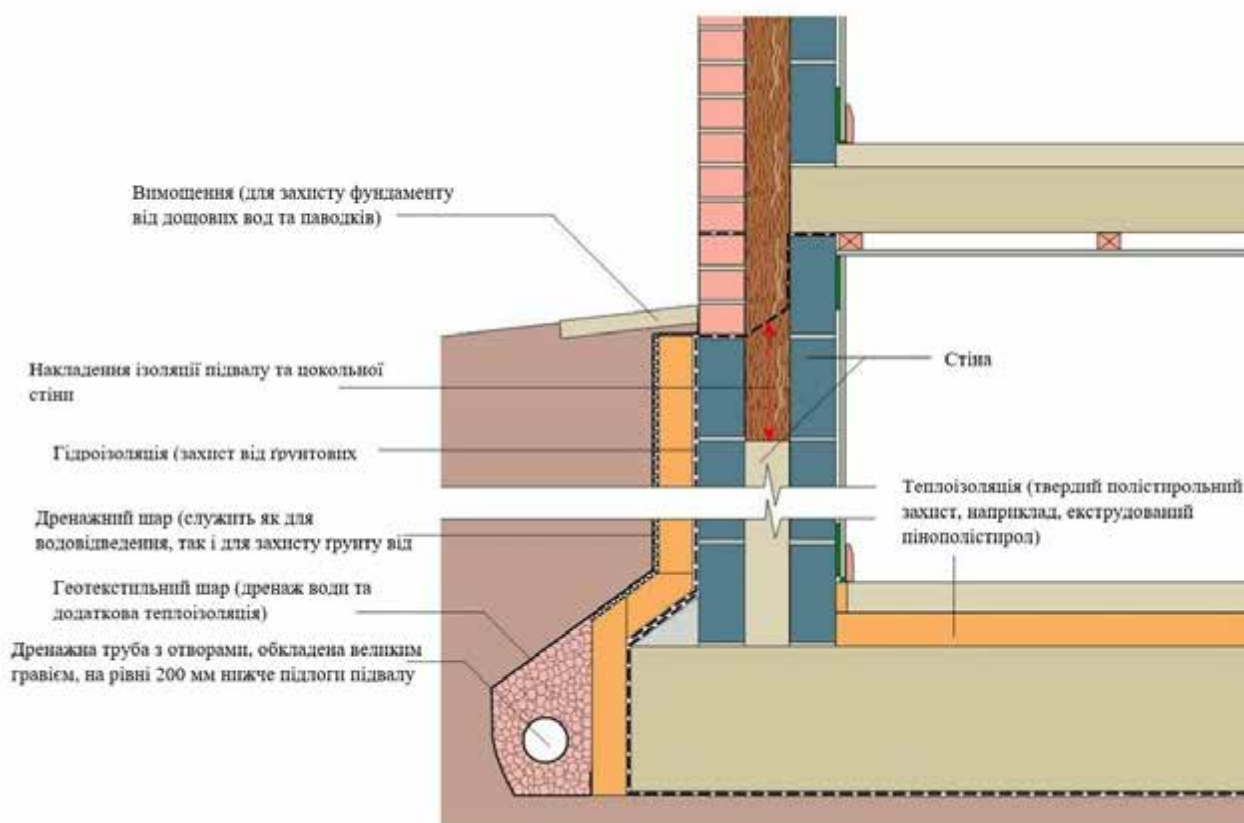


Рис. 1.12. Теплоізоляція стін підвалу зовні [1]

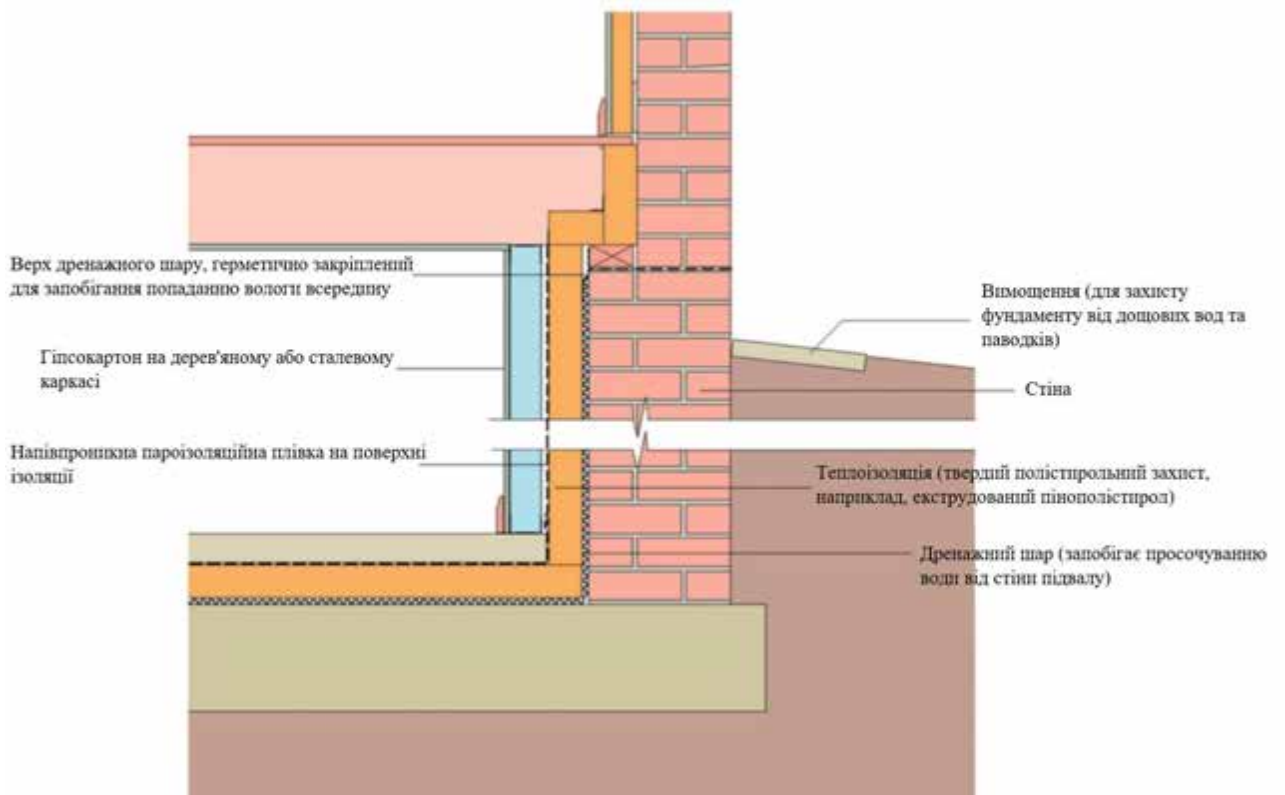


Рис. 1.13. Теплоізоляція стін підвалу зсередини [1]

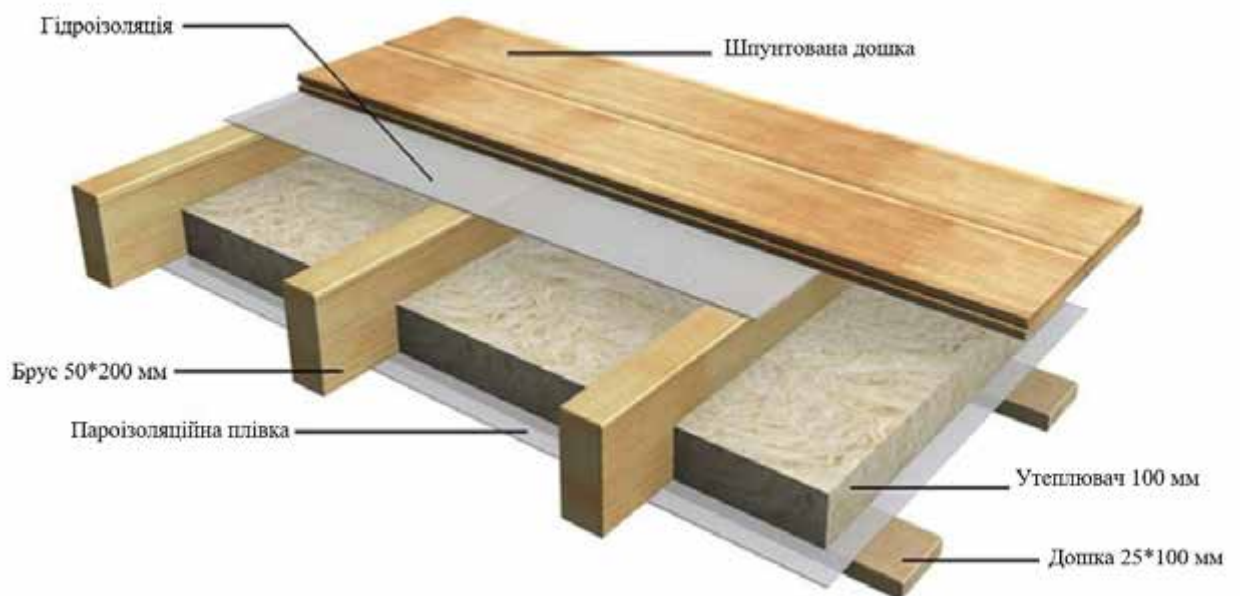


Рис. 1.14. Схема утеплення бетонної стяжки [1]

## 1.2. Аналіз матеріалів, які можуть бути використані у якості теплоізоляції

Важливою проблемою сучасності для людства є створення максимально комфортного та зручного житла. Будівельна галузь розвивається швидкими

темпами, інвестуючи 30–40% загальних світових базових ресурсів. Створюються нові будівельні матеріали та технології їх застосування. Однією з причин такого динамічного розвитку стала проблема подорожчання енергетичних ресурсів.

Тому сьогоднішній ринок пропонує безліч матеріалів, які використовують в якості теплоізоляції. Визначальними під час вибору теплоізоляційного матеріалу є наступні фізико-технічні показники згідно з ДСТУ Б В.2.7-195 [12]:  
гранична температура застосування;

- вологість;
- водопоглинання;
- морозостійкість;
- паропроникність;
- група горючості;
- міцність на стиск/границя міцності при стиску;
- стисливість;
- границя міцності при зсуві;
- границя міцності при розтягу у напрямку, перпендикулярному до поверхні;
- густина;
- правильність геометричної форми [12].

До перерахованих вище показників потрібно керуватися додатковими показниками [12]:

- розрахункова теплопровідність;
- термін ефективної експлуатації [12].

Узагальнені технічні вимоги до фізико-технічних показників теплоізоляційних матеріалів залежно від типу конструкції, де їх використовують, наведені в табл. 1 Додатку А ДСТУ 9191:2022 [12].

До найпопулярніших матеріалів для утеплення будинку можна віднести: пінопласт, екструдований пінополістирол (ЕПП), базальтова вата, ековата, пінополіуретан (ППУ), тепла штукатурка, синтапон, керамзит, тирса.

Пінопласт (рис. 1.15) – матеріал, який являє собою гранули, розміром від 3 до 10 мм. Дані гранули складаються на 2% з полістиролу і на 98% з повітря. Це самий бюджетний, легкий та простий в монтажі матеріал. Має низький рівень водопоглинання, тому не гниє. Коефіцієнт теплопровідності коливається в діапазоні від 0,035 до 0,041 Вт/(м·К) [5] [13–17].

До недоліків даного матеріалу можна віднести те, що він не поглинає шумів, горючий, не витримує потрапляння прямих сонячних променів. Моментально руйнується під дією розчинників та бензину, також при нагріванні виділяє шкідливі речовини. Низька паропроникність [13–17].



Рис. 1.15. Пінопласт [5]

Екструдований пінополістирол (ЕПП) (рис. 1.16) – це матеріал нового покоління, удосконалена версія пінопласту, що складається з гранул полістиролу з додаванням графіту, що робить його більш міцним. Призначений для використання в умовах підвезених навантажень і вологості (низьке водопоглинання). Легкий, простий в монтажі, має доволі високий показник міцності на стиск. Також він є морозостійким, хімічно стійким (за винятком органічних розчинників), не гниє. До того ж відзначається досить стабільними показниками теплопровідності від 0,029 до 0,036 Вт/(м·К) [5] [13–17].

Недоліки у даного матеріалу такі ж, як і у звичайного пінопласту.

