

**Ю. С. Бікс, Г. С. Ратушняк,
О. Г. Лялюк, О. Г. Ратушняк**

ПОТЕНЦІАЛ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ БІОСФЕРОСУМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**Ю. С. Бікс, Г. С. Ратушняк,
О. Г. Лялюк, О. Г. Ратушняк**

ПОТЕНЦІАЛ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ БІОСФЕРОСУМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2021

УДК 691.12

Б60

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол №__ від __ _____ 2021 р.)

Рецензенти:

І. Н. Дудар, доктор технічних наук, професор

В. М. Желих, доктор технічних наук, професор

Бікс, Ю. С.

Б60 Потенціал енергоефективності огорожувальних конструкцій із біосферосумісних матеріалів / Ю. С. Бікс, Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, О. Г. Ратушняк. — Вінниця: ВНТУ, 2022. — с.

ISBN

Розглянуто чинники впливу на потенціал енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель та окреслено основні напрямки досліджень з оцінювання енергоефективності теплоізоляційних матеріалів на засадах біосферосумісності. Наведено результати аналітичних та експериментальних досліджень та інноваційну конструкцію установки для визначення теплопровідності теплоізоляційних матеріалів рослинного походження. За результатами експериментальних досліджень підтверджено домінуючий вплив щільності матеріалів рослинного походження на коефіцієнт теплопровідності.

Запропоновано математичну модель оцінки надійності забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів із соломи з використанням лінгвістичних змінних. Наведено результати чисельного дослідження з використанням методів аналізу ієрархій, сірого реляційного аналізу та з врахуванням показника теплової інерції з обґрунтування оптимального типу й матеріалу та конструктивного виконання огорожувальних конструкцій будівель за умов біосферосумісності.

УДК 691.12

ISBN -.....

© Ю. Бікс, Г. Ратушняк, О. Лялюк, О. Ратушняк, 2021

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП | 6 |
| РОЗДІЛ 1 ЧИННИКИ ВПЛИВУ НА ПОТЕНЦІАЛ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ..... | 9 |
| 1.1 Основні вимоги до енергоефективності будівель..... | 9 |
| 1.2 Аналіз досліджень оцінювання енергоефективності огороджувальних конструкцій будівель при забезпеченні нормативних параметрів мікроклімату приміщень..... | 12 |
| 1.3 Основні напрямки досліджень з оцінювання потенціалу енергоефективності біосферосумісних огороджувальних конструкцій будівель | 17 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ ДО 1 РОЗДІЛУ | 21 |
| РОЗДІЛ 2 ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ОРГАНІЧНИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ | 29 |
| 2.1 Фактори впливу на теплотехнічні властивості теплоізоляційних матеріалів рослинного походження | 29 |
| 2.2 Методи та обладнання для дослідження теплопровідності теплоізоляційних матеріалів рослинного походження | 35 |
| 2.3 Установка для дослідження теплопровідності теплоізоляційних матеріалів рослинного походження | 41 |
| 2.4 Експериментальні дослідження теплопровідності соломи, як теплоізоляційного матеріалу рослинного походження..... | 47 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ ДО 2 РОЗДІЛУ | 56 |
| РОЗДІЛ 3 БАГАТОФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПОТЕНЦІАЛУ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ БІОСФЕРОСУМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ..... | 59 |

| | |
|---|----|
| 3.1 Моделювання надійності забезпечення ефективності теплоізоляційних матеріалів рослинного походження | 60 |
| 3.1.1 Методи оцінки надійності забезпечення ефективності матеріалів при влаштуванні теплоізоляційної оболонки будівель | 60 |
| 3.1.2 Моделювання надійності забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів із соломи з використанням лінгвістичних змінних | 63 |
| 3.2 Багатокритеріальна оцінка потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій будівель | 71 |
| 3.2.1 Теоретичні засади багатокритеріальної оцінки потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій будівель..... | 71 |
| Методологія дослідження методом аналізу ієрархій (АНР)..... | 72 |
| Методологія дослідження методом сірого реляційного аналізу (GRA) 74 | |
| Методологія дослідження показника теплової інерції..... | 76 |
| 3.2.2 Чисельний аналіз моделювання оцінки потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій будівель..... | 77 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ ДО 3 РОЗДІЛУ | 95 |

ВСТУП

Зменшення світових запасів енергоносіїв та збільшення їх вартості спонукає впровадження прогресивних технологій при влаштуванні теплоізоляційної оболонки енергоефективних будівель для забезпечення комфортного мікроклімату режиму приміщень. Розвиток енергоефективних систем і технологій в будівельній галузі повинен відповідати сучасним вимогам енергозбереження, екологічності та економічності. Вектор стратегії розвитку при будівництві житла – це впровадження біосферосумісних технологій, що ґрунтуються на засадах дотримання принципу збереження та відновлення природних ресурсів.

Матеріали для влаштування непрозорих огорожувальних конструкцій будівель характеризуються різноманітними кількісними та якісними параметрами. Досягнення імітаційного та математичного моделювання є конструктивним інструментом комплексної оцінки матеріалів, що використовуються для влаштування теплоізоляційної оболонки будівель із заданими властивостями.

Перспективним напрямком досліджень енергоефективності потенціалу огорожувальних конструкцій на засадах біосферосумісності є кластерний підхід, що дозволяє об'єднати декілька однакових або подібних факторів впливу, які можуть розглядатися як самостійна одиниця з визначеними властивостями. Одним із шляхів вирішення цієї задачі є використання багатокритеріальних методів аналізу впливу факторів при прийнятті рішень.

Перспективним напрямком в будівництві малоповерхових енергоефективних житлових будинків є використання багатопарових огорожувальних конструкцій, в яких при влаштуванні теплоізолюючого шару доцільно використовувати біопозитивні матеріали органічного походження. На теперішній час відсутній аналіз надійності їх енергоефективності на системному рівні за кількісними та якісними теплофізичними, механічними, екологічними та економічними показниками. Вирішення актуальної проблеми будівництва малоповерхового житла потребує теоретичного та експериментального обґрунтування науково-методологічного механізму досліджування енергоефективності потенціалу огорожувальних конструкцій на засадах біосферосумісності.

В роботі наведено основні нормативні вимоги до енергоефективності будівель з врахуванням чинників забезпечення економічної та екологічної безпеки. Виконано аналіз досліджень оцінювання енергоефективності потенціалу біосферосумісних огороджувальних будівель, призначених для забезпечення комфортності середовища приміщень шляхом управління параметрами мікроклімату. Це дозволило окреслити основні фактори впливу параметрів мікроклімату, що повинні забезпечувати огороджувальні конструкції енергоефективних будівель. Визначено основні напрямки науково-методологічного механізму дослідження енергоефективності потенціалу непрозорих огороджувальних конструкцій на засадах біосферосумісності.

Наведено результати аналітичних та експериментальних досліджень теплопровідності органічних теплоізоляційних матеріалів рослинного походження. За результатами аналітичного аналізу факторів впливу на теплотехнічні властивості теплоізоляційних матеріалів рослинного походження підтверджено кореляційний зв'язок теплопровідності із щільністю та напрямком розташування волокон матеріалів відносно вектору теплового потоку та вологості матеріалу. Охарактеризовано методи та обладнання для дослідження теплопровідності теплоізоляційних матеріалів рослинного походження.

Запропоновано інноваційну конструкцію установки для визначення теплопровідності теплоізоляційного матеріалу рослинного походження. Конструкція виготовленого експериментального зразка установки дозволяє забезпечувати гомогенний розподіл теплового потоку по площі поперечного перерізу досліджуваного зразка теплоізоляційного матеріалу та автоматично реєструвати температуру в характерних місцях зразка. Отримані результати експерименту досліджень підтверджують висновки інших авторів про однозначний домінуючий вплив щільності матеріалів рослинного походження на коефіцієнт теплопровідності.

Розроблено математичну модель оцінки надійності забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів із соломи з використанням лінгвістичних змінних, яка дозволяє здійснювати інтелектуальну підтримку рішень при влаштуванні теплоізоляційної оболонки будівель. Наведено результати чисельного дослідження з використанням

методів аналізу ієрархій, сірого реляційного аналізу та з врахуванням показника теплової інерції з обґрунтування оптимального типу й матеріалу стін та їх товщини за умов біосферосумісності. Такий багатокри-теріальний аналіз дозволяє оцінити енергоефективність потенціалу рі-зних типів конструктивного виконання огорожувальних конструкцій з врахуванням їх теплофізичних, економічних та екологічних парамет-рів.

РОЗДІЛ 1 ЧИННИКИ ВПЛИВУ НА ПОТЕНЦІАЛ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ

1.1 Основні вимоги до енергоефективності будівель

Правові, соціально-економічні та організаційні засади діяльності щодо забезпечення енергетичної ефективності будівель регулює Закон України «Про енергозбереження» [1] та Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» [2]. Енергетична ефективність будівель визначається кількістю енергії для забезпечення належних санітарно-гігієнічних умов мікроклімату для життєдіяльності людей. Енергетична ефективність будинку – це властивість його теплоізоляційної оболонки та інженерного обладнання забезпечувати оптимальні мікроклімату в приміщеннях при фактичних або розрахункових витратах теплової енергії на опалення [3]. Економічно доцільний рівень енергетичного забезпечення ефективності будівель досягається мінімальними експлуатаційними та ліквідаційними втратами протягом всього життєвого циклу проекту з урахуванням вкладу інвестицій та доходу від можливої генерації відновлювальної енергії інженерних систем.