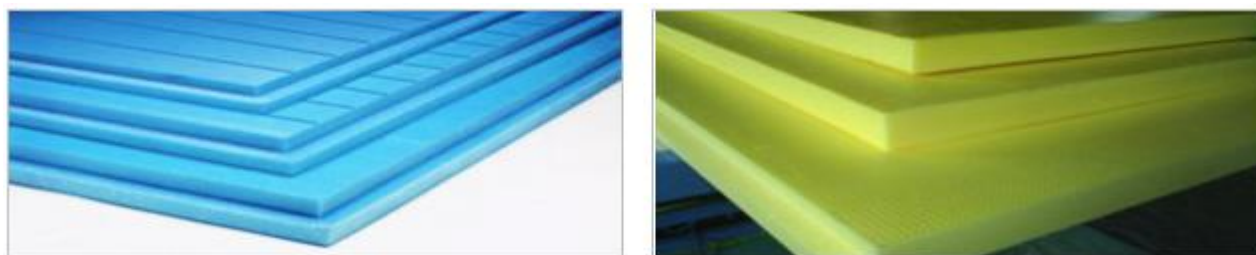


Рис. 1.16. Екструдований пінополістирол [5]

Базальтова вата (рис. 1.17) – матеріал, який виготовляється з гірських порід каменю з додаванням спеціальних екологічно безпечних смол. Завдяки своїй хаотичній, переплетені волокна, пористій структурі має досить низький показник теплопровідності від 0,036 до 0,045 Вт/(м·К). Екологічний, довговічний, має високу звукоізоляцію та високий показник паропроникності. Не горить і не поширює вогню [5] [13–17].

До недоліків можна віднести високу вартість і те, що він легко вбирає воду (даний матеріал потрібно захищати вологозахисною мембраною) [14–15].



Рис. 1.17. Базальтова вата [5]

Ековата (рис. 1.18) – матеріал, що складається з волокон целюлози, приблизно на 80% з газетного паперу і на 20% з нелетких вогнегасних речовин (борна кислота та бура). Пухкий, легкий, дешевий та екологічний матеріал. Має високі показники тепло- та звукоізоляції. Не горить та не розповсюджує вогонь. Можна встановлювати вкладанням, засипанням та вологим нанесенням [18–19].

З недоліків даного матеріала відносять утворення пилу при укладанні сухим способом та необхідність мати спеціальне обладнання при мокрому способі. При вологому нанесенні обов'язково потрібно мати індивідуальний захист дихальних шляхів. Має низьку щільність [18–19].



Рис. 1.18. Ековата [18]

Пінополіуретан (ППУ) (рис. 1.19) – матеріал з пінно-комірчастою структурою, який створюється з пластмас. Це суміш поліолів та дізоціанату. Матеріал має досить високі тепло- та звукоізоляційні характеристики. Теплопровідність від 0,019 до 0,040 Вт/(м·К). Стійкий до утворення грибків та плісняви, не гниє, може використовуватись в умовах високої вологості [13–16].

З недоліків можна відмітити те, що він має високу вартість та потрібне спеціальне обладнання для його нанесення. Також має низьку стійкість до ультрафіолету [13–16].



Рис. 1.19. Пінополіуретан (ППУ) [16]

Тепла штукатурка (рис. 1.20) – даний матеріал не використовується як самостійний утеплювач. У даному матеріалі, як наповнювач, замість піску

використовуються речовини з низькою теплопровідністю. Види теплої штукатурки [5]:

1. Спучений вермикуліт – є наповнювачем одного з видів теплої штукатурки. Це легкий мінеральний наповнювач який має антисептичні властивості. Може використовуватись для внутрішньої, так і зовнішньої обробки приміщень;

2. Тирсова штукатурка – складається з тирси, цементу, глини та паперу. Використовують для утеплення приміщень зсередини. Нею можна покривати цегляні, бетонні та дерев'яні поверхні;

3. Тепла штукатурка, в складі якої знаходиться цемент, вапно добавки та як наповнювач – розширені гранули пінополістиролу. Її можна наносити як на фасад так і на поверхні всередині приміщення [5].

Перевагами є швидкість виконання роботи, висока адгезія, екологічна, негорюча. Стійка до грибків. До недоліків відносять високу вартість, вагу та необхідність додаткової обробки стін [5].



Рис. 1.20 Тепла штукатурка [16]

Синтапон (рис. 1.21) – матеріал, що складається з поліефірних волокон віскози або лавсану. Легкий, пружний, має досить високу щільність. Стійкий до коливання температур, не піддається поширенню гнилі та цвілі. Має гарні теплоізоляційні характеристики, високу паропроникність та непогані звукоізоляційні властивості. До недоліків відносять спірну екологічність та складність монтажу при утепленні стін [10] [20].



Рис. 1.21. Синтепон [20]

Керамзит (рис. 1.22) – матеріал отриманий випалом глиняних сланців або самої глини при високих температурах. Не дорогий, екологічний, не горить та не підтримує вогонь. Має високі звукоізоляційні властивості та низьку теплопровідність (в середньому від 0,011 до 0,017 Вт/(м·К)). Не гниє, має несприятливі умови для розвитку цвілі та грибків. Морозостійкий та міцний матеріал [21–22].

До основних недоліків можна віднести те, що при роботі з ним виникає багато пилу, гігроскопічний і потрібно товстий шар при засипанні [21–22].



Рис. 1.22. Керамзит [21]

Тирса (рис. 1.23) – природний матеріал, відходи деревооброблювальної галузі. Має доволі хороші теплоізоляційні характеристики при товстому шарі

(коли засипана шаром 10 см вона відповідає 8–9 см мінеральної вати або 7 см пінопласту). Має високі показники довговічності та паропроникності [23].

До недоліків відносять її пожежонебезпечність, схильність до гниття та складність процесу укладання [23].



Рис. 1.23. Тирса [23]

### 1.3. Аналіз існуючих досліджень з виготовлення композитних теплоізоляційних матеріалів

Аналізуючи існуючі дослідження з виготовлення композитних теплоізоляційних матеріалів, особливу увагу приділяють вхідним матеріалам, які будуть використовуватись в композиті. Основною характеристикою якою оперують при виборі є теплопровідність. Використовувані вхідні матеріали повинні мати низький показник теплопровідності для зменшення передачі тепла через композит [24-40].

Призначення даного композиту також є визначальним фактором, в теорії надати йому галузь використання і потім на практиці визначити в якій сфері його краще використовувати [24-40].

Також приділяють увагу щільності вхідних матеріалів, матеріали з меншим показником щільності часто мають кращі теплоізоляційні властивості. До того ж вага таких матеріалів буде меншою, що в кінцевому результаті якоюсь мірою буде впливати на продукт (наприклад, для ізоляційно-монтажних цілей об'ємна маса такого композиту повинна бути не більше  $400 \text{ кг/м}^3$ ) [24-40].

Крім цього приділяють увагу виду/формі та розмірам композиту, який хочуть отримати та його структурі. Матеріали можуть бути формовані (листи, плити, рулони, цегла, блоки) і безформні (засипки, набивання, штукатурки і т. д.) Вишукують баланс, особливо по товщині для збереження меншої ваги та кращих теплофізичних властивостей. Щодо структури, відомо, що чим пористий матеріал – тим кращі його ізоляційні властивості. Тому в даному питанні також намагаються знайти баланс, щоб зберегти міцність і гарні теплоізоляційні властивості [24-40].

Композити проектують так, щоб витримувати певний діапазон температур без шкоди їх структурній цілісності або ізоляційних властивостей. Також не потрібно забувати й про впливи навколишнього середовища, тому композит повинен бути готовим до впливу вологи, хімічним чинникам, ультрафіолетового випромінювання тощо. Фактори, які можуть вплинути на довгострокові експлуатаційні характеристики та ізоляцію матеріалу [24-40].

Ну і не менш важливим є вартість композиту, досягти оптимальних ізоляційних характеристик, утримуючи загальну вартість в прийнятних межах [24-40].

Існуючі дослідження в сфері виготовлення композитних теплоізоляційних матеріалів показують, що в умовах сьогодення все більше використовуються екологічно чисті матеріали для їх виготовлення. Все більше використовують відходи різних виробництв, тирса не є виключенням. Більша частка отриманої тирси при виробництві в деревообробній галузі йде в пустоту, тобто нікуди. Це і підштовхує виробників купувати або навіть забирати тирсу у підприємців, які готові віддати її безкоштовно, щоб тільки позбутись її.

Проаналізувавши подібні дослідження з виробництва теплоізоляційних композитів з використанням екологічних матеріалів (відходів) можна виділити залучення морської трави, рисової соломи або листя дерев в поєднанні з різними в'язучими.

Виявлено, що отриманий теплоізоляційний матеріал на основі морської трави (зостери) у поєднанні з рідким склом є досить хорошим природним

матеріалом за експлуатаційними та технологічними властивостями у порівнянні з аналогічними, як фіброліт, арболіт, соломіт чи торфоплита. А саме головне, що виробництво теплоізоляційних плит на основі зостери вирішить проблему утилізації тисяч тон морської трави.

Щодо використання такого матеріалу як листя дерев показує, що в поєднанні з рідким склом він за оптимальним співвідношенням теплотехнічних характеристик, вартості та екологічності випереджає поширені на сьогодні теплоізоляційні матеріали, але не ідеальний. Дана ніша потребує удосконалення виготовлення та подальші дослідження.

Дослідження з використанням рисової та інших видів соломи проводиться вже давно, особливо в країнах з високим розвитком сільськогосподарської галузі, наприклад Китай. Там дослідили, що використання такого матеріалу у виготовленні теплоізоляційного композиту в поєднанні з різними в'язучими і особливо за допомогою високочастотного гарячого пресування виходять досить достойні матеріали, які мають доволі гарні показники теплопровідності в порівнянні з існуючими аналогами синтетичного походження.

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ

### 2.1. Аналіз існуючих методик визначення теплофізичних властивостей різних матеріалів

Теплофізичні властивості – це сукупність властивостей, що характеризують поведінку матеріалу під час змінювання температури. Знання про теплофізичні властивості матеріалів дозволяють обґрунтовано вибрати галузі техніки застосування та оптимальні температурні інтервали експлуатації виробів для таких матеріалів [41-43].

Основними показниками теплофізичних властивостей є: коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт тепловіддачі, тепловий потік, коефіцієнт теплопередачі, питома теплоємність, коефіцієнт термічного/теплового розширення, коефіцієнт температуропровідності, коефіцієнт теплосасвоєння, межа вогнетривкості, показник вогнетривкості.

Коефіцієнт теплопровідності – це кількість теплоти, що передається за одиницю часу крізь одиницю площі стінки, яка має товщину в одиницю довжини при різниці температур між поверхнями стінки  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

Коефіцієнт тепловіддачі – це кількісна характеристика тепловіддачі, що визначається тепловим потоком, який віддається одиницею поверхні тіла за одиницю часу при наявності різниці температур середовища і поверхні;

Тепловий потік – це кількість теплоти, що проходить за одиницю часу крізь одиницю поверхні;

Коефіцієнт теплопередачі – це кількісна характеристика теплопередачі, що визначається кількістю теплоти, яка передається крізь одиницю поверхні стінки або межі розділу за одиницю часу при наявності різниці температур середовищ  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

Питома теплоємність – це теплоємність одиниці кількості матеріалу масової, об'ємної або молярної при постійному тиску або постійному об'ємі;

Коефіцієнт термічного/теплого розширення – це кількісна характеристика термічного розширення, яка визначається відносною зміною лінійного розміру або об'єму зразка матеріалу в процесі нагрівання;

Коефіцієнт температуропровідності – це кількісна характеристика температуропровідності, що визначається зміною температури одиниці об'єму матеріалу в залежності від теплового потоку який проходить за одиницю часу крізь одиницю поверхні в шарі одиничної товщини при одиничній різниці температур на його поверхнях;

Коефіцієнт теплосасвоєння – це кількісна характеристика теплосасвоєння, яка визначається амплітудою коливань теплового потоку при коливанні температури на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

Межа вогнестійкості – проміжок часу від початку з'явлення в матеріалі граничного стану, руйнування, самозаймання;

Показник вогнетривкості – це температура, під дією якої матеріал деформується, розм'якшується та руйнується, розплавляється [41-43].

Методи визначення теплофізичних властивостей поділяються на стаціонарні та нестаціонарні. Стаціонарні методи базуються на закономірностях стаціонарного розподілення температур в тілах найпростішої форми (пластина, циліндр, куля або еліпсоїд) під час їх нагрівання одномірним у відповідних координатах постійним за часом тепловим потоком. В свою чергу, нестаціонарні методи визначення теплофізичних властивостей базуються на нестаціонарних теплових процесах перенесення теплоти [41-43].

До стаціонарних методів відносяться:

1. Стаціонарний метод пластини – метод визначення теплопровідності, що базується на залежності теплопровідності від теплового потоку, який проходить крізь площу теплосприймаючої поверхні зразка визначеної товщини при визначеній різниці температур на його гарячій і холодній сторонах;

2. Абсолютний стаціонарний метод визначення теплопровідності – визначення відбувається за допомогою водяного проточного калорифера.

Метод при якому вимірювання теплового потоку здійснюється шляхом безпосередньо вимірювання температури на вході і виході із калорифера за допомогою ртутних термометрів або термопар і масових витрат води в калорифері;

3. Термопара – це чутливий елемент термоелектричного термометра, який складається із двох різнорідних провідників або напівпровідників, що з'єднані у двох точках, при наявності між котрими різниці температур виникає термоелектрорушійна сила;

4. Термоелектричний матеріал – матеріал, який служить для безпосереднього перетворення теплової енергії в електричну і навпаки;

5. Абсолютний стаціонарний метод – визначення проводиться для теплопровідності і відбувається за допомогою електронагрівача. Метод базується на визначенні теплового потоку безпосереднім вимірюванням потужності, яка виділяється електронагрівачем, за допомогою електровимірювальних приладів;

6. Абсолютний метод визначення теплопровідності за допомогою тепло вимірювача – метод базується на безпосередньому вимірюванні теплового потоку спеціально градуїтованим тепло вимірювачем;

7. Відносний метод визначення теплопровідності, метод еталона – визначення теплопровідності матеріалу шляхом її порівняння з вимірюванням температур термопарами, що установлені в зразку та еталоні;

8. Стаціонарний метод циліндра – метод визначення теплопровідності, який базується на вимірюванні теплового потоку на ізотермічній ділянці нагрівача у вигляді тонкого стержня або дроту, розташованих всередині зразка шляхом вимірювання потужності електронагрівача або за допомогою водяного калорифера;

9. Стаціонарний метод кулі (еліпсоїда) – метод базується на визначенні теплового потоку шляхом вимірювання потужності електронагрівача у формі кульового шару або еліпсоїду, який розміщено між сферичними або еліпсоїдними шарами зразка і теплоізоляційної оболонки [41-43].

До нестационарних методів відносяться:

1. Метод гарячого дроту – метод базується на вимірюванні підвищення температури лінійного джерела тепла у вигляді дроту, що нагрівається електричним струмом та встановлюється у зразку, під час виділення постійного теплового потоку за відносно малий проміжок часу;

2. Метод монотонного нагрівання – це метод визначення температуропровідності, який базується на використанні квазістаціонарного режиму, шляхом вимірювання різниці температур на поверхні та в центрі зразка найпростішої форми або часу запізнювання руху теплового потоку між поверхнею і центром зразка;

Квазістаціонарний режим – це режим, наближений до стаціонарного, коли зразок найпростішої форми нагрівається одномірним у відповідних координатах тепловим потоком зі швидкістю, яка наближена до постійної [41-43].

3. Метод періодичного нагрівання (метод температурних хвиль) – метод визначення коефіцієнтів температуропровідності, теплопровідності і питомої теплоємності за допомогою вимірювання нестационарного теплового потоку за визначений час при встановленні температурного поля, близького до рівномірного, і створення на поверхні зразка гармонійних коливань температури;

Гармонійні коливання температури – це періодична зміна температури, що підлягає синусоїдальному закону [41-43].

4. Метод радіальних температурних хвиль – метод визначення теплофізичних властивостей грубодисперсних систем, який базується на вимірюванні часу запізнювання відношення амплітуд гармонічних коливань, зрушення фаз теплової хвилі у двох точках циліндричного зразка;

5. Метод плоских температурних хвиль – метод визначення теплофізичних властивостей матеріалів з підвищеною теплопровідністю а також тонкозернистих полікристалічних матеріалів шляхом вимірювання зрушення фаз між температурними коливаннями між плоскими гранями

зразка у вигляді пластини або диска при утворенні на одній поверхні грані періодичних коливань температури;

6. Метод визначення термостійкості – метод полягає у визначенні кількості теплотозмін, які може витримувати матеріал до втрати визначеної кількості первинної маси за час нагрівання до певної температури;

Теплозіміна – цикл, що складається з процесу нагрівання і наступного охолодження матеріалу на повітрі або у воді [41-43].

7. Метод визначення вогнетривкості – метод полягає у порівнянні температур падіння конуса, які виготовлені з матеріал, що випробовується і пірометричних конусів в умовах нагрівання [41-43].

Пірометричний конус – стандартний піроскоп. Зрізана піраміда з еталонного матеріалу певного хімічного складу, що характеризується визначеною температурою падіння [41-43].

Температура падіння пірометричного конуса – температура, при якій вершина конуса торкається основи внаслідок розм'якшення і деформації матеріалу [41-43].

2.2. Визначення режимних параметрів, що враховуються під час виготовлення композитних матеріалів

Виробничий процес виготовлення композиційного теплоізоляційного матеріалу повинен бути масштабованим, економічно ефективним і дозволяти виробляти стабільні та високоякісні теплоізоляційні композити. Залежно від матеріалу та сфери застосування можуть розглядатися різні методи виробництва, такі як лиття, формування або екструзія.

Якщо брати на прикладі формування, тобто пресування, то будуть враховуватись наступні параметри:

1. Розміри та вага вхідних матеріалів;
2. Розміри прес-форми та задуманого матеріалу;
3. Співвідношення вхідних матеріалів та в'язучого (варіюється в залежності від попередніх досліджень, наприклад: 50:50; 60:40; 70:30 – якщо

використовуються два компонента, або 40:30:30; тощо, якщо використовуються три і так далі компонентів);

4. Укладка (орієнтація) суміші;

5. Температура пресування (дана температура залежить від використовуваних матеріалів, обладнання і коливається в районі від 150°C до 250°C);

6. Температура в'язучого (контролюється в тому випадку коли використовуються смоли в рекомендаціях до яких потрібно підтримувати в певному діапазоні або не перевищувати певної позначки і це залежить від виробника);

7. Тиск під час формування (може варіюватися в широких межах, але найчастіше він знаходиться приблизно в діапазоні від 5 до 20 МПа);

8. Час пресування або час пресування при різних етапах якщо при різних температурах (залежить від обладнання, матеріалів, в'язучого і може становити від декількох хвилин до декількох годин);

9. Час витримки або час затвердіння (залежить від використовуваного в'язучого та метода пресування, обладнання і самого отриманого композиту. Деяким потрібно від декількох хвилин, іншим до годин) [24-40].

Також потрібно не забувати, що при вкладанні суміші у прес-форму треба використовувати розділові суміші, щоб в подальшому було легше витягувати отриманий композит з форми.

Після усього процесу композит (зразок) досліджують, перевіряють по необхідним параметрам (розміри, вага, щільність, структура, теплофізичні властивості тощо), звіряють з параметрами які хотіли отримати та рекомендують даному матеріалу галузь використання відповідно до отриманих результатів.

**РОЗДІЛ 3. ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ ДЛЯ  
ВИЗНАЧЕННЯ ПРІОРИТЕТНОГО В'ЯЖУЧОГО ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ  
ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ПЛИТ З ДОДАВАННЯМ ДЕРЕВНИХ ЧАСТИНОК**

Для вирішення завдання необхідні наступні дані (табл.3.1):

Таблиця 3.1

**Перелік і характеристики в'яжучих**

Вназва в'яжучого	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Час схоплювання, хв	Термостійкість, °С	Паропроникність, мг/(м·год·Па)	Ціна, грн/кг
Цемент BauGut ПЦ II/A-III 500 зі шлаком	3200	150	350	0,3	5,8
Вапно гашене Ферозіт Гідратне	1150	45	900	5	33,8
Гіпс будівельний Ферозіт ГВ Г-5-Б-II	750	11,5	275	15	18,6
Клей ПВА ІРКОМ	1,3	20	75	0,3	103
Клей "РІДКІ ЦВЯХИ" Lacrysil	1,3	17,5	50	5	300

Мета: вибір кращого в'яжучого.

Кількість альтернатив – 5.

Кількість критеріїв – 5.

Позначено альтернативи та критерії:

№	Критерії	№	Альтернативи
Кр1	Густина	A1	Цемент BauGut ПЦ II/A-III 500 зі шлаком
Кр2	Час схоплювання	A2	Вапно гашене Ферозіт Гідратне
Кр3	Термостійкість	A3	Гіпс будівельний Ферозіт ГВ Г-5-Б-II
Кр4	Паропроникність	A4	Клей ПВА ІРКОМ
Кр5	Ціна	A5	Клей "РІДКІ ЦВЯХИ" Lacrysil

У процесі вибору найкращого матеріалу побудовано та заповнено матрицю парних порівнянь (МПП) (табл. 3.1) критеріїв відносно мети. Цей процес базується на особистому аналізі того, як характеристики впливають на досягнення конкретної мети.

Спершу розраховують значення середнього геометричного значення елементів матриці за формулою [44]:

$$G_i(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{is}) = (a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot \dots \cdot a_{is})^{\frac{1}{s}}, \quad (3.1)$$

де:  $i$  – номер рядка матриці;

$s$  – кількість елементів в  $i$ -му рядку матриці;

$a_{i1} = w1/w1; a_{i2} = w2/w2; \dots a_{is} = w1/w_s$ .

$$G_i = (1 * 1,50 * 1,29 * 1,80 * 1,13)^{\frac{1}{5}} = 1,313$$

Далі обчислюють значення ЛПр для першого рядка за формулою [44]:

$$\text{ЛПр}_1 = \frac{[(w1/w1) \cdot (w2/w2) \cdot \dots \cdot (wn/wn)]^{\frac{1}{s}}}{(G_1 + G_2 + \dots + G_n)}, \quad (3.2)$$

$$\text{ЛПр}_1 = \frac{(1 * 1,50 * 1,29 * 1,80 * 1,13)^{\frac{1}{5}}}{(1,313 + 0,875 + 1,021 + 0,730 + 1,167)} = 0,257$$

Розрахунок ЛПр для інших рядків виконується аналогічним чином.

Наступним кроком йде перевірка, наскільки однозначні та узгоджені експертні оцінки, тобто числа в матрицях парних порівнянь. Щоб здійснити цей контроль, використовуються дві важливі характеристики – індекс узгодженості (CI) і відношення узгодженості (CR), які розраховують за формулами [44]:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad (3.3)$$

$$CR = \frac{CI}{P_n}, \quad (3.4)$$

де:  $n$  – розмір матриці;

$P_n$  – індекс узгодженості для позитивної зворотної симетричної матриці випадкових оцінок  $n \times n$ ;

$\lambda_{max}$  – максимальне власне число матриці парних порівнянь або  $L_{am}$  обчислюють наступним чином:

1. Підсумовують значення 1-го рядка матриці;
2. Множать отриману суму на значення вектору локальних пріоритетів (ЛПр) 1-го рядка матриці;
3. Теж саме повторюють і для інших рядків матриці. При цьому суму кожного рядка матриці множать на відповідне значення вектору локальних пріоритетів (суму 2-го рядка множать на значення вектору локальних пріоритетів ЛПр 2-го рядка; суму 3-го рядка на ЛПр 3-го рядка і так далі);
4. Підсумовують отримані результати. Це і буде максимально власне число МПП –  $\lambda_{max}$ , його також позначають як  $L_{am}$  [44].

$$L_{am} = (1 + 1,50 + 1,29 + 1,80 + 1,13) * 0,257 + (0,67 + 1 + 0,86 + 1,20 + 0,75) * 0,171 + (0,78 + 1,17 + 1 + 1,40 + 0,88) * 0,200 + (0,56 + 0,83 + 0,71 + 1 + 0,63) * 0,143 + (0,89 + 1,33 + 1,14 + 1,60 + 1) * 0,229 = 5,432 \quad (3.5)$$

$$CI = \frac{5,432 - 5}{5 - 1} = 0,108$$

$$CR = \frac{0,108}{1,12} = 0,097$$

Результати розрахунків занесено в табл. 3.1.

За допомогою цього методу розраховано та заповнено табл. 3.2–3.6.

Таблиця 3.2

### Матриця МПП критеріїв відносно мети

	Назва	Кр1	Кр2	Кр3	Кр4	Кр5	G	ЛПр1
Кр1	Густина	1	1,50	1,29	1,80	1,13	1,313	0,257
Кр2	Час захоплення	0,67	1	0,86	1,20	0,75	0,875	0,171
Кр3	Термостійкість	0,78	1,17	1	1,40	0,88	1,021	0,200
Кр4	Паропроникність	0,56	0,83	0,71	1	0,63	0,730	0,143
Кр5	Ціна	0,89	1,33	1,14	1,60	1	1,167	0,229
Сума							5,107	1,0

Показники: N=5;  $L_{am}=5,432$ ;  $CI=0,108$ ;  $CR=0,097$

Найбільше значення ЛПр=0,257

Таблиця 3.3

**Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію «Густина»**

	Назва	A1	A2	A3	A4	A5	G	ЛПр2
A1	Цемент BauGut ПЦ II/A-III 500 зі шлаком	1	1,13	1,29	1,50	1,80	1,313	0,257
A2	Вапно гашене Ферозіт Гідратне	0,89	1	1,14	1,33	1,60	1,167	0,229
A3	Гіпс будівельний Ферозіт ГВ Г-5-Б-II	0,78	0,88	1	1,17	1,40	1,021	0,200
A4	Клей ПВА ІРКОМ	0,67	0,75	0,86	1	1,20	0,875	0,171
A5	Клей "РІДКІ ЦВЯХИ" Lacrysil	0,56	0,63	0,71	0,83	1	0,730	0,143
Сума							5,107	1,0