Клас енергетичної ефективності будівель, як рівень її енергетичної ефективності за інтервалом значень питомої витрати теплової енергії на опалення будинку за опалювальний період року, регламентується Державними нормами [3] та наведено в табл. 1.1.

В Україні діють жорсткі вимоги до енергетичної ефективності будівель. Нові будівлі необхідно обов'язково проектувати з низьким споживанням енергії, тобто відповідно до вимог класу В або С. При проектуванні пасивних будівель класу А необхідно втілювати інноваційні технології при влаштуванні енергоефективних зовнішніх огороджувальних конструкцій та генерації відновлювальної енергії інженерних систем із забезпечення нормованих параметрів мікроклімату.

Таблиця 1.1 – Класифікація будинків за енергетичною ефективністю [3]

| | |
|---|---|
| Класи енергетичної ефективності будинку | Різниця в % розрахункового або фактичного значення тепловтрат $g_{буд}$ |
|---|---|

| | |
|---|---|
| | від максимально допустимого значення E_{\max} $[(g_{\text{буд}} \cdot E_{\max})/E_{\max}] \cdot 100\%$ |
| A | мінус 50 та менше |
| B | від мінус 49 до мінус 10 |
| C | від мінус 9 до плюс 5 |
| D | від плюс 6 до плюс 25 |
| E | від плюс 26 до плюс 75 |
| F | плюс 76 та більше |

Відповідно до вимог ДБН В.2.6-31:2016 [3] загальний показник енергоефективності будівлі визначається умовою

$$EP \leq EP_{\max}, \quad (1.1)$$

де EP – розрахункова або фактична питома річна енергопотреба будівлі, кВт/год/м²;

EP_{\max} – максимально-допустиме значення питомої річної енергопотреби будівлі, кВт/год/м² (табл. 1.2).

Розрахункове значення показника енергоефективності для житлових будинків визначають за формулою [3]

$$EP = (Q_{\text{оп}} + Q_{\text{ох}} + Q_{\text{гв}})/A_f, \quad (1.2)$$

де $Q_{\text{оп}}$, $Q_{\text{ох}}$, $Q_{\text{гв}}$ – відповідно річна енергопотреба будівлі на опалення, охолодження та гаряче водопостачання, кВт·год;

A_f – кондиціонована (опалювальна) площа житлової будівлі, м².

Таблиця 1.2 – Нормативна максимальна питома енергопотреба для житлових будівель EP_{max} [3]

| Житлові будівлі по- верховістю | Значення EP_{max} для температурної зони Ук- раїни, кВт·год/м ² | |
|-----------------------------------|---|-----|
| | I | II |
| від 1 до 3 | 120 | 110 |
| від 4 до 9 | 83 | 81 |
| від 10 до 16 | 77 | 75 |
| більше 17 | 70 | 68 |

Відповідно до нормативних вимог [3] класифікацію будівель для оцінки їх енергоефективності з врахуванням споживання енергії на опалення та охолодження наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Класифікація будівель для оцінки їх енергоефективності [3]

| Тип будівлі | Споживання енергії на опалення та охолодження, кВт·год/м ² |
|--|--|
| Старі будівлі (побудовані до 2007 року) | близько 300 |
| Нові будівлі (побудовані з 2007 до 2016 року) | 150 |
| Будівлі низького спожи- вання енергії | 60 |
| Пасивні будівлі | 15 |
| Будівлі нульової енергії | 0 |
| Будівлі плюс енергія | Виробляють більше енергії, ніж самі споживають (встановлено сонячні ба- тарей та колектори, теплові насоси, ре- cuperатори, біогазові установки тощо) |

Дотримання вимог чинного державного законодавства щодо енергоефективності будівель сприяє реалізації національної проблеми із забезпечення економічної та екологічної безпеки. Одним із шляхів зменшення енергоспоживання є впровадження організаційно-економічного

механізму управління в житловому будівництві шляхом впровадження інноваційних енергозберігаючих технологій при влаштуванні огорожувальних конструкцій будівель та з використанням відновлювальних й альтернативних джерел енергії при створенні нормативних санітарно-гігієнічних параметрів мікроклімату в холодний та теплий періоди року в приміщеннях будівель. Підвищення енергоефективності будівель дозволить зменшити техногенне навантаження на навколишнє середовище. Відповідно даних міжнародної енергетичної асоціації впровадження заходів з енергозбереження дозволило б зменшити глобальне енергоспоживання на 40% без погіршення якості життя людей. Це буде також сприяти зменшенню концентрації вуглецю при спалюванні віконних природних ресурсів в системах теплозабезпечення будівель. Використання відновлювальних природних ресурсів в сукупності з біосферосумісними технологіями спорудження житла є одним із перспективних шляхів розвитку будівельної галузі.

Для власників житлових будівель підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій дозволяє збільшити рівень доходів і зменшити витрати на закупівлю енергетичних послуг. Для суспільства загалом – це шлях наближення до сталого розвитку, що буде сприяти підвищенню конкурентоспроможності регіону і України в цілому.

1.2 Аналіз досліджень оцінювання енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель при забезпеченні нормативних параметрів мікроклімату приміщень

Підвищення енергоефективності будівлі та комфортності середовища приміщень шляхом управління параметрами мікроклімату, що формулює температурно-вологісний та акустичний режим, розглянуто в працях зарубіжних та вітчизняних вчених [5-84]. Поступово набувають поширення дослідження з впровадження принципів біосферної сумісності при розробці інноваційних архітектурно-будівельних рішень при створенні теплоізоляційної оболонки будівель [6, 9, 10, 11, 12, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 31, 39, 44, 67, 68].

В монографії Семко В. О. [9] значну увагу приділено методам оцінювання теплотехнічних властивостей несучих та огорожувальних

конструкцій зі сталевих холодноформованих тонкостінних профілів. Розглянуто питання визначення імовірності теплової відмови огорожувальних конструкцій зі сталевих холодноформованих елементів.

В роботі Шаповала С.П. [69] досліджено системи теплозабезпечення енергоефективних будівель на основі зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії в теплову з використанням геліопокриття, геліостін та геліовікон. При обґрунтуванні енергоефективності теплозабезпечення використано системний підхід до математичного моделювання та розроблення алгоритмів багатофакторної оптимізації систем.

Вирішенню проблеми розробки теплофізичних основ теплозабезпечення виробничих комплексів на базі комбінованих систем опалення із застосуванням інфрачервоного нагріву присвячена робота Желиха В.М. [70]. Запропоновано шляхи підвищення енергоефективності будівель виробничих комплексів при створенні нормативних параметрів мікроклімату в них.

В роботі Бікса Ю.С., Ратушняка Г.С. [46] розглянуто стан, особливості і перспективи підвищення енергоощадності малоповерхових будівель шляхом використання термічно неоднорідних непрозорих огорожувальних конструкцій. Проаналізовано основні переваги та недоліки використання теплоізоляційних матеріалів органічного походження при влаштуванні огорожувальних конструкцій. Запропоновано енергоощадні термічно неоднорідні теплозвукоізоляційні блоки і панелі, при виготовленні яких використовується солома.

Наукові основи і принципи формування комфортних параметрів середовища в енергоефективних будівлях на базі урахування динамічних параметрів з використанням математичного апарату точкового числення досліджено в роботі Єгорченкова В.О. [71]. Запропоновано математичну модель нестандартних огорожувальних конструкцій для формування комфортного багатопараметричного середовища будівель. Також одержано принципи багатопараметричної оцінки варіантів огорожувальних конструкцій за різними параметрами середовища приміщень.

Шляхи вирішення актуальної проблеми формування теплофізичних властивостей макропористих теплоізоляційних матеріалів та елементів

конструкцій теплового захисту шляхом регулювання процесу теплома-
сообміну в пористих структурах наведено в роботі Чеймитко А.О. [72].
Також встановлено закономірності динаміки формування теплофізич-
них властивостей пористої структури глиноземних матеріалів залежно
від термодинамічних параметрів та вологості сировинної суміші при її
термообробці.

Енергоефективні системи забезпечення кліматичних умов у примі-
щеннях з використанням різних видів відновлювальних джерел енергії
досліджено в роботі Накашидзе Л.В. [73]. Розроблено методологію ек-
спериментального моделювання для визначення енергетичних парамет-
рів енергоефективних огорожень.

За результатами теоретичних, експериментальних і натурних дослі-
джень систем формування внутрішнього мікроклімату приміщень До-
вгальюком В.Б. [74] запропоновано шляхи вирішення науково-приклад-
ної проблеми з обґрунтування принципів розвитку енергоефективних
технологій забезпечення нормованих параметрів мікроклімату в примі-
щеннях. Запропоновано алгоритм системи керування температурно-во-
логісним режимом, що базується на узагальненому індексі диском-
форту повітряного середовища.

Наукове обґрунтування енергоощадних технологій формування ди-
намичного мікроклімату у приміщеннях детально досліджено Возняком
О.Т. [75, 76]. Запропоновано метод отримання багатофакторних емпі-
ричних залежностей для розрахунку повітророзподілу для забезпе-
чення необхідних параметрів мікроклімату в приміщеннях.