Показники: N=5; Lam=5,432; CI=0,108; CR=0,097

Найбільше значення ЛПр=0,257

Таблиця 3.4

**Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію «Час  
схоплювання»**

	Назва	A1	A2	A3	A4	A5	G	ЛПр3
A1	Цемент BauGut ПЦ II/A-III 500 зі шлаком	1	0,83	0,56	0,71	0,63	0,730	0,143
A2	Вапно гашене Ферозіт Гідратне	1,20	1	0,67	0,86	0,75	0,875	0,171
A3	Гіпс будівельний Ферозіт ГВ Г-5-Б-II	1,80	1,50	1	1,29	1,13	1,313	0,257
A4	Клей ПВА ІРКОМ	1,40	1,17	0,78	1	0,88	1,021	0,200
A5	Клей "РІДКІ ЦВЯХИ" Lacrysil	1,60	1,33	0,89	1,14	1	1,167	0,229
Сума							5,107	1,0

Показники: N=5; Lam=5,432; CI=0,108; CR=0,097

Найбільше значення ЛПр=0,257

Таблиця 3.5

**Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію «Терmostійкість»**

	Назва	A1	A2	A3	A4	A5	G	ЛПр4
A1	Цемент BauGut ПЦ II/A-III 500 зі шлаком	1	0,89	1,14	1,33	1,60	1,167	0,229
A2	Вапно гашене Ферозит Гідратне	1,13	1	1,29	1,50	1,80	1,313	0,257
A3	Гіпс будівельний Ферозит ГВ Г-5-Б-II	0,88	0,78	1	1,17	1,40	1,021	0,200
A4	Клей ПВА ІРКОМ	0,75	0,67	0,86	1	1,20	0,875	0,171
A5	Клей "РІДКІ ЦВЯХИ" Lacrysil	0,63	0,56	0,71	0,83	1	0,730	0,143
Сума							5,107	1,0

Показники: N=5; Lam=5,432; CI=0,108; CR=0,097

Найбільше значення ЛПр=0,257

Таблиця 3.6

**Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію  
«Паропроникність»**

	Назва	A1	A2	A3	A4	A5	G	ЛПр5
A1	Цемент BauGut ПЦ II/A-III 500 зі шлаком	1	1,33	2,00	1,14	1,60	1,373	0,267
A2	Вапно гашене Ферозит Гідратне	0,75	1	1,50	0,86	1,20	1,030	0,200
A3	Гіпс будівельний Ферозит ГВ Г-5-Б-II	0,50	0,67	1	0,57	0,80	0,686	0,133
A4	Клей ПВА ІРКОМ	0,88	1,17	1,75	1	1,40	1,201	0,233
A5	Клей "РІДКІ ЦВЯХИ" Lacrysil	0,63	0,83	1,25	0,71	1	0,858	0,167
Сума							5,148	1,0

Показники:  $N=5$ ;  $Lam=5,602$ ;  $CI=0,150$ ;  $CR=0,154$

Найбільше значення  $LPr=0,265$

Таблиця 3.7

### Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію «Ціна»

	Назва	A1	A2	A3	A4	A5	G	LPr6
A1	Цемент BauGut ПЦ II/A-III 500 зі шлаком	1	1,29	1,13	1,50	2,25	1,373	0,265
A2	Вапно гашене Ферозит Гідратне	0,78	1	0,88	1,17	1,75	1,068	0,206
A3	Гіпс будівельний Ферозит ГВ Г-5-Б-II	0,89	1,14	1	1,33	2,00	1,221	0,235
A4	Клей ПВА ІРКОМ	0,67	0,86	0,75	1	1,50	0,915	0,176
A5	Клей "РІДКІ ЦВЯХИ" Lacrysil	0,44	0,57	0,50	0,67	1	0,610	0,118
Сума							5,187	1,0

Показники:  $N=5$ ;  $Lam=5,757$ ;  $CI=0,189$ ;  $CR=0,169$

Найбільше значення  $LPr=0,265$

Побудовано матрицю пріоритетів критеріїв відносно мети та альтернатив відносно кожного з критеріїв [44] (табл. 3.8).

Таблиця 3.8

### Матриця пріоритетів критеріїв відносно мети та альтернатив відносно кожного з критеріїв

	Назва	ПрКр	A1 Цемент BauGut ПЦ II/A-III 500 зі шлаком	A2 Вапно гашене Ферозит Гідратне	A3 Гіпс будівельний Ферозит ГВ Г-5-Б-II	A4 Клей ПВА ІРКОМ	A5 Клей "РІДКІ ЦВЯХИ" Lacrysil
Кр1	Густина	0,257	0,257	0,229	0,200	0,171	0,143
Кр2	Час схоплювання	0,171	0,143	0,171	0,257	0,200	0,229
Кр3	Термостійкість	0,200	0,229	0,257	0,200	0,171	0,143
Кр4	Паропроникність	0,143	0,267	0,200	0,133	0,233	0,167
Кр5	Ціна	0,229	0,265	0,206	0,235	0,176	0,118

Розраховують значення глобального пріоритету ГлПр. Значення ГлПр для рядка А1 отримують шляхом підсумовування добутків значень стовпця «ПрКр» (табл. 3.7) на значення у стовпці «А1». Аналогічно обчислюють значення ГлПр для усіх інших рядків [44].

$$\text{ГлПр}_1 = (0,257 * 0,257) + (0,171 * 0,143) + (0,200 * 0,229) + (0,143 * 0,267) + (0,229 * 0,265) = 0,235 \quad (3.6)$$

Отримані дані занесено у табл. 3.9 глобальні пріоритети альтернатив

Таблиця 3.9

### Глобальні пріоритети альтернатив

	Назва	ГлПр
1	Цемент BauGut ПЦ II/A-III 500 зі шлаком	0,235
2	Вапно гашене Ферозіт Гідратне	0,215
3	Гіпс будівельний Ферозіт ГВ Г-5-Б-II	0,208
4	Клей ПВА ІРКОМ	0,186
5	Клей "РІДКІ ЦВЯХИ" Lacrysil	0,155

Із табл. 3.9 видно, що Альтернатива А1 (Цемент) має найбільше значення глобального пріоритету – 0,235 і є найкращою для досягнення поставленої мети.

Розрахунки показали, яке в'язуче є найкращим, а яке найгіршим. Слід взяти найкраще та два наступних після нього в'язучих для виготовлення дослідних зразків та проведення досліджень, щоб дізнатись чи підходять вони для виготовлення теплоізоляційних плит з додаванням деревних частинок, адже достовірність теоретичних розрахунків підтверджується експериментальним шляхом.

## РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1. Методика виготовлення зразків

В'язучий матеріал є другим, але не менш важливим, елементом будь-якого теплоізоляційного матеріалу. Саме на нього покладено завдання з'єднати усі компоненти воедино, забезпечуючи гарне суміщення з наповнювачем, забезпечуючи гарні клейові властивості, міцність усього композиту, екологічність та здатність протидіяти різним шкідникам.

Підбір в'язучих матеріалів відбувався на основі проведеного аналізу різного спектру джерел інформації та проведеного розрахунку за «Метод багатокритеріального аналізу ієрархій» в 3 розділі. За підсумками обрано 3 в'язучі матеріали: вапно, цемент та гіпс.

Вапно – є одним з найдавніших і найпоширеніших в'язучих матеріалів, що використовуються в будівництві. Вапно отримують шляхом випалювання карбонатних гірських порід, таких як вапняк, крейда або доломіт, при температурі нижче точки спікання. Основним компонентом вапна є оксид кальцію ( $\text{CaO}$ ), який утворюється в результаті термічного розкладу карбонатів. Вміст вапна як в'язучого в теплоізоляційному матеріалі дозволяє перероблювати його в навколишнє середовище, а також дозволяє використовувати вапно як добриво для ґрунту, через свою здатність знижувати його кислотність [45].

Цемент – без перебільшень найпоширеніший будівельний матеріал, в'язуче. Це є дрібнодисперсний порошок сірого кольору, інколи з різними відтінками. Після взаємодії з водою цемент утворює пластичну масу, що згодом твердне, перетворюючись на «камінь». Згідно сировини, з якої виготовляють цементи, розрізняють наступні види:

1. Карбонатний – виготовляється з крейди, вапняків, вапняків-черепашників, доломіту, мергель, туф;
2. Глинистий – виготовляється з глини, глинистих сланців, суглинків [46].

Ще існує такий вид – портландцемент. Він може бути без мінеральних добавок, або з ними. Найголовнішим компонентом цементу є клінкер.

Одержується випалюванням суміші вапняку (крейди, мергелю, тощо) в кількості 76% з додаванням 25% глини. Потім його перемелюють і змішують з різними добавками [46].

Гіпс – природний мінерал осадового походження, що є водним сульфатом кальцію. Гіпс формується внаслідок осадження сульфатів у воді, зазвичай в умовах теплих і вологих кліматів. Завдяки своїм унікальним властивостям, гіпс знайшов широке використання у будівництві та інших галузях. Він використовується як додатковий або основний компонент в різних матеріалах, гіпсова шпаклівка, гіпсокартон та інші вироби на основі гіпсу використовуються для вирівнювання стін, створення декоративних елементів, як в'язуче. Гіпс має чудові звукоізоляційні властивості та є вогнестійким матеріалом, що робить його ідеальним вибором для багатьох будівельних проектів. Його легкість у обробці та можливість швидкого висихання роблять його незамінним у сучасному будівництві [47].

При виготовленні теплоізоляційного матеріалу слід приділити значну увагу підбору пропорцій компонентів, що будуть входити в композит. На підготовчому етапі обрано основні поєднання в'язучих з деревними частинками, але в подальшому запропоновано поєднати цемент з піском та збільшити кількість дослідних зразків, також з наукового інтересу, поєднавши в'язучі матеріали з деревними частинками та керамзитом. В подальшому це дасть змогу подивитись як впливають додаткові компоненти на якість та теплоізоляційні властивості плит. В результаті вийшло 8 варіацій дослідних зразків:

1. Деревні частинки + вапно;
2. Деревні частинки + цемент;
3. Деревні частинки + цемент + пісок;
4. Деревні частинки + гіпс + вапно;
5. Деревні частинки + керамзит + вапно;
6. Деревні частинки + керамзит + цемент;
7. Деревні частинки + керамзит + цемент + пісок;
8. Деревні частинки + керамзит + гіпс + вапно.

Пропорції для зразків обрано в наступній відповідності:

- Для зразків під №1-4 – пропорція складає 50/50%, відповідно деревних частинок 50% і в'язучого 50%. Якщо використовується 3 компоненти, пропорція має вигляд: 50/25/25 %;
- Для зразків під №5-8 – пропорція складає 25/25/50 %, відповідно деревних частинок і керамзиту по 25%, в'язучого 50%. Якщо використовується 4 компоненти, пропорція має вигляд 25/25/25/25 %.

Після остаточного узгодження усіх компонентів, варіацій та пропорцій, розпочато етап виготовлення дослідних зразків. Для формування зразків обрано металеву форму розмірами 200x200x50 мм, в якій формувались зразки (рис.4.1).



Рис. 4.1. Металева форма

Для змішування усіх компонентів використано окрему тару та міксер (рис.4.2).



Рис. 4.2. Змішування компонентів

Задля точності пропорцій та подальшого зважування виготовлених зразків використано окрему тару та лабораторні ваги (рис.4.3). Суміші готувалась з розрахунком на 1 кг сухих компонентів.



Рис. 4.3. Зважування суміші

Під час виготовлення зразків під №1-4, їх сумішей виходили більше: для 1-2 зразків на півтори форми, для 3-4 на дві форми. У випадку зразків 5-8, суміші виходили лише на 1 зразок. Тому, прийнято рішення, додаткові суміші зразків під №1-4 сформувати в додаткові зразки, які отримали приставку «1» після первинного номеру: 1.1, 2.1, 3.1 та 4.1. Загальна кількість дослідних зразків зросла до 12. Усі зразки одразу після формування виймалися з металевої форми та розміщувались на шматку лінолеума, щоб запобігти їх приставанню до поверхні (рис.4.4).



Рис. 4.4. Загальна кількість зразків першої партії: 1. Деревні частинки + вапно; 2. Деревні частинки + цемент; 3. Деревні частинки + цемент + пісок; 4. Деревні частинки + гіпс + вапно; 5. Деревні частинки + керамзит + вапно; 6. Деревні частинки + керамзит + цемент; 7. Деревні частинки + керамзит + цемент + пісок; 8. Деревні частинки + керамзит + гіпс + вапно

Після застигання суміші, помічено що зразки під №3-4 та №3.1-4.1 є досить крихкими. Вирішено змінити підхід до їх виготовлення і прийнято зміни в приготуванні їх сумішей. На початковому етапі замішувалось в'язуче і вже в нього додавали деревні частинки з невеликим підпресуванням, без зміни пропорцій. Отримано зразки під №3, 4(2) та 4.1 (2). В зразку під №3, з попередньої партії, змінено компоненти – пісок замінено на вапно, з чого вийшли зразки під №3 (1.1) та 3.1 (1.1). Загалом, в другій партії нараховано ще 5 зразків (рис.4.5). Загальна кількість дослідних зразків зросли до 17.



Рис. 4.5. Друга партія дослідних зразків

Під час застигання першої та другої партій дослідних зразків, вони знаходились під спостереженням з певним інтервалом днів. Відбувалось їх контрольне зважування, тобто контроль за зміною ваги та візуальне спостереження за їх поверхнею. Дані календарних контрольних зважувань та дані зміни маси зразків, до початку проведення досліджень, наведено в табл. 4.1 та табл. 4.2.

Таблиця 4.1

**Дати проведення контрольних зважувань зразків**

	Дати контрольних зважувань	
	Перша партія зразків	Друга партія зразків
$m_0$	16.07	24.07
$m_1$	22.07	30.07
$m_2$	30.07	06.08
$m_3$	02.08	09.08
$m_4$	06.08	14.08
$m_5$	25.09	25.09

Таблиця 4.2

## Зміна маси дослідних зразків

№ зразка	Маса зразків					
	m <sub>0</sub>	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>3</sub>	m <sub>4</sub>	m <sub>5</sub>
Перша партія зразків						
1	1,350	1,136	0,770	0,710	0,674	0,654
1.1	0,837	0,620	0,396	0,372	0,368	0,372
2	0,942	0,818	0,648	0,622	0,610	0,602
2.1	0,636	0,592	0,466	0,450	0,446	0,442
3	1,112	0,916	0,672	0,644	0,634	0,622
3.1	1,014	0,828	0,620	0,596	0,590	0,584
4	1,090	0,858	злам.	злам.	злам.	злам.
4.1	0,879	0,676	0,480	0,464	0,460	0,458
5	1,738	1,528	1,128	1,074	1,042	1,022
6	1,126	0,928	0,802	0,788	0,784	0,786
7	1,424	1,216	1,100	1,082	1,076	1,070
8	1,696	1,432	1,108	1,076	1,056	1,050
Друга партія зразків						
3	1,591	1,198	1,084	1,068	1,054	1,052
4 (2)	1,304	0,946	0,728	0,698	0,674	0,672
4.1 (2)	0,757	0,450	0,372	0,370	0,368	0,368
3 (1.1)	1,332	1,012	0,844	0,822	0,806	0,808
3.1 (1.1)	0,953	0,668	0,564	0,558	0,554	0,556

## 4.2. Економічна складова

Розрахунок собівартості виготовлення зразків є важливим етапом у виробничому процесі, що дозволяє визначити економічну ефективність та фінансові витрати на створення прототипів. Виготовлення зразків часто передбачає вищі витрати в порівнянні з серійним виробництвом, оскільки воно

пов'язане з необхідністю застосування новітніх технологій, індивідуальних налаштувань обладнання та висококваліфікованої праці. Важливим аспектом є також те, що зразки часто виготовляються для тестування, перевірки на відповідність певним вимогам чи нормативним стандартам, що робить їх виготовлення специфічним процесом.

Приблизні прорахунки зроблено окремо для першої та другої партій виготовлених зразків. Для цього прорахунку необхідно знати ціни основних компонентів, з яких виготовлені зразки. Ціна наведена з розрахунком за 1 кг в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

#### Ціни основних компонентів

Деревні частинки	Цемент	Вапно	Гіпс	Пісок	Керамзит
Ціна за 1 кг					
0,00	5,80	33,80	18,60	1,37	14,87

Також потрібно враховувати кількість витрати та вартість води, яку використано при змішуванні компонентів. Дані наведено у табл. 4.4.

Таблиця 4.4

#### Кількість та ціна води для виготовлення зразків

№ зразка	Маса, кг	К-ть води, л	К-ть води, м <sup>3</sup>	Ціна за 1 м <sup>3</sup> хол. води, грн	Всього за воду, грн
1	2,187	1,187	0,001187	16,164	0,019
2	1,578	0,578	0,000578		0,009
3	2,126	1,126	0,001126		0,018
4	1,969	0,969	0,000969		0,016
5	1,738	0,738	0,000738		0,012
6	1,126	0,126	0,000126		0,002
7	1,424	0,424	0,000424		0,007
8	1,696	0,696	0,000696		0,011
Разом					0,09

Для прорахунку вартості зразків, попередньо треба зробити пропорційне розбиття по масі усіх компонентів. Пропорційна маса наведена у табл. 4.5.

Таблиця 4.5

### Пропорційна маса виготовлених зразків

№ зразка	Деревні частинки	Цемент	Вапно	Гіпс	Пісок	Керамзит
	Пропорційна маса компонентів, кг					
1	0,375		0,375			
1.1	0,125		0,125			
2	0,375	0,375				
2.1	0,125	0,125				
3	0,250	0,125			0,125	
3.1	0,250	0,125			0,125	
4	0,250		0,125	0,125		
4.1	0,250		0,125	0,125		
5	0,250		0,500			0,250
6	0,250	0,500				0,250
7	0,250	0,250			0,250	0,250
8	0,250		0,250	0,250		0,250

Після пропорційного розбиття маси по зразках, можна дізнатись ціну залежно до пропорції зразка. Дані наведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6

### Ціна зразка залежно до пропорційної маси

№ зразка	Деревні частинки	Цемент	Вапно	Гіпс	Пісок	Керамзит	Всього, грн
	Ціна, грн						
1	0,00		12,68				12,68
1.1	0,00		4,23				4,23
2	0,00	2,18					2,18
2.1	0,00	0,73					0,73

Продовження табл. 4.6

3	0,00	0,73			0,17		0,90
3.1	0,00	0,73			0,17		0,90
4	0,00		4,23	2,33			6,55
4.1	0,00		4,23	2,33			6,55
5	0,00		16,90			3,72	20,62
6	0,00	2,90				3,72	6,62
7	0,00	1,45			0,34	3,72	5,51
8	0,00		8,45	4,65		3,72	16,82

В підсумку зроблено приблизний прорахунок ціни за 1м<sup>2</sup> теплоізоляційного матеріалу. Дані наведено в табл. 4.7.

Таблиця 4.7

#### Ціна за 1м<sup>2</sup> теплоізоляційного матеріалу

№ зразка	Хол. вода, грн	Сухі матеріали, грн	Заг. ціна за зразок, грн	Ціна за 1м <sup>2</sup> , грн/м <sup>2</sup>
1	0,014	12,68	12,69	317,23
1.1	0,005	4,23	4,23	105,74
2	0,007	2,18	2,18	54,54
2.1	0,002	0,73	0,73	18,18
3	0,009	0,90	0,91	22,63
3.1	0,009	0,90	0,91	22,63
4	0,008	6,55	6,56	163,95
4.1	0,008	6,55	6,56	163,95
5	0,012	20,62	20,63	515,74
6	0,002	6,62	6,62	165,49
7	0,007	5,51	5,52	137,92
8	0,011	16,82	16,83	420,72

Дані щодо приблизного прорахунку для другої партії виготовлених зразків наведено в табл. 4.8-4.11.

Таблиця 4.8

### Кількість та ціна води для виготовлення зразків

№ зразка	Маса, кг	К-ть води, л	К-ть води, м <sup>3</sup>	Ціна за 1 м <sup>3</sup> хол. води, грн	Всього за воду, грн
3	2,126	1,126	0,001126	16,164	0,018
4 (2)	2,061	1,061	0,001061		0,017
3 (1.1)	2,285	1,285	0,001285		0,021
Разом					0,06

Таблиця 4.9

### Пропорційна маса виготовлених зразків

№ зразка	Деревні частинки	Цемент	Вапно	Гіпс	Пісок	Керамзит
	Пропорційна маса компонентів, кг					
3	0,375	0,188			0,063	
4 (2)	0,375		0,188	0,188		
4.1 (2)	0,125		0,063	0,063		
3 (1.1)	0,375	0,188	0,188			
3.1 (1.1)	0,125	0,063	0,063			

Таблиця 4.10

### Ціна зразка залежно до пропорційної маси

№ зразка	Деревні частинки	Цемент	Вапно	Гіпс	Пісок	Керамзит	Всього, грн
	Ціна, грн						
3	0,00	1,09			0,09		1,17
4 (2)	0,00		6,34	3,49			9,83
4.1 (2)	0,00		2,11	1,16			3,28
3 (1.1)	0,00	1,09	6,34				7,43
3.1 (1.1)	0,00	0,36	2,11				2,48

Таблиця 4.11

**Ціна за 1м<sup>2</sup> теплоізоляційного матеріалу**

№ зразка	Хол. вода, грн	Сухі матеріали, грн	Заг. ціна за зразок, грн	Ціна за 1м <sup>2</sup> , грн/м <sup>2</sup>
3	0,014	1,17	1,19	29,67
4 (2)	0,013	9,83	9,84	245,94
4.1 (2)	0,004	3,28	3,28	81,98
3 (1.1)	0,016	7,43	7,44	186,02
3.1 (1.1)	0,005	2,48	2,48	62,01

4.3. Методика проведення досліду з визначення коефіцієнта теплопровідності

Дослідження з визначення коефіцієнта теплопровідності для дослідних зразків проводилось на базі Інституту технічної теплофізики НАН України за підтримки Кафедри інженерії енергосистем НУБіП України. Дослід проведено на новорозробленій інформаційно-вимірювальній системі для прецизійного вимірювання коефіцієнту теплопровідності та теплового опору PTMS (precision thermal conductivity measurement system) [48].

Вибрана симетрична схема вимірювання густини теплового потоку з двома однаковими ПТП та використанням активної бічної теплоізоляції вимірювальної комірки дозволяє точно визначати коефіцієнт теплопровідності і тепловий опір зразків досліджуваного матеріалу завтовшки до 50 мм, що відповідає характеристикам сучасних робочих еталонів [48].

Конструкція системи PTMS в цілому подібна до конструкції установки IT-7C, але при проектуванні еталонної установки враховано результати досліджень, що проводились раніше. Для забезпечення рівномірності теплового потоку використано зразки, товщина яких не перевищує 0,2 від поперечного розміру зразка, а також система термостатування крайових зон нагрівника та холодильника за допомогою периферійних охоронних нагрівачів. Для системи

PTMS розроблені та виготовлені ПТП, в яких охоронна зона заповнена такою ж спіраллю термоелементів, як і чутлива зона, що забезпечує рівність теплофізичних характеристик обох зон. Використання термостату для опорних спаїв з подвійним контуром термостатування, розміщеного поблизу вимірювальної комірки приладу, дозволяє значно зменшити вплив неоднорідності термоелектричних дротів на похибку вимірювання температури лицьових поверхонь зразка. Притискний механізм системи PTMS вдосконалено для забезпечення рівномірного притиску нагрівника і ПТП до поверхні зразка, а також додано підйомний механізм для бічної теплоізоляції (БТІ) [48].

Система PTMS, зовнішній вигляд якої зображений на рис. 4.6, складається з комплексу функціонально взаємопов'язаних елементів: теплового блоку, термостата опорних спаїв, силового блоку регуляторів, електронного вимірювального блоку, персонального комп'ютера з необхідним програмним забезпеченням, електровимірювальних приладів і пристроїв для забезпечення різних режимів роботи [48].



Рис. 4.6. Зовнішній вигляд системи PTMS: 1 – тепловий блок; 2 – термостат опорних спаїв термопар; 3 – електронний вимірювальний блок; 4 – силовий блок регуляторів; 5 – стабілізатор напруги постійного струму П4105; 6 – мультиметр цифровий Picotest; 7 – мультиметр цифровий Fluke 8846A; 8 – еталонна котушка електричного опору P310 [48].

Тепловий блок, конструкція якого зображена на рис. 4.7, призначений для розміщення досліджуваного зразка та забезпечення необхідних теплових режимів. Він складається з таких основних компонентів: верхньої та нижньої термостатованих плит – нагрівника 1 і холодильника 2, блоку активної бічної теплоізоляції (БТІ) 3, блоку вентиляторів 4, підйомно-притискного пристрою 5, підйомного механізму БТІ 6 та термостату опорних спаїв термопар (ТОС) 12 [48].