Теоретичне і експериментальне обґрунтування удосконалених ме-
тодів і способів підвищення енергоефективності централізованих сис-
тем теплопостачання при зміні технології та організації спалювання
альтернативних палив наведено в роботі Редька І.О. [77]. Запропоно-
вано методіку моделювання та оптимізації параметрів температурного
графіка теплової мережі з використанням в якості критерію оптималь-
ності мінімальне виробництво ентропії.

На основі теоретичних і експериментальних досліджень Мілейков-
ського В.О. [78] вирішена науково-прикладна проблема обґрунтування
теорії упорядкованої великомасштабної структури струмини. Це дозво-
ляє створювати енергоефективні системи формування мікроклімату

приміщень, а також досліджень схем організації повітрообміну і способів подачі повітря до приміщень.

Теплофізичні аспекти підвищення ефективності будівлі при використанні низькотемпературних систем її теплозабезпечення та термомодернізації огорожувальних конструкцій досліджено Недбайло О.М. [8, 82]. За результатами математичного моделювання визначено питомі теплові втрати будівлі в холодний період року для комбінованої огорожувальної конструкції з повітряним прошарком, запропоновано концептуальні передумови розробки енергоефективних та пасивних будівель нового покоління з високими експлуатаційними можливостями.

Науковому обґрунтуванню теоретично-методологічних і прикладних засад через запровадження **концептуально-інвайроментного** інструментарію управління енергозбереженням на будівельних підприємствах присвячена робота Климчук М.М. []. Також виокремлено класифікаційні ознаки енергозбереження через призму їх прояву в часі: статичні, динамічні та синергійні.

Науково-методичний інструментарій організації біосферосумісного будівництва, як комплексної синергійної категорії та інтегрального критеріального показника широко розглянуто в роботі Чернишева Д.О. [12]. Для оцінювання біосферної сумісності архітектурно-будівельних об'єктів запропоновано показник біосферосумісності, який розраховується за формулою

$$Z_{bs} = (Z_i m_i) = ZM_1 m_M + ZBm_B + ZJm_J + ZDm_D, \quad (1)$$

де ZM – показник біосферної сумісності матеріалів та виробів заводського виготовлення, з яких побудована будівля;

ZB – показник біосферної сумісності етапу будівництва будівлі;

ZJ – показник біосферної сумісності етапу експлуатації будівлі;

ZD – показник біосферної сумісності етапу демонтажу та утилізації матеріалів і конструкцій, з яких була збудована будівля;

$m = \{m_M; m_B; m_J; m_D\}$ – вагові коефіцієнти відповідних показників, які визначаються експертним методом з використанням узагальненого досвіду фахівців-експертів.

Дослідженнями Ковальова В.В. [29] з врахуванням впливу організаційно-технологічних, технічних та управлінських факторів із застосуванням методу експертних оцінок виявлено закономірності вдосконалення проектування реконструкції будівель зі зміною функціонального призначення. Запропоновано методику оцінювання реконструкції будівель при існуючих ресурсних обмежень з урахуванням вимог до енергоефективності, безпечності та екологічності об'єктів і прийнятого рівня ризиків.

В роботі Ткаченко Т. М. [10] запропоновано науково-методологічні основи підвищення рівня екологічної безпеки урбоценозів шляхом створення енергоефективних технологій «зеленого» будівництва. Окреслено основні напрямки концепції сталого розвитку урбоценозів за рахунок зменшення техногенного впливу на біосферу. Запропоновано метод визначення термічного опору рослинного шару як елемента огорожувальних конструкцій будівель.

Системному та інноваційному вирішенню актуальної проблеми обґрунтування методології та прикладного інструментарію розвитку еколого-економічного механізму функціонування суб'єктів будівельної галузі на засадах інтеграції біосферосумісного будівництва, рециклінгу, екоменеджменту та економіки замкнутого циклу присвячена робота Шаповалової А. В. []. Запропонована цільова функція визначення оптимального показника біосферосумісності в часі у векторному вигляді []

$$\vec{z}_{bs} = \overleftarrow{z}_{bs}^{ce}(x_i) + \overleftarrow{z}_{bs}^{cx}(y_i) + \overleftarrow{z}_{bs}^{ve}(z_i), \quad ()$$

де $\overleftarrow{z}_{bs}^{ce}(x_i), \overleftarrow{z}_{bs}^{cx}(y_i), \overleftarrow{z}_{bs}^{ve}(z_i)$ – вектори соціально-економічної та еколого-економічної складових показника біосферосумісності при обмежених поточних $P_1(x_1, y_1, z_1)$ і планових $P_2(x_2, y_2, z_2)$ показників у відповідності до рівня оцінювання та виміру проектно-векторного простору, його пріоритетів (екологізація, модернізація, реновація проекту), заданої максимальної швидкості досягнення мети та довжини вектора (фактичної швидкості досягнення мети – показника біосферосумісності).

Короткий аналіз останніх досліджень свідчить, що енергетичну ефективність будівлі визначають такі показники:

- питомі тепловтрати на опалення будівлі за опалювальний період, кВт·год/м²;
- загальний коефіцієнт теплопередачі теплоізоляційної оболонки будівлі, Вт/(м²·К);
- приведений коефіцієнт теплопередачі теплоізоляційної оболонки будівлі, Вт/(м²·К);
- умовний коефіцієнт теплопередачі огорожувальних конструкцій будівлі, Вт/(м²·К);
- безрозмірний показник теплової інерції огорожувальних конструкцій будівлі;
- показник імовірності теплової відмови огорожувальних конструкцій будівлі;
- середня кратність повітрообміну за опалювальний період;
- коефіцієнт скління фасадів огорожувальних конструкцій будівлі.

Світові тенденції у вирішенні науково-прикладної проблеми підвищення енергоефективності будівель спрямовані на поліпшення теплозахисної здатності їх огорожувальних конструкцій. При аналізі нормативних та довідкових літературних джерел не було знайдено результатів вичерпно системних теоретичних і експериментальних досліджень або рекомендацій з багатокритеріального оцінювання енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель на засадах біосферосумісності. Але це дозволило в певному наближенні окреслити основні фактори впливу на параметри мікроклімату приміщень, що повинні забезпечувати огорожувальні конструкції будівель.

1.3 Основні напрямки досліджень з оцінювання потенціалу енергоефективності біосферосумісних огорожувальних конструкцій будівель

Створення інструментарію організації будівництва для методологічного обґрунтування та прикладного супроводу з реалізації проєк-

тних рішень з влаштування теплоізоляційної оболонки будівель на за-
садах біосферосумісності на всіх етапах життєвого циклу об'єкту у фо-
рматі вітчизняного девелопменту є актуальною проблемою []. Вдоско-
налення методів багатофакторного та багатокомпонентного моделю-
вання та багатокритеріального вибору альтернатив влаштування біос-
феросумісних огорожувальних конструкцій будівель присвячено дос-
лідження іноземних та вітчизняних вчених [].

Для аналізу й кількісної оцінки показників енергетичної ефекти-
вності теплоізоляційної оболонки будівель із забезпечення оптималь-
ного мікроклімату в приміщеннях використовуються різні критерії та
методики. Поширеними методами при моделюванні складних систем є
методи багатокритеріальної оптимізації []: статистичної послідовної
оптимізації, нормування частинних критеріїв, узагальнених критеріїв,
узагальнених критеріїв, функціонально-вартісний аналіз, функції кори-
сності, нечітких парних порівнянь Сааті тощо [].

Домінуючі фактори впливу на енергоефективність потенціалу те-
плоізоляційних властивостей огорожувальних конструкцій: недостат-
ньо ефективні проектні рішення: порушення технології влаштування
зовнішніх огорожувальних конструкцій та недотримання експлуата-
ційних вимог.

Основні помилки при проектуванні зовнішніх огорожувальних
конструкцій теплоізоляційної оболонки будівель наступні:

- помилково вибраний теплоізоляційний матеріал та його тов-
щина;
- недостатньо обґрунтовані розрахункові величини теплопровідно-
сті та щільності матеріалів, вологісного режиму приміщення, те-
пловласвоєння;
- неточне оцінювання термічної неоднорідності конструкцій та як
наслідок в розрахунок приведенного опору теплопередачі непро-
зорих та світлопрозорих елементів огорожувальних конструк-
цій;
- неякісні конструктивні рішення влаштування теплопровідних
включень;
- недостатня герметизація стиків та зовнішніх поверхонь огоро-
жувальних конструкцій;

- помилковий вибір пароізоляційного шару або невдале його розміщення.

Порушення технології влаштування зовнішніх огороджувальних конструкцій призводить до зменшення рівня теплового захисту будівель та характеризується такими причинами:

- суттєві відхилення проектної щільності теплоізоляційних матеріалів та їх геометричних розмірів, що збільшує теплопровідність;
- влаштування в огороджувальну конструкцію вологого теплоізоляційного матеріалу або теплоізолюючих вставок;
- неякісне розміщення теплоізоляційного шару в конструкції, тобто неповне заповнення, нещільностей дотикання до ребер жорсткості тощо;
- заміна запроектованого утеплювача іншим із більшою теплопровідністю;
- неякісна герметизація стиків окремих елементів огороджувальних конструкцій;
- порушення технології влаштування водозахисних та пароізоляційних шарів огороджувальних конструкцій;
- неякісна гідроізоляція фундаменту та стін підвальних приміщень.

Експлуатаційні фактори зменшення енергозберігаючих параметрів теплоізоляційної оболонки будівлі наступні:

- технічні неполадки устаткування для водовідведення атмосферних опадів;
- несвоєчасне відновлення технічного стану волого- та пароізоляційних елементів огороджувальних конструкцій;
- розміщення водонасичених матеріалів безпосередньо біля огороджувальних конструкцій;
- розміщення устаткування, яке ускладнює циркуляцію повітря біля поверхні огороджувальних конструкцій.

Результати аналізу досліджень провідних вчених в галузі проектування, реконструкції та експлуатації будівель, направлених на пошук організаційно-технологічних шляхів підвищення енергоефективності будівель, дозволяють зробити висновок про відсутність єдиного під-

ходу до вибору критерію прогнозування та управління їх енергоефективністю та екологічністю на всіх стадіях життєвого циклу. Також відсутні вичерпні наукові обґрунтування методології багатокритеріальної оцінки енергоефективності потенціалу огорожувальних конструкцій із біосферосумісних матеріалів. Концептуальний підхід з вирішення цих питань може бути частково реалізований з використанням науково-методологічного механізму дослідження енергоефективності потенціалу огорожувальних конструкцій на засадах біосферосумісності (рис. 1.1).

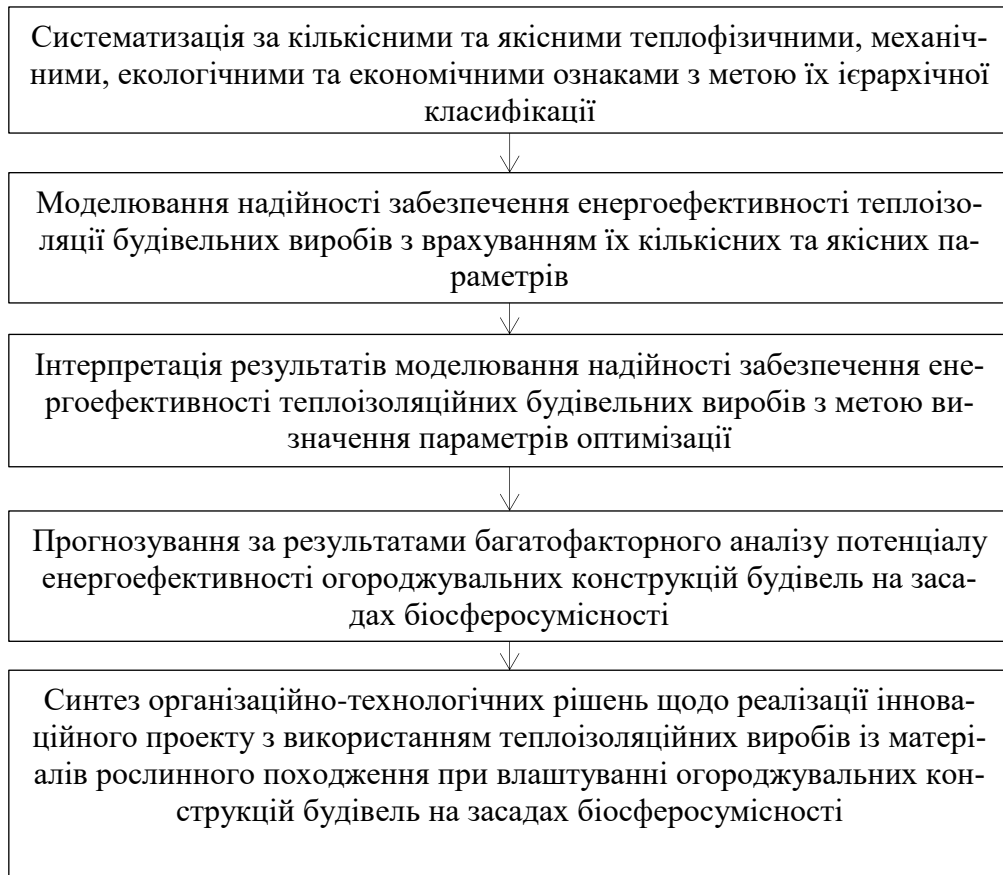


Рисунок 1.1 – Науково-методологічний механізм досліджування енергоефективності потенціалу огорожувальних конструкцій на засадах біосферосумісності

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ ДО 1 РОЗДІЛУ

1. Про енергозбереження: Закон України від 01.07.94 р. № **74/94-ВР**. Дата оновлення: 23.07.2017. URL: <https://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/74/94-вр> (Дата звернення: 23.02.2019).
2. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.06.2017 № **2118-VIII**. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2118-19> (Дата звернення: 23.02.2019).
3. ДБН В.6 – 31:2016. Теплова ізоляція будівель.[Чинний від 2017-05-01]. Вид. Офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2017. 33 с. (Державні будівельні норми).
4. ДСТУ Б В.2.6 - 189:2013. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2014. 55 с. (Державні стандарт України).
5. Дудар І. Н., Кучеренко Л. В., Швець В. В. Енергозбереження в житловому будівництві: навч. посібник. Ч. 1. Вінниця: ВНТУ, 2015. 57 с.
6. Саницький М. А., Позняк О. Р., Марущак У. Д. Енергозберігаючі технології в будівництві: навч. посібник. Львів: Національний ун-т «Львів. Політехніка», 2013. 236 с.
7. Ратушняк Г. С., Ратушняк О. Г. Управління проектами енергозбереження шляхом термомодернізації будівель: навч. посіб. Вінниця: Універсум-Вінниця, 2006. 120 с.
8. Недбайло О.М. Теплофізичні аспекти підвищення ефективності будівлі при використанні низькотемпературних систем її теплозабезпечення та термомодернізації огорожувальних конструкцій: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.06 / Київ, 2018. 28 с.
9. Семко О. В., Філоненко О. І., Панченко С. П., Мякий Є. І. Спорудження малоповерхових житлових будинків із солом'яних блоків та визначення їх теплотехнічних характеристик. Вісник Придніпр. держ. академ. буд. та арх. Дніпро: ПДАБА. 2013. №8. С. 47–52.
10. Ткаченко Т. М. Науково-методологічні основи підвищення рівня

- екологічної безпеки урбоценозів шляхом створення енергоефективних технологій «зеленого будівництва»: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 21.06.01 / Київ, 2018. 32 с.
11. Фаренюк Г. П. Основи забезпечення енергоефективності будинків та теплової надійності огорожувальних конструкцій: монографія. Київ: Гамма-Принт, 2009. 137 с.
 12. Чернишев Д. О. Науково-методологічний інструментарій організації будівництва на засадах біосферосумісності: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.08 / Дніпро, 2019. 33 с.
 13. Нагорний М. В. Ефективні енергозберігаючі конструкції малоповерхових житлових будинків: дис... канд. техн. наук: 05.23.01 / Харк. держ. акад. залізн. трансп. Харків, 2001. 18 с.
 14. Теплоизоляция. Материалы, конструкции, технологии: справ. пособие / Гл. ред. С. М. Кочергин. Москва: Стройинформ, 2008. 440 с.
 15. Будівельне матеріалознавство: підруч. / Кривенко П. В., та ін.; Київ: ТОВ УВПК «ЕКСОБ», 2004. 704 с.
 16. Дворкін Л. Й., Липовська С. Л. Будівельне матеріалознавство: підруч. Рівне: НУВГП, 2016. 448 с.
 17. Будівельні матеріали і виробы / Лівінський О. М. та ін.; Київ: «МП Леся», 2016. 660 с.
 18. Stazi F. Thermal inertia in energy efficient building envelopes. Butterworth Heinemann. 2017. 367 p.
 19. Карасев Д. О., Шипилова Н.А., Арутуян М.С. Малоэтажное строительство. Виды строительных материалов для возведения зданий. Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» 2016. Том 8, №3. С. 1–8. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/91TVN316.pdf>. (дата звернення 23.02.2019).
 20. Малоповерхове будівництво має всі перспективи розвитку в Україні. URL: <https://www.biznews.com.ua/malopoverhove-budivnistvo-maye-vsi-perspektivi-rozvitku-v-ukrayini/> (дата звернення 20.02.2019).
 21. House of Straw – Straw Bale Construction Comes of Age. URL: <http://www.eren.doe.gov/buildings/documents/strawbale.html>. (дата звернення 23.02.2019).

- 22.Доброноженко О. В. Перспективы возведения экодому в Украине как приоритетное направление в энергосбережении. Вісник Сумського національного аграрного університету. 2012. № 5(16). С. 152–155.
- 23.Экопоселок в Днепропетровске: Хоббитания в Мордоре? URL: <https://mobile.gorod.dp.ua/news/71241> (дата звернення 02.06.2018).
- 24.Фирсик А. Ю. Устройство и функционирование систем экодому (автономный экодому). Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2010. № 25. С. 376–379.
- 25.Строится Дом из соломенных панелей 34×19 метра под Харьковом! URL: <http://www.biohouse.com.ua/2013/10/3419.html>. (дата звернення 02.06.2018).
- 26.Профессиональное строительство домов из соломы URL: <http://toloka.info/ecoukraine/dom-soloma.html> (дата звернення 06.04.2018).
- 27.Строительство биопозитивных домов из соломенных блоков в Волгоградской области и во всем ЮФО : сб. статей общегородской науч.-практ. конф. "Волжский: история, культура, образование" (Волжский, 19-20 дек. 2013 г.). Волгоград: Волгоградский гос. архитектурно-строит. ун-т, 2014 С. 114 – 117.
- 28.Brojan L. Clouston Peggi L. Advantages and disadvantages of strawbale building. Architecture, research. 2014. №1. P. 21-26.
- 29.Atkinson C. Why build with straw? Nuffield Farming Scholarships Trust, 2010. 62 p.
- 30.The Woodlouse. Blogging about strawbale selfbuild, sustainable building, adaptation to climate change, and associated ramblings URL: <http://thewoodlouse.blogspot.cz/2015/09/embodied-and-dis-embodied-carbon.html> (дата звернення 05.10.2018).
- 31.Бруй А. Е. Харламов И. В. Анализ возможных конструкций стен с использованием соломенных блоков для климатических условий Алтайского края. Ползуновский вестник. 2014. № 1. С. 39 – 42.
- 32.Мирман М. Макдонал С. Дом из соломенных блоков.Solar Energy International. 1996. 60 с.