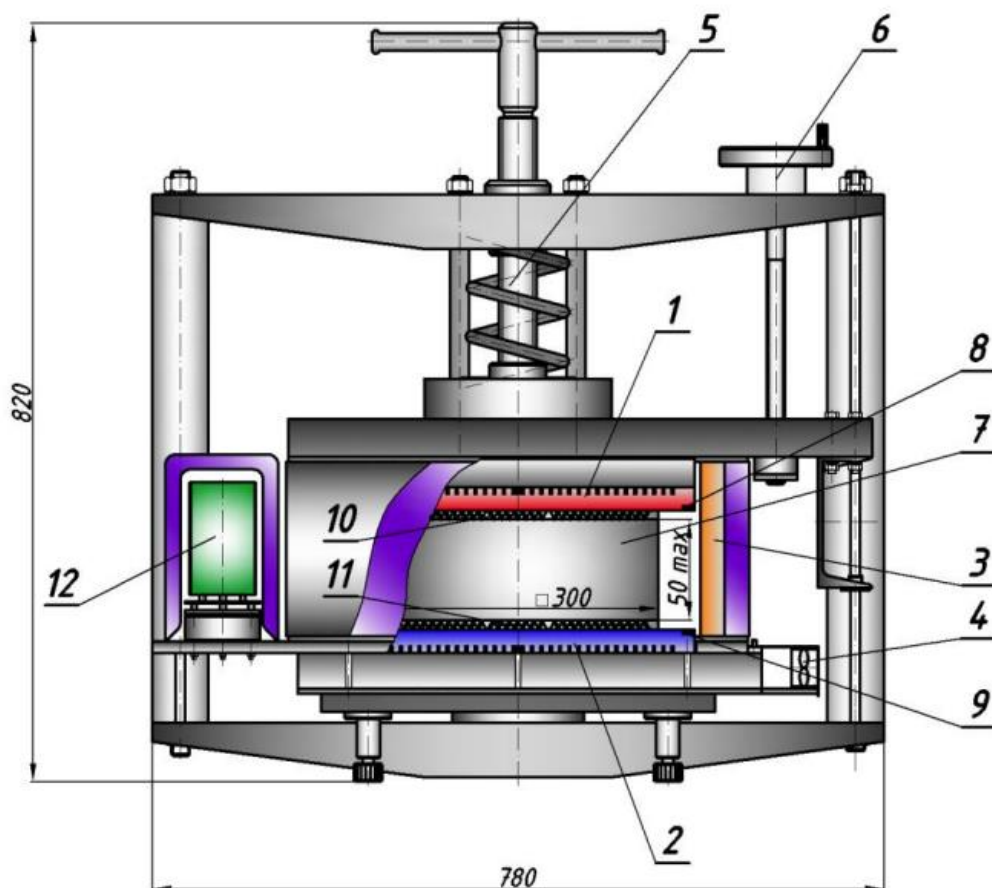


Рис. 4.7. Схема теплового блоку системи PTMS: 1 – верхній нагрівальний блок (нагрівник); 2 – нижній нагрівальний блок (холодильник); 3 – блок активної бічної теплоізоляції (БТІ); 4 – блок вентиляторів; 5 – підйомно-притискний пристрій; 6 – підйомний механізм БТІ; 7 – зразок; 8 і 9 – охоронні нагрівачі блоків 1 і 2; 10 і 11 – верхній і нижній теплометричні блоки; 12 – термостат опорних спаїв термопар (ТОС) [48].

У зібраному вигляді між нагрівником 1, холодильником 2 та БТІ 3 утворюється вимірювальна комірka, в яку розміщується зразок 7 досліджуваного матеріалу, забезпечуючи необхідні теплові та температурні режими. Розміри

посадкового місця в комірці дозволяють встановлювати зразки розмірами до  $300 \times 300 \times 50$  мм [48]. В нашому випадку дослідні зразки мають розміри  $200 \times 200 \times 50$  мм, що без проблем дозволяє розмістити їх в цьому пристрої із запасом 100 мм по довжині і ширині.

Нагрівник 1 і холодильник 2 мають однакову конструкцію, виготовлені з дюралюмінієвих плит розмірами  $360 \times 360 \times 25$  мм, на одній з поверхонь яких рівномірно розташовані фрезеровані пази, в які вмонтовані резистивні нагрівальні елементи. У торцевих периметрах плит, в спеціальних пазах, розміщені охоронні резистивні нагрівники 8 і 9. Ці нагрівники виготовлені з ніхромового дроту в трубці зі скловолокна, покритої високотемпературним кремнійорганічним лаком. Під час роботи нагрівника 1 і холодильника 2, цифрові терморегулятори, розташовані в електронних блоках, встановлюють і підтримують задані температури робочих поверхонь зразка 7 в межах необхідного діапазону значень для дослідження температурних залежностей коефіцієнта теплопровідності. Для контролю та автоматичного регулювання температури в центральній і периферійній зонах плит використовуються платинові термометри опору, що є частиною системи регулювання. Завдяки високій теплопровідності матеріалів плит нагрівника 1 і холодильника 2, а також можливості незалежного регулювання температури, забезпечуються ізотермічні умови на їх поверхнях [48].

Тепловідведення від холодильника 2 відбувається конвективним способом через радіатор, який складається з набору плит з профільними ребрами. Інтенсифікація теплообміну забезпечується блоком вентиляторів 4, що включає чотири вентилятора, що розташовані в одному корпусі та з'єднані силовим кабелем з блоком живлення, розташованим в електронному вимірювальному блоці. В каналі продувки встановлені термометри опору для вимірювання температури повітря. Конструкцією передбачена можливість демонтажу блоку вентиляторів 4, коли температура випробувань значно відрізняється (вище або нижче) від кімнатної [48].

Для зменшення впливу бокового теплообміну на теплове поле зразка в тепловому блоці передбачена активна бічна теплоізоляція (БТІ), яка охоплює бічні поверхні зразка 7 та нагрівника 1. БТІ складається з чотирьох однакових дюралюмінієвих плит, в фрезеровані пази яких укладені резистивні нагрівальні елементи. Зовнішня поверхня плит покрита базальтовою теплоізоляцією та закрита загальним кожухом. Температура БТІ встановлюється на рівень, що є середнім між температурами нагрівника 1 та холодильника 2, і підтримується на постійному рівні. Стабільність температурного режиму БТІ контролюється за допомогою показників термометра опору, встановленого в ньому, та цифрового регулятора, який знаходиться в силовому блоці регулювання [48].

На поверхнях нагрівника і холодильника, які контактують із зразком, встановлені теплотеметричні блоки ТМБ 10 і 11. Збірка, що складається з нагрівника, холодильника з теплотеметричними блоками, БТІ, зразка та блоку вентиляторів, розміщена в підйомно-притискному пристрої 5, який має рамну конструкцію, встановлену на напрямних стійках. У робочому режимі, для зменшення контактного теплового опору між ТМБ 10, 11 і зразком 7, за допомогою гвинтового механізму з силовою пружиною регулюється необхідне притискне зусилля, яке контролюється візуально за шкалою пристрою 5. Максимальне значення притискного зусилля становить 10 кН [48].

За допомогою пристрою 5 здійснюється підйом і опускання нагрівника 1, а підйомним механізмом 6 — підйом і опускання БТІ [48].

Для підвищення точності вимірювання різниці температури поверхонь зразка в складі установки передбачений комплект з двох знімних прокладок, виготовлених з еластичного силікону у вигляді пластин товщиною 2 мм. В кожну прокладку вмонтована хромель-копелева термопара стрічкового типу, спай якої розкатаний в стрічку товщиною 50-60 мкм. Обидві термопари з'єднані диференційно. Прокладки встановлюються так, щоб спай термопар контактував з робочими поверхнями зразка з твердого гомогенного матеріалу, що піддається випробуванню під нормованим навантаженням, забезпечуючи максимальний

тепловий контакт і мінімізацію контактного теплового опору до значення, яке можна вважати незначним [48].

Завдання щодо умов експерименту, режимів роботи установки, регулювання та контролю режимних параметрів, а також отримання первинної інформації виконуються за допомогою електронних блоків БР та ЕВБ [48].

Силовий блок регуляторів БР містить цифрові регулятори температури нагрівача, холодильника та БТІ, які керують подачею напруги на резистивні нагрівачі відповідних вузлів через симісторні ключі. Живлення нагрівачів здійснюється безпосередньо від мережі змінного струму 220 В. Цифрові регулятори охоронних нагрівальних елементів контролюють подачу напруги на резистивні нагрівачі відповідних вузлів, при цьому живлення відбувається через знижувальні трансформатори з напругою 36 В [48].

Електронний вимірювальний блок (ЕВБ) призначений для перетворення аналогових сигналів, що надходять від первинних перетворювачів теплового блоку, у цифровий код, який потім передається на персональний комп'ютер (ПК). Крім того, ЕВБ виконує регулювання температури ТОС, генерацію вимірювального струму для термометрів опору та живлення вентиляторів. Всі вихідні сигнали первинних перетворювачів з теплового блоку передаються на входи вимірювальних модулів ІМ1, ІМ2, ІМ3, де вони піддаються аналого-цифровому перетворенню. Як вимірювальні модулі використовуються пристрої серії І-7018, вироблені компанією ICP DAS (Тайвань), які оснащені 16-розрядними АЦП та мають по 8 аналогових комутованих входів [48].

Програмне забезпечення системи PTMS для ПК використовується для отримання даних від ЕВБ в усіх режимах його роботи, виконання необхідних розрахунків, відображення значень виміряних параметрів та збереження даних у файл на диску для подальшого документування [48].

Для калібрування системи PTMS розроблена методика, яка ґрунтується на вимірюваннях лінійних розмірів, електричної потужності та температури, що передбачає використання непрямого методу калібрування за допомогою метрологічно атестованих засобів вимірювання, доступних в Україні.

Калібрування або повірка ПТП здійснюється за допомогою спеціального калібрувального електронагрівника, який встановлюється в тепловий блок замість зразка. На нагрівник подається стабільна електрична потужність, що вимірюється за допомогою приладів-еталонів, після чого в стаціонарному режимі здійснюються вимірювання вихідних сигналів ПТП. Під час підтримання стабільних температур на нагрівнику і холодильнику проводиться два вимірювання при двох значеннях поданої потужності, що дозволяє сформувати систему двох рівнянь теплового балансу та розрахувати коефіцієнти перетворення ПТП. Калібрування або повірка перетворювачів температури здійснюється методом компарування з еталонним перетворювачем, який встановлюється замість зразка, при цьому на нагрівнику і холодильнику підтримуються однакові температури. Очікувана розширена невизначеність вимірювання коефіцієнту теплопровідності в діапазоні від 0,02 до 3,0 Вт/(м·К) складає не більше 1,5% [48].

Можливості системи PTMS не обмежені. Вона дозволяє вимірювати коефіцієнт теплопровідності не лише твердих зразків, а й тонкошарові матеріали (наприклад тканина), сипких матеріалів, рідкі суміші бетону та похідні, вимірювати коефіцієнт емісії енергоощадного скла або будь-якого покриття, нанесеного на тонкі пласкі пластини. Також розроблено методику застосування системи PTMS для вимірювання теплоємності матеріалів [48].


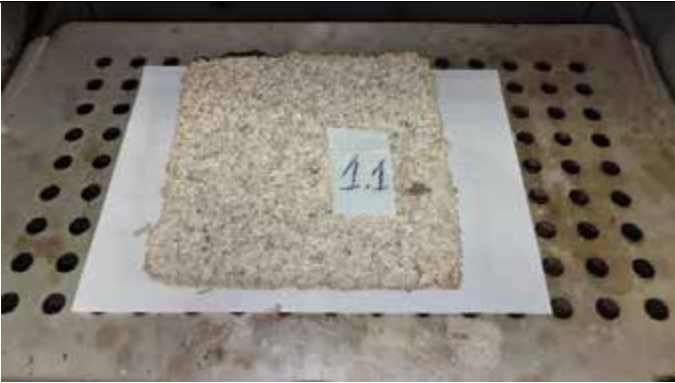


4.4. Опрацювання результатів досліджень та порівняння з існуючими матеріалами

Результати проведеного дослідження з визначення коефіцієнта теплопровідності дослідних зразків наведено в табл. 4.12.





В ході проведеного дослідження визначено коефіцієнти теплопровідності для дослідних зразків. За отриманими результатами, зразок під №8 (Деревні частинки + керамзит + гіпс + вапно з пропорцією 25/25/25/25) виявився найкращим серед досліджених, показавши коефіцієнт теплопровідності 0,36 Вт/(м·К).