33. Strawbale Building in Poland URL: http://osbn.pl/sites/default/files/pliki/Strawbale%20building%20in%20Poland_Maciej%20Jagielak_0.pdf (дата звернення 15.08.2018).
34. Строительный элемент с использованием волокнистого материала и строительная конструкция: пат. 9138 Беларусь: МПК E04C 2/16. № u20126045; заявл. 28.06.2012; опубл. 30.04.2013, 8 с.
35. Строительный элемент с использованием волокнистого материала и конструкция перекрытия: пат. 10032 Беларусь: МПК E04C 1/40. № u20130415; заявл. 17.05.2013; опубл. 30.01.2014, 7 с.
36. Зовнішній стіновий теплозвукоізоляційний блок: пат. 121651 Україна: МПК E04C 2/10. № u201706564; заявл. 25.06.2017; опубл. 11.12.2017, Бюл. №23, 3 с.
37. Каркасна стінова панель із теплозвукоізоляційних блоків: пат. 127505 Україна: МПК E04C 2/16. № u201800985; заявл. 02.02.2018; опубл. 10.08.2018, Бюл. №15, 7 с.
38. Багатошаровий теплоізоляційний стіновий блок: пат. 130548 Україна: МПК E04C 2/00. № u201807226; заявл. 25.06.2018; опубл. 10.12.2018, Бюл. №23, 6 с.
39. Энергоефективний будівельний багатошаровий теплоблок: пат. 134337 Україна. МПК E04B 1/00. № u20180000; заявл. , опубл. , Бюл. №, 3 с.
40. Композиційний будівельний теплоблок: пат. 130276 Україна: МПК E04B 1/00. № u201808845; заявл. 20.08.2018; опубл. 26.14.2018, Бюл. №22, 8 с.
41. Энергоефективний будівельний блок: пат. 134337 Україна. МПК E04B 1/00. №u201812518; заявл. 17.12.2018; опубл. 10.08.2019, Бюл. №9, 5 с.
42. Производство домов из соломенных блоков. URL: <http://rainbowecosystem.com/ru/products/straw-blocks/> (Дата звернення 16.03.2018).
43. Brojan L., Petric A., Clouston Peggi L. A comparative study of brick and straw bale wall systems from environmental, economical and energy perspectives. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2013. Vol. 8, No. 11. P. 920–926.

- 44.Куліченко І. І. та ін. Економічна ефективність використання місцевих екологічних матеріалів в малоповерховому будівництві доступного житла. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения.* 2013. №. 69. С. 257–264.
- 45.Семко В. І. Сталеві холоднодеформовані тонкостінні конструкції: монографія. Полтава: ТОВ «АМСГ», 2017. 325 с.
- 46.Бікс Ю.С., Ратушняк Г.С. Термічно неоднорідні енергоощадні огорожувальні конструкції малоповерхових будівель: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2019. – 76 с.
- 47.Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Моделювання теплопередачі через зовнішній багатошаровий солом'яний стіновий блок. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві.* 2018. № 1. С. 50 – 55.
- 48.Bläsi W. *Vauphysik. Bibliothek des technischen Wissens.* 3 Auflage. Naan: Verlag Europa Lehrmittel, 2001. 536 p.
- 49.Hens H. *Building Physics Heat, Air and Moisture: Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises.* 2nd Ed. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2012. 324 p.
- 50.Особов В. И., Васильев Г. К., Голяновский А. В. *Машины и оборудование для уплотнения сено-соломистых материалов: основы теории и расчета рабочих органов.* Москва: Машиностроение, 1974. 231 с.
- 51.Сычев С. А. Экотехнологии строительства с учетом критериев энергоэф-фективных зданий. *SCIENCETIME.* 2014.№10. С.343–349.
- 52.Лобанова А. В., Казимагомедов И.Э. Стеновые изделия из арболита на основе костры льна. *Комунальне господарство міст.* 2015, випуск 124. С. 18-20.
- 53.Pacheco-Torgal F., Jalali S. *Earth construction: Lessons from the past for futureeco-efficient construction.* *Construction and Building Materials.* 2012. Vol. 29. P. 512– 519.
- 54.Rajesh Kumar Jain. *A study on eco friendly cost effective earthbag*

- house construction. Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology. 2013. Vol. 9, No. 1, P. 200 – 211.
55. Carabaño R. *Life Cycle Assessment (LCA) of building materials for the evaluation of building sustainability: the case of thermal insulation materials* URL: https://www.researchgate.net/publication/316645292_Life_Cycle_Assessment_LCA_of_building_materials_for_the_evaluation_of_building_sustainability_the_case_of_thermal_insulation_materials (Last accessed 03.11.2019).
56. Brojan L., Petric A., Clouston Peggi L. *A comparative study of brick and strawbale wall systems from environmental, economical and energy perspectives*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2013. Vol.8, No.11. P.920–926.
57. Шеина С. Г., Миненко Е. Н. Разработка алгоритма выбора энергоэффективных решений в строительстве. Инженерный вестник Дона. 2012. №4-1(22). С.133.
58. Мацура А. А., Ермоленко Б. В. Разработка методов оптимального проектирования энергоэффективных домов. Успехи в химии и химической технологии. 2015. №8. ТОМ XXIX. С.118–122.
59. Смирнова С. Н. Принципы формирования архитектурных решений энергоэффективных жилых зданий: дис. ... канд. арх.: 18.00.02 / Нижний Новгород, 2009. – 320 с.
60. Доброноженко О. В. Перспективы возведения экодому в Украине как приоритетное направление по энергосбережению. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Будівництво», 2012. №5 (16). С. 152-156.
61. Дудикевич Ю. Б. Енергоощадні котеджі: методики проектування будинків без газу. Львів: Сполом, 2011. 192 с.
62. Hens H. *Building Physics Heat, Air and Moisture: Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises*. 2nd Ed. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2012. 324 p.
63. Мусорина Т. А., Гамаюнова О. С., Петриченко М. Р. Обоснование конструктивных мероприятий по увеличению энергоэффективности стеновых ограждений. *Вестник МГСУ*. 2017. Том 12 Выпуск 11 (110). С. 1269- 1277.

64. Ратушняк Г. С., Ратушняк О. Г. Управління енергозберігаючими про-ектами термореновації будівель. Вінниця: Універсум-Вінниця, 2009. 131с.
65. Енергозбереження в будівлях. URL: <http://www.patriot-nrg.ua/ukr/sav-ings/view/24> (дата звернення 06.01.2019 р).
66. Европейские стандарты энергоэффективности зданий. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5089 (дата звернення 07.01.2019).
67. Шпакова Г. В. Теоретико-методологічні засади формування еколого-економічного механізму розвитку біосферосумісного будівництва в Україні: автореф. дис... д-ра економ. наук: 08.00.06 / Київ, 2020, 46 с.
68. Критерии энергоэффективности в «зеленом» строительстве. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5134 (дата звернення 07.01.2019).
69. Шаповал С. П. Системи теплозабезпечення енергоефективних будівель на основі зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії у теплову: автореф. дис.... д-ра техн. наук: 05.23.03 / Київ, 2020, 36 с.
70. Желих В. М. Розробка теплофізичних основ тепло забезпечення виробничих комплексів на базі комбінованих систем опалення із застосуванням інфрачервоного нагріву: автореф. дис.... д-ра техн. наук: 05.14.06 / Київ, 2013, 42 с.
71. Єгорченков В. О. Наукові основи формування комфортного середовища в будівлях за динамічними параметрами природного освітлення: автореф. дис.... д-ра техн. наук: 05.23.03 / Київ, 2019, 36 с.
72. Чейлитко А. О. Розвиток теоретичних основ формування теплофізичних властивостей теплоізоляційних матеріалів шляхом управління процесами тепломасообміну в пористих структурах: автореф. дис.... д-ра техн. наук: 05.14.06 / Львів, 2018, 43 с.
73. Накашидзе Л. В. Енергоефективні системи забезпечення кліматичних умов в приміщеннях на основі використання енергії сонця та оточуючого середовища: автореф. дис.... д-ра техн. наук: 05.14.08 / Київ, 2018, 43 с.

74. Довгалюк В. Б. Розвиток наукових основ створення температурно-вологісних режимів повітряного середовища в музейних приміщеннях: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.23.03 / Київ, 2020, 40 с.
75. Возняк О. Т. Енергоощадні технології формування динамічного мікроклімату у стиснених умовах виробничих приміщень: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.23.03 / Київ, 2018, 36 с.
76. Возняк О., Юркевич Ю., Желих В. Теоретичні передумови оптимізації сукупних термореновацій при проведенні енергетичного аудиту будинку, с. 140-145.
77. Редько І. О. Централізовані системи теплопостачання на основі удосконалених технологічних методів і способів спалювання альтернативних палив: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.23.03 / Київ, 2020, 41 с.
78. Мілейковський В. О. Енергоефективне формування мікроклімату на основі розробленої теорії макроструктури турбулентних течій: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.23.03. / Київ, 2020, 40 с.
79. Ковальов В. В. Розвиток науково-методичних основ організаційно-технологічного проектування реконструкції промислових будівель зі зміною функціонального призначення: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.23.08 / Дніпро, 2021, 37 с.
80. Контроль якості будівельно-монтажних робіт: курс лекцій / О. М. Лівінський та ін. К.: «МП Леся», 2018. – 776 с.
81. Основы моделирования сложных систем монографий / под. ред. И. В. Кузьмина: Київ: Вища школа, 1981, 360 с.
82. Басок Б. І., Божко К. І., Беляєва Т. Г., Гончарук С. М., Недбайло О. М., Новінька Н. П., Ткаченко М. В., Хибака М. А. Полівалентна система теплозабезпечення експериментального будинку пасивного типу (площею 300 м²) на основі використання відновлювальних та альтернативних джерел енергії. Наука та інновації, К.: 2014, Т. 10, №6, с. 34-52.
83. Климчук М.М. Науково-прикладні засади управління енергозбереженням на будівельних підприємствах: автореф. дис... д-ра економ. наук: 08.00.04 / Київ, 2020, 38 с.

84. Ратушняк Г. С., Шаманський С. Й. Критеріальний метод оцінювання засобів обміну в системах водопостачання. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 180 с.

РОЗДІЛ 2 ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ОРГАНІЧНИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ

2.1 Фактори впливу на теплотехнічні властивості теплоізоляційних матеріалів рослинного походження

Теплотехнічні властивості органічних теплоізоляційних матеріалів характеризуються теплопровідністю, теплоємністю, термостійкістю, вогнетривкістю та вогнестійкістю. Одним із найважливіших показником якості теплоізоляційних матеріалів є теплопровідність.

В роботі Філоненко О.І., Юрін О.І. [11] викладено дані про теплофізичні властивості будівельних матеріалів огорожувальних конструкцій. Охарактеризовано залежність коефіцієнта теплопровідності від густини органічних матеріалів, значення якого складає 0,29-0,41 Вт/м·К.

Вказується на суттєвий вплив вологості матеріалу на його теплопровідність, що обумовлено тим, що теплопровідність води становить 0,55 Вт/м·К, тобто в 20 разів більше, ніж коефіцієнт теплопровідності повітря в порах середнього розміру. Для анізотропних матеріалів спостерігається залежність коефіцієнта теплопровідності від напрямку теплового потоку. Для сосни і ялини густиною 500 кг/м³ коефіцієнт теплопровідності становить при напрямку теплового потоку поперек волокон 0,14 Вт/(м·К) та вздовж волокон 0,29 Вт/(м·К). Це явище пояснюється тим, що при русі теплового потоку уздовж волокон теплота проходить по стінках капілярів, а при русі поперек волокон тепловому потоку необхідно долати опір значної кількості капілярів з повітрям.

Високопористі матеріали рослинного походження є двофазними елементними системами та складаються з твердої речовини, яка створює каркас із стінок пор, й повітря, що заповнює пори. Теплопровідність матеріалів рослинного походження визначається теплопровідністю твердих речовин, що складають каркас, їх пористістю та характеру пор, що є визначальними чинниками впливу на щільність матеріалу. На величину теплопровідності органічних теплоізоляційних матеріалів рослинного походження впливає характер розміщення теплового потоку відносно каркасу з твердої речовини. Теплопровідність теплоізоляційних виробів із соломи має різні значення при розміщенні волокон соломи перпендикулярно чи паралельно напрямку теплового потоку.

За результатами вимірювань MoCale [2] теплопровідність тюків соломи коли тепловий потік перпендикулярний до волокон теплопровідність становить 0,049 Вт/мК, а коли тепловий потік паралельний до них – 0,061 Вт/мК.

Після публікації роботи MoCale [2] було проведено аналогічні експерименти Andersen [3] та Shea [4] з дослідження теплопровідності соломи. Вони вивчали дві серії зразків тюків соломи: одна з щільністю 75 кг/м³, а інша з щільністю 90 кг/м³. Теплопровідність першої серії зразків тюків соломи була 0,052 Вт/мК при тепловому потоці перпендикулярно до волокон і 0,056 Вт/мК при паралельному до волокон тепловому потоці. Теплова провідність, отримана для другого набору зразків тюків соломи із щільністю 90 кг/м³ була трохи більшою: 0,056 Вт/мК при перпендикулярному і 0,06 Вт/мК при паралельному розташуванні

волокон відносно напрямку теплового потоку. Для щільності тюків со-
ломи 75 кг/м^3 при напрямку теплового потоку перпендикулярно до во-
локон виявлено збільшення теплопровідності на $0,004 \text{ Вт/мК}$ порівняно
з паралельним розміщенням волокон [3]. Для щільності 90 кг/м^3 при
перпендикулярному та паралельному розміщенні, спостерігається од-
накова величини коефіцієнту теплопровідності [3,4].

Shea [4] вивчав теплопровідність на різних зразках великого діапа-
зону щільностей соломи стиснутих до товщини $0,25 \text{ м}$. При виконанні
експериментів [4] солом'яні волокна в зразках не мали певної орієнтації
в розташуванні відносно напрямку теплового потоку. Виміряні вели-
чини теплопровідності зразків соломи коливаються від $0,059 \text{ Вт/мК}$ для
щільності 63 кг/м^3 до $0,064 \text{ Вт/мК}$ при щільності 123 кг/м^3 . Shea запро-
понував еталонну величину теплопровідності для соломи $0,065 \text{ Вт/мК}$.

Німецька асоціація зі спорудження будівель з солом'яних тюків ви-
конала численні дослідження на солом'яних тюках FASBA [5]. За ре-
зультатами досліджень отримано теплопровідність солом'яних тюків
близько $0,045 \text{ Вт/мК}$ коли тепловий потік був перпендикулярним до во-
локон [5]. Затверджена німецьким центром компетенції для будівниц-
тва (DIB) [6] теплопровідність вважається $0,052 \text{ Вт/мК}$ коли тепловий
потік перпендикулярний до волокна соломи і $0,080 \text{ Вт/мК}$ коли він па-
ралельний.

Достовірні результати вимірювання теплопровідності, як правило,
отримуються з використанням методів стаціонарного стану, таких як
метод "охоронної гарячої пластини". Більшу частину результатів визна-
чення теплопровідності отримано при перехідних або стійких методах
з різною товщиною солом'яних тюків Dubois [7].

В роботі Douzane [8] наведено результати визначення теплопровід-
ності тюків соломи, що отримано методом стаціонарного режиму. Охо-
лоджена гаряча плита-апарат була використана для оцінки теплопро-
відності солом'яних тюків. Досліджено теплопровідність двох видів
проб зразків товщиною $0,1 \text{ м}$ щодо орієнтації волокон. Середні зна-
чення теплопровідності при 10° C були відповідно $0,072 \text{ Вт/мК}$ при па-
ралельній та $0,051 \text{ Вт/мК}$ перпендикулярній орієнтації волокон соломи.

Conti [9] розробив систему вимірювання теплопровідності для соло-

м'яних тюків, яка базувалася на стаціонарному режимі. Експериментальна установка складається з вимірювальної камери та нагрівача всередині кліматичної камери. Автори визначили що теплопровідність становить близько 0,066 Вт/мК в випадку коли тепловий потік направлений паралельно волокнам.

Ефект впливу відносної вологості на теплопровідність матеріалів рослинного походження визнаний багатьма авторами. Теплопровідність соломи збільшується з вмістом води через пористу структуру волокнистих ізоляційних матеріалів. Відзначається збільшення теплопровідності рисової соломки, коли вміст води змінювався від 0,051 Вт/мК для 10% вологості до 0,0519 Вт/мК для 18% вологості [10]. Аналогічні результати було отримано Grelat [11] для тюків соломи. Вимірювання з 0%, 50% та 90% в діапазоні відносної вологості відповідно (0%, 15% та 22% вмісту води) показали значне збільшення теплопровідності; від 0,064 Вт/мК при 0% вологості до 0,069 Вт/мК при 22% вологості.

Vincas Gurskis та Rytis Skominas [12] за результатами випробувань визначили, що підвищення вологості на 1% збільшує коефіцієнт теплопровідності соломи на 0,0005 ... 0,0011 Вт/мК. Максимальна вологість, задана ними у дослідженні (20%), підвищувала коефіцієнт теплопровідності до 0,01 ... 0,02 Вт/мК, або на 19-42% в діапазоні щільностей зразків соломи в діапазоні від 50 до 130 кг/м³. Також ними було встановлено, що при збільшенні щільності тюка соломи збільшується його теплопровідність [12].

Palumbo [13] досліджував теплопровідність плити, що складалась з ячмінної соломки (81%) та кукурудзяного крохмалю (19%). Спостереженнями виявлено значне лінійне збільшення теплопровідності при підвищенні відносної вологості від 10% до 90%.