Таблиця 4.12





## Результати вимірів коефіцієнтів теплопровідності дослідних зразків

№ п/п	Фото зразка	Компоненти суміші	Коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{зр}$ , Вт/(м · К)
1.		Деревні частинки + вапно (пропорцію обрано 50-50, тобто деревних частинок 50 і в'язучого 50)	<b>0,50±2%</b>
2.		Деревні частинки + вапно (пропорцію обрано 50-50, тобто деревних частинок 50 і в'язучого 50)	<b>0,49±2%</b>
3.		Деревні частинки + цемент (пропорцію обрано 50-50, тобто деревних частинок 50 і в'язучого 50)	<b>0,59±2%</b>
4.		Деревні частинки + цемент (пропорцію обрано 50-50, тобто деревних частинок 50 і в'язучого 50)	<b>0,60±2%</b>





## Продовження табл. 4.12

5.		<p>Деревні частинки + цемент + пісок (пропорцію обрано 50 -25 -25, тобто деревних частинок 50 і в'язучого по 25 відповідно)</p>	<p><b>0,50±2%</b></p>
6.		<p>Деревні частинки + цемент + пісок (пропорцію обрано 50 -25 -25, тобто деревних частинок 50 і в'язучого по 25 відповідно)</p> <p><i>Підпресована</i></p>	<p><b>0,51±2%</b></p>
7.		<p>Деревні частинки + цемент + вапно (пропорцію обрано 50 -25 -25, тобто деревних частинок 50 і в'язучого по 25 відповідно)</p> <p><i>Підпресована</i></p>	<p><b>0,54±2%</b></p>
8.		<p>Деревні частинки + цемент + пісок (пропорцію обрано 50 -25 -25, тобто деревних частинок 50 і в'язучого по 25 відповідно)</p>	<p><b>0,49±2%</b></p>


## Продовження табл. 4.12

9.		<p>Деревні частинки + цемент + вапно (пропорцію обрано 50-25 -25, тобто деревних частинок 50 і в'язучого по 25 відповідно)</p> <p><i>Підпресована</i></p>	<p><b>0,53±2%</b></p>
10.		<p>Деревні частинки + гіпс + вапно (пропорцію обрано 50-25-25, тобто деревних частинок 50 і в'язучого по 25 відповідно)</p>	<p><b>0,41±2%</b></p>
11.		<p>Деревні частинки + гіпс + вапно (пропорцію обрано 50-25-25, тобто деревних частинок 50 і в'язучого по 25 відповідно)</p>	<p><b>0,40±2%</b></p>
12.		<p>Деревні частинки + гіпс + вапно (пропорцію обрано 50-25-25, тобто деревних частинок 50 і в'язучого по 25 відповідно)</p> <p><i>Підпресована</i></p>	<p><b>0,42±2%</b></p>

## Продовження табл. 4.12

13.		<p>Деревні частинки + гіпс + вапно (пропорцію обрано 50-25-25, тобто деревних частинок 50 і в'язучого по 25 відповідно)</p> <p><i>Підпресована</i></p>	<p><b>0,41±2%</b></p>
14.		<p>Деревні частинки + керамзит + вапно (пропорцію обрано 25-25-50, тобто деревних частинок та керамзит по 25 і в'язучого 50)</p>	<p><b>0,42±2%</b></p>
15.		<p>Деревні частинки + керамзит + цемент (пропорцію обрано 25-25-50, тобто деревних частинок та керамзит по 25 і в'язучого 50)</p>	<p><b>0,49±2%</b></p>
16.		<p>Деревні частинки + керамзит + цемент + пісок (пропорцію обрано 25-25-25-25, тобто деревних частинок та керамзит по 25 і в'язучого по 25 відповідно)</p>	<p><b>0,42±2%</b></p>

Продовження табл. 4.12

17.		Деревні частинки + керамзит + гіпс + вапно (пропорцію обрано 25-25-25-25, тобто деревних частинок та керамзит по 25 і в'язучого по 25 відповідно)	<b>0,36±2%</b>
-----	---	---	----------------

Зразок №8 має найнижчу теплопровідність серед інших зразків, що може вказувати на його ефективність як теплоізоляційний матеріал. Однак для повної оцінки його ефективності, важливо порівняти отриманий показник з характеристиками інших існуючих матеріалів, які широко використовуються, зокрема, в будівництві та інших галузях. Такий порівняльний аналіз дозволить визначити, чи відповідає цей зразок сучасним вимогам до теплоізоляції та чи має він переваги перед вже відомими. Порівняння отриманого результату з найпопулярнішими матеріалами наведено в табл. 4.13.

Таблиця 4.13

**Порівняння коефіцієнтів теплопровідності дослідного зразка і існуючих матеріалів [49-50]**

№ п/п	Назва матеріалу	Коефіцієнт теплопровідності λ <sub>зр</sub> , Вт/(м · К)
1	Дослідний зразок №8 (Деревні частинки + керамзит + гіпс + вапно)	0,36±2%
2	Базальтова вата ρ=140 кг/м <sup>3</sup>	0,041
3	Базальтова вата ρ=50 кг/м <sup>3</sup>	0,036

Продовження табл. 4.13

4	Базальтова вата $\rho=30$ кг/м <sup>3</sup>	0,039
5	Скловата $\rho=12$ кг/м <sup>3</sup>	0,04
6	Пінопласт $\rho=15$ кг/м <sup>3</sup>	0,043
7	Пінопласт $\rho=25$ кг/м <sup>3</sup>	0,041
8	Пінопласт $\rho=35$ кг/м <sup>3</sup>	0,038
9	Екструдований пінополістирол (ЕППС) $\rho=30$ кг/м <sup>3</sup>	0,031
10	Екструдований пінополістирол (ЕППС) $\rho=35-40$ кг/м <sup>3</sup>	0,028
11	Піноскло $\rho=120$ кг/м <sup>3</sup>	0,045
12	Піноскло $\rho=160$ кг/м <sup>3</sup>	0,06
13	Пінополіуретан (ППУ) $\rho=40$ кг/м <sup>3</sup>	0,02
14	Пінополіуретан (ППУ) $\rho=80$ кг/м <sup>3</sup>	0,035
15	Залізобетон $\rho=2500$ кг/м <sup>3</sup>	1,69
16	Керамзитобетон $\rho=1000$ кг/м <sup>3</sup>	0,66
17	Газобетон $\rho=400$ кг/м <sup>3</sup>	0,12
18	Пінобетон $\rho=300$ кг/м <sup>3</sup>	0,08
19	Цегла керамічна повнотіла $\rho=1800$ кг/м <sup>3</sup>	0,56
20	Цегла керамічна $\rho=1200$ кг/м <sup>3</sup>	0,35
21	Цегла силікатна $\rho=1800$ кг/м <sup>3</sup>	0,7
22	Цегла клінкерна $\rho=1800$ кг/м <sup>3</sup>	1,6
23	Цегла клінкерна $\rho=2000$ кг/м <sup>3</sup>	0,8
24	Плита з гіпсу $\rho=1000$ кг/м <sup>3</sup>	0,23
25	Плита з гіпсу $\rho=1200$ кг/м <sup>3</sup>	0,35
26	Дерево (сосна або ялина)	0,10-0,15
27	ДВП і ДСП $\rho=200-1000$ кг/м <sup>3</sup>	0,06-0,15
28	Цементні плити	1,92

Дослідний зразок під №8, з коефіцієнтом теплопровідності  $0,36 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , хоча й показує добрі результати, але все ж таки поступається сучасним теплоізоляційним матеріалам, таким як пінополістирол, мінеральна вата, кам'яна вата тощо, де коефіцієнт теплопровідності значно нижчий. Однак, даний матеріал знаходиться в діапазоні деяких будівельних матеріалів, що дає право на його існування і використання в певних будівельних та теплоізоляційних цілях.

4.5. Рекомендації до виготовлення і використанню теплоізоляційних плит та запропонування технологічного процесу

Зразок №8 із пропонованим складом (Деревні частинки + керамзит + гіпс + вапно) для виготовлення теплоізоляційної плити є перспективним завдяки поєднанню натуральних компонентів та їх синергічному ефекту:

1. Деревинні частинки надають матеріалу легкість, пористість та непогану теплоізоляцію;
2. Керамзит забезпечує певну міцність, звукоізоляцію та додаткову теплоізоляцію завдяки своїй пористій структурі;
3. Гіпс надає матеріалу міцність, стійкість до вологи та сприяє швидкому твердінню;
4. Вапно покращує адгезію компонентів, збільшує міцність та стійкість до вологи.

Отриманий коефіцієнт теплопровідності  $0,36 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  свідчить про доволі високі теплоізоляційні властивості матеріалу, що робить його конкурентоспроможним на ринку. Даний матеріал може використовуватись в якості теплоізоляції у вигляді, засипки, плит, цеглинок або блоків в будівництві та промисловості. В поєднанні з іншими матеріалами він може показати гарні показники енергоефективності будівель та споруд, а за рахунок своєї екологічності та невеликим затратам на виготовлення стати досить успішним на ринку.

При запровадженні технологічного процесу та збільшення масштабів виготовлення, на основі вже пройдених етапів виготовлення можна зробити наступні висновки та пропозиції:

- Потрібно приділити увагу щодо покращення пропорцій при виготовленні для можливо оптимального поєднання компонентів;
- Для більших масштабів, тобто більших розмірів матеріалу обов'язково враховувати армування;
- Розглянути можливість введення додаткових добавок, для покращення певних властивостей матеріалу;
- На рахунок сушіння матеріалу, пресування чи підпресування необхідно закласти відповідні дослідження перед виготовленням та впровадження процесів. Невідомо як матеріал показує себе в умовах даних процесів та після них. Все впирається в невідомість і не підібраність режимів та параметрів цих процесів.

Технологічний процес виготовлення теплоізоляційного матеріалу запропоновано за основі зразку №8, який отримав найкращий показник коефіцієнту теплопровідності. Процес буде включати можливості по виготовленню не лише плит, а й цеглинок, блоків.

Технологічний процес виготовлення починається зі змішування компонентів в промисловому змішувачі, який забезпечить ретельне перемішування усіх компонентів між собою. Наступним ділом суміш потрапляє в спеціалізований автоматизований дозатор, який укладає суміш в спеціальну форму (плита, цеглина або блок), що знаходиться на вібростолі або віброустановці. Вібростіл або віброустановка забезпечує рівномірне розподілення суміші по поверхні та заповненню пустот. В суміш укладається армування для збільшення міцності матеріалу. Далі процес може йти по двом сценаріям:

1. Форма з сумішшю проходить повний процес застигання і сушіння в камерах, потім виймається. Для цього потрібне попереднє оброблення форм спеціальним розділювачем;

2. Суміш у формі проходить короткочасний процес застигання, потім виймається і підстигає при температурі приміщення. Вже після цього надходить у сушильну камеру.

Після набуття кінцевої твердості, матеріал проходить процес контролю якості.

Підсумовуючи, пропонований матеріал має високий потенціал для використання в якості теплоізоляції. Завдяки своїм натуральним компонентам, він є екологічно чистим та безпечним для здоров'я людини. Оптимізація технологічного процесу та проведення додаткових досліджень дозволять створити конкурентоспроможний продукт на ринку теплоізоляційних матеріалів.

## ВИСНОВКИ

Під час виконання магістерської кваліфікаційної роботи проаналізовано існуючі теплоізоляційні матеріали для утеплення будівель та споруд, їх переваги та недоліки, особливості застосування. Зроблено опис способів утеплення будинків, переваги та недоліки даних способів. До основних способів належать внутрішнє, внутрішньостінове та зовнішнє утеплення. Кожен спосіб підходить під певні конструкції будинків: внутрішньостіновий підходить для каркасних будинків та при колодязній кладці, зовнішній та внутрішній способи підходять для усіх видів конструкцій будинків. З усіх представлених способів найпопулярнішим є зовнішнє утеплення будинків та споруд, через зовнішнє знаходження точки роси. Розглянуто два популярних методи зовнішнього утеплення – мокрі та сухі фасади (утеплення). Їх переваги та недоліки.

Описано основні матеріали, що використовують для утеплення будинків, до яких відносять: пінопласт, пінополістирол, мінеральна вата (скловата, шлаковата, базальтова) і ековата. Іноді використовують тирсу та солону. Розглянуто утеплення основних видів дерев'яних будинків – каркасні, будинки з колод (зруб) та клеєного бруса. Також згадано про утеплення цегляних, бетонних та газобетонних будинків. Такі будинки утеплюються тільки зовні і зазвичай методами мокрого фасаду або ж методом колодязної кладки на етапі будівництва. Наведено рекомендації для усіх типів будинків щодо утеплення різних конструкційних елементів. До таких елементів належить цоколь, підвальні приміщення, підлоги різних конструкцій, стіни, перекриття, стеля, горище.

Детально описано показники, якими оперують під час вибору теплоізоляційного матеріалу. До таких фізико-технічних показників належать: вологість, водопоглинання, морозостійкість, паропроникність, група горючості, міцність на стиск/границя міцності при стиску, стисливість, границя міцності при зсуві, границя міцності при розтягу у напрямку, перпендикулярному до поверхні, густина, правильність геометричної форми, розрахункова

теплопровідність, термін ефективної експлуатації. Детально описано найпопулярніші матеріали для утеплення будинків, до яких належать: пінопласт, екструдований пінополістирол (ЕПП), базальтова вата, ековата, пінополіуретан (ППУ), тепла штукатурка, синтапон, керамзит, тирса.

Проаналізовано існуючі дослідження з виготовлення композитних теплоізоляційних матеріалів. Зазначено основні вимоги, які висувають до таких матеріалів. На сьогоднішній день гостро стає питання екологічності, тому більшість досліджень спрямовано на виготовлення та дослідження композитних теплоізоляційних матеріалів з екологічних компонентів, з морської трави (зостери), листя дерев, рисової та інших видів соломи тощо. Застосування таких компонентів вирішить питання не лише виготовлення екологічного теплоізоляційного матеріалу, а й переробку тисяч тон даних відходів.

Проведено аналіз існуючих методик визначення теплофізичних властивостей різних матеріалів. Детально описано основні показники теплофізичних властивостей, до яких відносять: коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт тепловіддачі, тепловий потік, коефіцієнт теплопередачі, питома теплоємність, коефіцієнт термічного/теплового розширення, коефіцієнт температуропровідності, коефіцієнт теплосвоєння, межа вогнетривкості, показник вогнетривкості. Наведено дві основні групи методів визначення теплофізичних властивостей – стаціонарні та нестаціонарні й детально описано методи з цих груп.

З проведеного аналізу досліджень наведено режимні параметри, які враховують під час виготовлення композитних матеріалів.