Семко О.В. та ін. [14] виконано експериментальне дослідження температурного режиму солом'яних блоків при стаціонарному тепловому режимі в температурній камері. Зразки виготовлені із пресованої соломи із щільністю 130 кг/м³. Зразки опоряджено глиняним розчином товщиною 0,01 м. Загальний розмір зразка 0,9x0,09x0,5 м без конкретного напрямку волокон відносно напрямку теплового потоку зі щільністю 25,2 Вт/м. За результатами досліджень встановлено, що коефіцієнт теплопровідності зразка солом'яного блока становить 0,299 Вт/м·К.

Результати досліджень теплопровідності матеріалів рослинного походження при різній щільності та напрямку теплового потоку відносно волокон наведено в табл. 2.1. На рис. 2.1 і 2.2 наведено значення теплопровідності соломи за даними літературних джерел для різної щільності тюків соломи та напрямку теплового потоку відносно волокон соломи.

Таблиця 2.1 - Результати досліджень теплопровідності солом'яних блоків

| Автори досліджень | Щільність соломи, кг/м ³ | Напрямок волокон відносно теплового потоку | Теплопровідність соломи, (Вт / мК ⁰) |
|------------------------------|-------------------------------------|--|--|
| McCabe, [1] | 130 | перпендикулярно | 0,049 |
| | | паралельно | 0,061 |
| Andersen, [2] | 75 | перпендикулярно | 0.052 |
| | | паралельно | 0.056 |
| | 90 | перпендикулярно | 0.056 |
| | | паралельно | 0.060 |
| Shea, 2013 [3] | 63 | немає конкретного напрямку | 0,059 |
| | 76 | | 0,062 |
| | 85 | | 0,062 |
| | 107 | | 0,064 |
| D'alessandro, 2017 [13] | 114 | | 0,064 |
| | 123 | | 0,064 |
| Fasba, 2003 [4] | 90-110 | перпендикулярно | 0.045 |
| Douzane, 2016[7] | 80 | перпендикулярно | 0.051 |
| | | паралельно | 0.072 |
| Conti, 2016 [8] | 75 | паралельно | 0.066 |
| Grelat, 2004 [10] | 77 | паралельно | 0.066 |
| Семко О.В. та ін., 2013 [14] | 140 | немає конкретного напрямку | 0,299 |

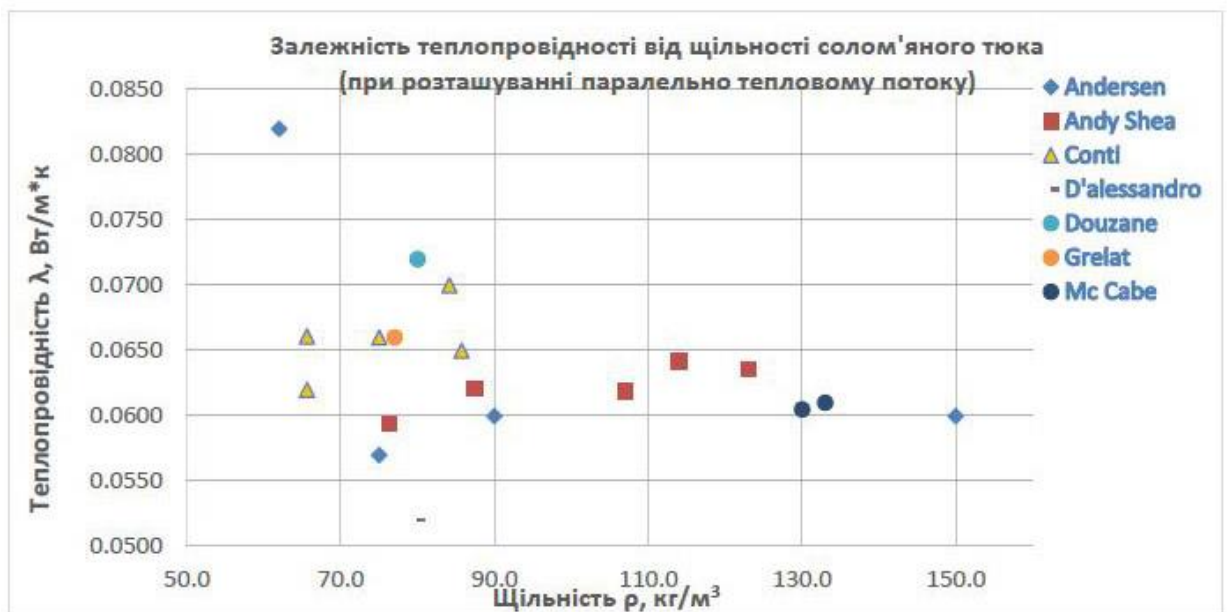


Рисунок 2.1 – Зв’язок між щільністю солом’яного блоку та його теплопровідністю при розташуванні зразків паралельно тепловому потоку за експериментальними даними [2,3,4,8,9,11,13]

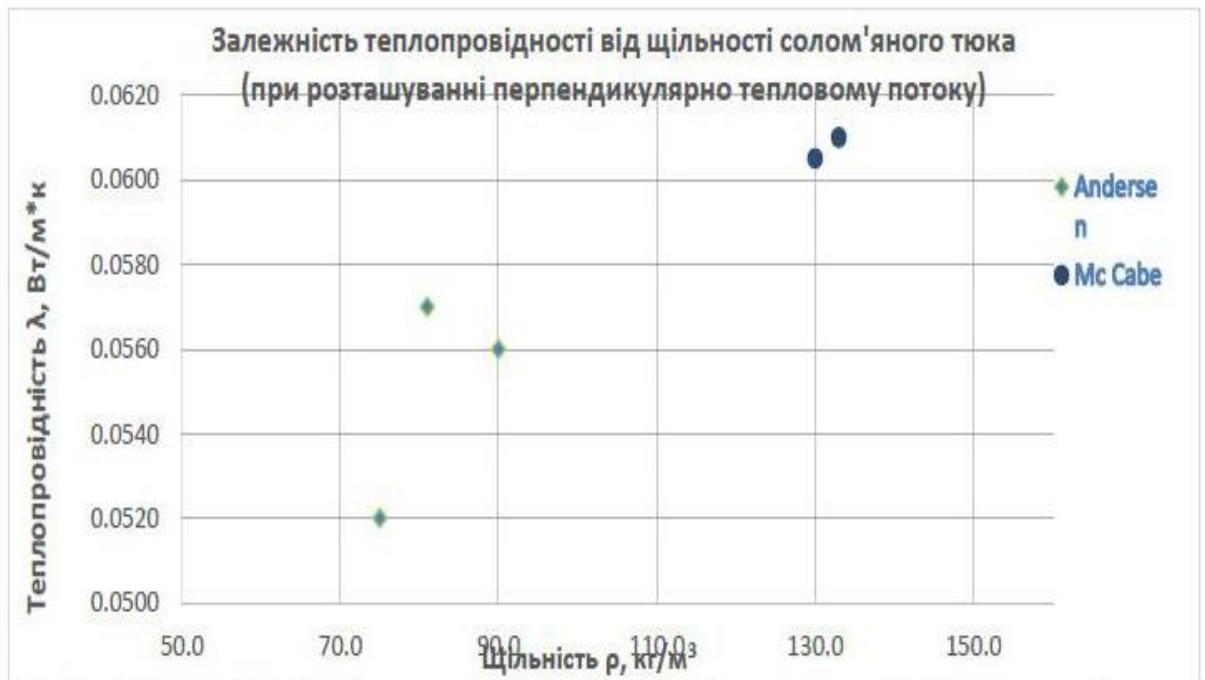


Рисунок 2.2 – Зв’язок між щільністю солом’яного блоку та його теплопровідністю при розташуванні зразків перпендикулярно до теплового потоку за експериментальними даними [2, 3]

2.2 Методи та обладнання для дослідження теплопровідності теплоізоляційних матеріалів рослинного походження

Теплопровідність – характеризує здатність матеріалу передавати тепло і вимірюється у ватах на квадратний метр площі поверхні для температурного градієнта один градус на одиницю товщини один метр та визначається за формулою Фур’є [16, 17, 18, 19]

$$\lambda = (Q/S) \cdot (\Delta T/\Delta L), \quad (2.1)$$

де: Q - кількість переданого тепла, Вт; S - площа поперечного перерізу, м²; ΔT - зміна температури тіла, К; ΔL - зміна довжини тіла, м; Q/S - тепловий потік.

Теплопровідність матеріалів визначається методом стаціонарного

потоків режиму, коли температура поля у зразку з часом не змінюється, методом регулярного режиму та методом нестационарного теплового потоку. Поширеним є стаціонарний метод, який дозволяє визначати значення теплопровідності при будь-якому температурному режимі із достатньо високою точністю.

Відповідно до ДСТУ Б.В. 2.6-101-2010 [20] теплові випробування теплоізоляційних властивостей огорожувальних конструкцій будівель виконують в лабораторних умовах за результатами вимірювання температури внутрішнього і зовнішнього повітря. Дослідний зразок розміщують в кліматичній камері. Первинними вимірювальними перетворювачами поверхневої густини теплового потоку слугують термоелектричні перетворювачі. Температуру повітря визначають скляними термометрами. Опір теплопередачі обчислюють за відомою формулою.