Визначено пріоритетне в'язуче для виготовлення теплоізоляційних плит з додаванням деревних частинок за допомогою методу аналізу ієрархій. З розрахунків найбільше значення глобального пріоритету отримав цемент з показником – 0,235. Однак, для подальшого виготовлення дослідних зразків також обрано ще й два наступні в'язучі матеріали – вапно та гіпс, щоб на основі експериментів дізнатись чи підходять дані матеріали для поставленої мети.

В роботі наведено методику виготовлення дослідних зразків, які компоненти використовувались, пропорції, описано обрані в'язучі матеріали. Загалом отримано 17 дослідних зразків. Наведено економічну складову по приблизній вартості кожного зразку, а також вартість зразку  $1\text{ м}^2$ . Також описано методику проведення досліджень з визначення коефіцієнта теплопровідності дослідних зразків та наведено результати цих досліджень. Найкращим вийшов зразок під номером 8 (Деревні частинки + керамзит + гіпс + вапно з пропорцією 25/25/25/25) зі значенням коефіцієнта теплопровідності  $0,36\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , що свідчить про непоганий показник теплопровідності, на основі зробленого порівняння коефіцієнтів теплопровідності дослідного зразка і існуючих матеріалів.

Викладено рекомендації по виготовленню використанню теплоізоляційних плит та запропоновано технологічний процес по виготовленню теплоізоляційного матеріалу на основі зразка №8 в промислових масштабах у вигляді плит, цеглинок та блоків.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Утеплення приватного будинку. Матеріали і технології: веб-сайт. URL: <https://teplodim.info/uk/useful-articles/uteplenie-chastnogo-doma-materialy-i-tehnologii> (дата звернення: 07.01.2024).
2. Особливості та переваги зовнішнього утеплення будинку: веб-сайт. URL: <https://termopaneli.net/osobennosti-i-preimushhestva-vneshnego-utepleniya-doma/> (дата звернення: 05.01.2024).
3. Теплоізоляція та технології утеплення фасадів: веб-сайт. URL: <https://remont.sumy.ua/uteplenie-sten/> (дата звернення: 05.01.2024).
4. Способи утеплення фасаду: мокрий та сухий (вентильований): веб-сайт. URL: <https://teplo-tex-stroi.com/yak-i-chym-uteplyuvaty/sposoby-uteplennya-fasadu-mokryy-ta-sukhyy-ventylovanyy> (дата звернення: 05.01.2024).
5. Сучасні системи утеплення фасадів: веб-сайт. URL: <http://nash-kray.com/index.php/korysni-statti/suchassni-systemy-uteplennya-fasadiv> (дата звернення: 08.01.2024).
6. Майстренко А.А., Амеліна Н.О., Бердник О.Ю., Рижанкова Л.М., Яковлева О.М. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ВИБОРУ СИСТЕМИ УТЕПЛЕННЯ ЗОВНІШНІХ СТІН. *Науковий вісник будівництва, 2020, Т.99, №1*. С. 110-124.
7. У чому секрет утеплення каркасного будинку: веб-сайт. URL: [https://artmetall.ua/secret\\_utepleniya\\_karkasnogo\\_doma/](https://artmetall.ua/secret_utepleniya_karkasnogo_doma/) (дата звернення: 06.01.2024).
8. Як утеплювати каркасний будинок: веб-сайт. URL: [https://artmetall.ua/kak\\_utepliat\\_karkasniy\\_dom/](https://artmetall.ua/kak_utepliat_karkasniy_dom/) (дата звернення: 06.01.2024).
9. Стіни каркасного будинку: правильний пиріг утеплення: веб-сайт. URL: <https://allbuild.pp.ua/budivnitstvo/budivelni-materiali/izoliatsiini-materiali/stini-karkasnogo-budinku-pravilnii-pirig-uteplennia> (дата звернення: 06.01.2024).

10. Утеплення міжбрусових швів в дерев'яному будинку зі зрубу: веб-сайт. URL: <https://derevodim.com.ua/blog/uteplennia-mizhbrusovykh-shviv-v-derevian/> (дата звернення: 08.01.2024).
11. ЯК УТЕПЛИТИ БУДИНОК СВОЇМИ РУКАМИ?: веб-сайт. URL: <https://pp-budpostach.com.ua/ua/a182260-kak-uteplit-srub.html> (дата звернення: 06.01.2024).
12. ДСТУ 9191:2022. Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. [Чинний від 2023-03-01]. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2023. – 3 с.
13. Чим утеплити каркасний будинок: веб-сайт. URL: <http://surl.li/guxmuz> (дата звернення: 08.01.2024).
14. Чим утеплити будинок ззовні та всередині: плюси і мінуси різних матеріалів: веб-сайт. URL: [https://zaxid.net/uteplennya\\_budinku\\_zzovni\\_ta\\_vseredini\\_plyusi\\_i\\_minusi\\_materialiv\\_n1549028](https://zaxid.net/uteplennya_budinku_zzovni_ta_vseredini_plyusi_i_minusi_materialiv_n1549028) (дата звернення: 08.01.2024).
15. Пінопласт, мінвата чи ППУ. Оптимальний варіант утеплення будинку: веб-сайт. URL: <https://proteplozahist.com/pinoplast-minvata-chy-ppu-optymalnyj-variant-uteplennya-budynku/> (дата звернення: 08.01.2024).
16. Сучасні методи утеплення цегляного будинку зовні: веб-сайт. URL: <https://krovly.com.ua/sovremennye-metody-uteplenija-kirpichnogo-doma-snaruzhi.html> (дата звернення: 08.01.2024).
17. Особливості утеплення каркасного будинку: веб-сайт. URL: [https://buduemo.com/ua/news/insulation\\_materials/osoblivosti-uteplennja-karkasnogo-budinku.html](https://buduemo.com/ua/news/insulation_materials/osoblivosti-uteplennja-karkasnogo-budinku.html) (дата звернення: 08.01.2024).
18. Ековата - утеплювач для будь-якого будинку: веб-сайт. URL: <https://ecovata.net.ua/> (дата звернення: 08.01.2024).
19. Ековата - утеплювач, який доступний всім: веб-сайт. URL: <https://artmetall.ua/ekovata/> (дата звернення: 08.01.2024).

20. Синтепон для утеплення - характеристики, властивості, особливості: веб-сайт. URL: <https://yak.koshachek.com/articles/sintepon-dlja-uteplennja-harakteristiki.html> (дата звернення: 08.01.2024).
21. Утеплення покрівлі керамзитом: веб-сайт. URL: <http://surl.li/zhczew> (дата звернення: 08.01.2024).
22. Керамзит як теплоізоляційний матеріал: аналіз ефективності використання в будівництві: веб-сайт. URL: <https://sky.kr.ua/blog/home/keramzit-yak-teploizolyacijnij-material-analiz-efektivnosti-vikoristannya-v-budivnictvi/> (дата звернення: 08.01.2024).
23. Застосування тирси як утеплювача: нюанси, особливості, переваги та недоліки: веб-сайт. URL: [https://buduemo.com/ua/news/insulation\\_materials/zastosuvannja-tirsi-jak-utepljuvacha-njuansi-osoblivosti-perevagi-ta-nedoliki.html](https://buduemo.com/ua/news/insulation_materials/zastosuvannja-tirsi-jak-utepljuvacha-njuansi-osoblivosti-perevagi-ta-nedoliki.html) (дата звернення: 08.01.2024).
24. Han-Seung Yang, Dae-Jun Kim, Hyun-Joong Kim. Rice straw–wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials. *Bioresource Technology*. 2003. Vol. 86. №2. P. 117-121. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00163-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00163-3)
25. Joseph Khedari, Borisut Suttisonk, Naris Pratinthong, Jongjit Hirunlabh. New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites*. 2001. Vol. 23. №1. P. 65-70. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00072-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00072-X)
26. Hanifi Binici, Orhan Aksogan, Ceyda Demirhan. Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulation composite made of bio-based materials. *Sustainable Cities and Society*. 2016. Vol. 20. P. 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.09.004>
27. Mohamed E. Ali, Abdullah Alabdulkarem. On thermal characteristics and microstructure of a new insulation material extracted from date palm trees surface fibers. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 138. P. 276-284. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.012>

28. Joseph Khedari, Sarocha Charoenvai, Jongjit Hirunlabh. New insulating particleboards from durian peel and coconut coir. *Building and Environment*. 2003. Vol. 38. №3. P. 435-441. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00030-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00030-6)
29. Lertsutthiwong P. et al. New insulating particleboards prepared from mixture of solid wastes from tissue paper manufacturing and corn peel. *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99. №11. P. 4841-4845. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.051>
30. S.P. Raut, R.V. Ralegaonkar, S.A. Mandavgane. Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-create bricks. *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25. №10. P. 4037-4042. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.038>
31. Julián Salas, Marina Alvarez, Janer Veras. Lightweight insulating concretes with rice husk. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1986. Vol. 8. №3. P. 171-180. [https://doi.org/10.1016/0262-5075\(86\)90038-2](https://doi.org/10.1016/0262-5075(86)90038-2)
32. Azra Korjenic, Vít Petránek, Jiří Zach, Jitka Hroudová. Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43. №9. P. 2518-2523. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.012>
33. Soupionis G., Zoumpoulakis L. Manufacture and Characterization of Heat-Resistant and Heat-Insulating New Composites Based on Resol Resin–Carbon Fibers–Perlite for the Built Heritage Protection. *Scanning*. 2019. Vol. 2019, №1. <https://doi.org/10.1155/2019/8791010>
34. Wei K. et al. Development and performance evaluation of a new thermal insulation material from rice straw using high frequency hot-pressing. *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 87. P. 116-122. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.026>
35. Platt S. et al. Manufacture and characterisation of prototype straw bale insulation products. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 262. 120035. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120035>

36. Xiao-yan Zhou, Fei Zheng, Hua-guan Li, Cheng-long Lu. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings*. 2010. Vol. 42. №7. P. 1070-1074. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.020>
37. Satta Panyakaew, Steve Fotios. New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse. *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43. №7. P. 1732-1739. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.015>
38. Aldi Kuqo, Carsten Mai. Seagrass Leaves: An Alternative Resource for the Production of Insulation Materials. *Materials*. 2022. Vol. 15. №19. P. 6933. <https://doi.org/10.3390/ma15196933>
39. Aldi Kuqo, Carsten Mai. Flexible Insulation Mats from *Zostera marina* Seagrass. *Journal of Natural Fibers*. 2023. Vol. 20. №1. P. 15. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2154303>
40. Мальований І. В. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ МОРСЬКОЇ ТРАВИ / І. В. Мальований, М. К. Шаровар, В. В. Афанасьєв. // *Комунальне господарство міст*, 2015, випуск 123. – 2015. С. 26-29.
41. Gyoung-Seok Choi, Jae-Sik Kang, Young-Sun Jeong, Seung-Eon Lee, Jang-Yeul Sohn. An experimental study on thermal properties of composite insulation. *Thermochimica Acta*. 2007. Vol. 455. №1-2. P. 75-79. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.12.013>
42. J.C. Damfeu, P. Meukam, Y. Jannot. Modeling and measuring of the thermal properties of insulating vegetable fibers by the asymmetrical hot plate method and the radial flux method: Kapok, coconut, groundnut shell fiber and rattan. *Thermochimica Acta*. 2016. Vol. 630. P. 64-77. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2016.02.007>
43. ДСТУ Б А.1.1-48-94. Матеріали будівельні. Методи визначення теплофізичних властивостей. Терміни та визначення. [Чинний від 1995-01-

01]. – К.: Державний комітет України у справах містобудування і архітектури, 1995. – С. 2-16.

44. 1. Пінчевська О.О., Головач В.М. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни: «Інноваційні технології з оброблення деревини» / Пінчевська О.О., Головач В.М. – Київ: НУБіП України. 2021.

45. З чого роблять вапно і як застосовують її у будівництві: веб-сайт. URL: <https://remontu.com.ua/z-chogo-roblyat-vapno-i-yak-zastosovuyut-u-budivnictvi> (дата звернення: 06.11.2024).

46. З чого роблять цемент: його склад і властивості: веб-сайт. URL: <https://stroyfibra.com.ua/z-chogo-roblyat-cement-iogo-sklad-i-vlastivosti/> (дата звернення: 06.11.2024).

47. Гіпс. Характеристики, різновиди, поширення: веб-сайт. URL: <https://insgeo.com.ua/gips/> (дата звернення: 05.11.2024).

48. Воробйов Л.Й., Декуша Л.В., Декуша О.Л. «ІНФОРМАЦІЙНО - ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОГО ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЕНТУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ». *The scientific heritage*. 2021. Vol. 1, №70. Р. 42-53.

49. Довідка. Щільність, теплопровідність, теплоємність будівельних, теплоізоляційних та інших матеріалів: веб-сайт. URL: <https://eco-obogrev.com/ua/a233242-spravka-plotnost-teploprovodnost.html> (дата звернення: 05.11.2024).

50. Коефіцієнт теплопровідності популярних будівельних матеріалів: веб-сайт. URL: <https://gool.com.ua/ua/a108178-koeffitsient-teploprovodnosti-populyarnyh.html>? (дата звернення: 05.11.2024).