В роботі Фаренюка Г.Г. [21] розглянуто метод лабораторних випробувань теплоізоляційних матеріалів. Метод ґрунтується на випробуваннях матеріалу, який піддають циклічним кліматичним впливам, що імітують умови експлуатації матеріалу в огорожувальних конструкціях. За результатами вимірювань теплофізичних характеристик матеріалів з врахуванням конструктивного рішення теплоізоляції за зміною теплопровідності огорожувальних конструкцій оцінюють термін ефективної експлуатації матеріалу.

Дворніким Л.І. та ін. [22] запропоновано експериментально-теоретичний спосіб визначення коефіцієнта теплопровідності для пінополістиролу, який використовується як теплоізоляційний матеріал огорожувальних конструкцій будівель. Суть способу полягає в тому, що коефіцієнт теплопровідності розраховується з врахуванням експериментально визначеної істинної густини пінополістиролу та середньої густини матеріалу з врахуванням емпіричного коефіцієнта.

Риндюк С.В. [23] запропоновано метод визначення теплопровідності багатошарових будівельних виробів за результатами моделювання шляхом розв'язання задачі нестационарної теплопровідності. Для визначення температури в кожному шарі будівельного виробу використано рекурентні формули для коефіцієнтів наближеного розв'язку системи рівнянь нестационарної теплопровідності.

Основними впливовими чинниками, від яких залежить теплопровідність, є щільність та вологість матеріалу, температура навколишнього середовища та напрямок теплового потоку [2-15]. Теплопровідність матеріалів рослинного походження зазвичай вимірюється [18, 20, 21] при стаціонарному режимі (при постійній температурі) або нестаціонарному режимі (температура змінюється з часом).

Для визначення теплопровідності теплоізоляційного матеріалу рослинного походження при стаціонарному режимі пропонуються такі основні методи: охоронної гарячої пластини; концентричного циліндра; концентричної сфери; теплової дифузії та інші [21].

Метод охоронної гарячої пластини полягає в тому що між двома пластинами розміщують твердий зразок матеріалу. Одна пластина нагрівається, а інша охолоджується або нагрівається в меншій мірі. Температуру обох пластин вимірюють за допомогою термодпар, поки вона не набуде сталих величин на обох пластинах (рис. 2.3).

Для розрахунку теплопровідності матеріалу використовують стаціонарні температури, товщину зразка і величину теплового потоку. Перевагою цього методу є відносна простота вимірювання та ним можна визначати коефіцієнт теплопровідності органічних матеріалів рослинного походження.

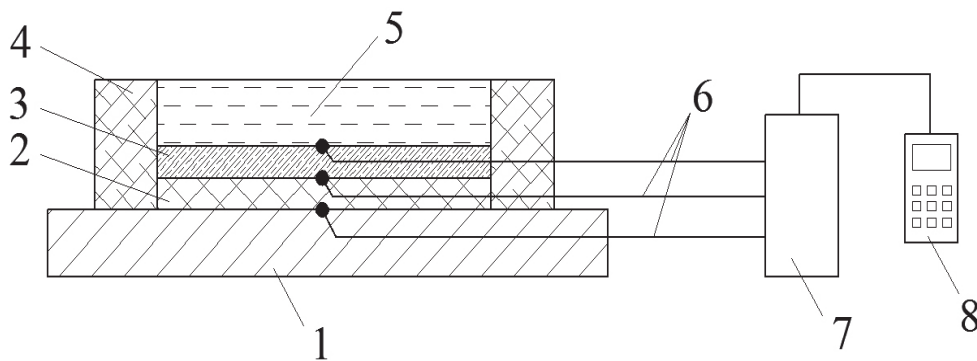


Рисунок 2.3 – Принципова схема вимірювального комплексу з гарячою пластиною [21]: 1 - джерело стаціонарного теплового потоку; 2 - шар матеріалу з відомою товщиною і коефіцієнтом теплопровідності (оргскло); 3 - шар теплоізолюючої фарби; 4 –теплоізолятор(пінопласт); 5 - «холодильник» (ємність з водою); 6 -термодпари між шарами; 7 - комутатор; 8 – вимірювальний прилад

Метод концентричного циліндра полягає в тому, що апарат склада-

ється з двох циліндрів, зібраних коаксіально. Зразок розміщують в кільцеподібному просторі між циліндрами. Внутрішній циліндр нагрівається за допомогою електричної мережі і охолоджується проточною водою. Температури вздовж висоти зразка вважаються однорідними і нехтують їх невеликою різницею. Матеріал зразка повинен бути правильно упакований, щоб уникнути будь-яких конвекцій між ним. Теплопровідність зразка матеріалу (λ) обчислюється за формулою [20]:

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln(R_2/R_1)}{2\pi \cdot \Delta T \cdot L}, \quad (2.2)$$

де: Q - кількість теплового потоку, Вт; L - товщина матеріалу зразка, розміщеного між циліндрами, м; ΔT - перепад температур в матеріалі; R_2 - радіус зовнішнього циліндра, м; R_1 - радіус внутрішнього циліндра, м.

Метод концентричної сфери полягає в тому, що апарат складається з двох концентричних тонких сферичних камер із зразком матеріалу, правильно заповненим всередині кільцевого простору. Внутрішня сфера нагрівається з використанням електроенергії, а зовнішній простір охолоджується водяною банею. Теплопровідність матеріалу визначається за формулою

$$\lambda = \frac{Q(R_2 - R_1)}{A_1 A_2 (T_2 - T_1)}, \quad (2.3)$$

де: Q - швидкість теплового потоку, мВт; A - область; T_1 , T_2 - температура; R , R_1 , R_2 – радіус сферичної камери, радіус зовнішньої та внутрішньої сфери, м.

Метод термічної дифузії є непрямий метод вимірювання теплопровідності. Теплопровідність розраховується з врахуванням таких властивостей матеріалів як питома теплоємність та щільність за формулою

$$\lambda = \alpha \rho C^0, \quad (2.4)$$

де: α - термічна дифузія матеріалу; ρ - щільність матеріалу, кг/м³; C^0 -

температура нагрівання до постійного тиску.

Експериментальний метод термічної дифузії належить до стаціонарних методів і зручний для вимірювання теплопровідності різноманітних матеріалів. Принципову схему вимірювального комплексу визначення експериментальним методом термічної дифузії теплопровідності наведено на рис. 2.4.



Рисунок 2.4 - Принципова схема вимірювального комплексу визначення теплопровідності методом термічної дифузії

Гаряча кругла плита діаметром 160 мм нагрівається електричним струмом. Гарячу пластину обладнано додатковою компенсаційною пластинною, яка служить для термостатування плити та має однакову з нею температуру. Температура в компенсаційних і охолоджуючих пластинках підтримується водою, яка проходить через два термостата. Для різних матеріалів потрібно регулювати належну інтенсивність нагрівання для отримання стабільного стану. Теплопровідність розраховується за формулою

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{S(\Delta t - o)}, \quad (2.5)$$

де Q - теплова величина гарячої пластини, Вт; d - середня товщина зразка, м; S - площа гарячої пластини, м²; Δt - тепловий градієнт між гарячою і холодною пластинною, К; o - корекція теплового градієнта втрат тепла в апараті.

У перехідному (нестационарному) режимі використовують такі методи вимірювання теплопровідності: джерела перехідних площин; гарячого дроту; лазерного спалаху; тривимірний; теплового відбиття випромінювання. Методи відрізняються технікою, розміром вибірки, часом тестування, параметрами вимірювання та методологією вимірювань.

Метод джерела перехідних площин ґрунтується на використанні плоского датчика і спеціальної математичної моделі, що описує теплопровідність. Використання електроніки дозволяє вимірювати коефіцієнт теплопровідності з діапазоном 0,01-500 Вт/м/К.

Техніка джерела перехідної площини зазвичай використовує дві половини зразків, між якими розміщено сенсор. Під час вимірювання постійний електричний струм проходить через провідну спіраль, збільшуючи температуру сенсора. Тепло, що генерується при нагріванні спіралі, розсіюється в зразку з обох сторін сенсора зі швидкістю, що залежить від теплофізичних характеристик матеріалу. За допомогою реєстрації температурно-часового відгуку в сенсорі можна розрахувати теплову дифузійність теплопровідності, а отже теплопровідність матеріалу.

Метод гарячого дроту полягає в тому, що нагрітий дріт вставляється в матеріал досліджуваного зразка. Тепло переходить радіально з дроту в зразок, зміна температури в дроті реєструється. Графік температури дроту від логарифму часу використовується для розрахунку теплопровідності за умови що щільність матеріалу і потужність теплового потоку, який згенеровано нагрітим дротом, відомі.

Метод лазерного спалаху використовується для вимірювання теплової дифузії тонкого диска в напрямку його товщини. Метод ґрунтується на вимірюванні підвищення температури на задній поверхні зразка тонкого диска, на передню поверхню якого подають короткий тепловий імпульс. При порівнянні отриманих значень з еталонним зразком можна обчислити питому теплоємність при відомій щільності матеріалу. На рис. 2.5 зображено принципову схему для визначення коефіцієнту теплопровідності даним способом. Теплопровідність визначають за формулою (2.1). Метод придатний для визначення коефіцієнту теплопровідності в різних матеріалах в широкому діапазоні температур (від -

120 °C до 2800 °C).

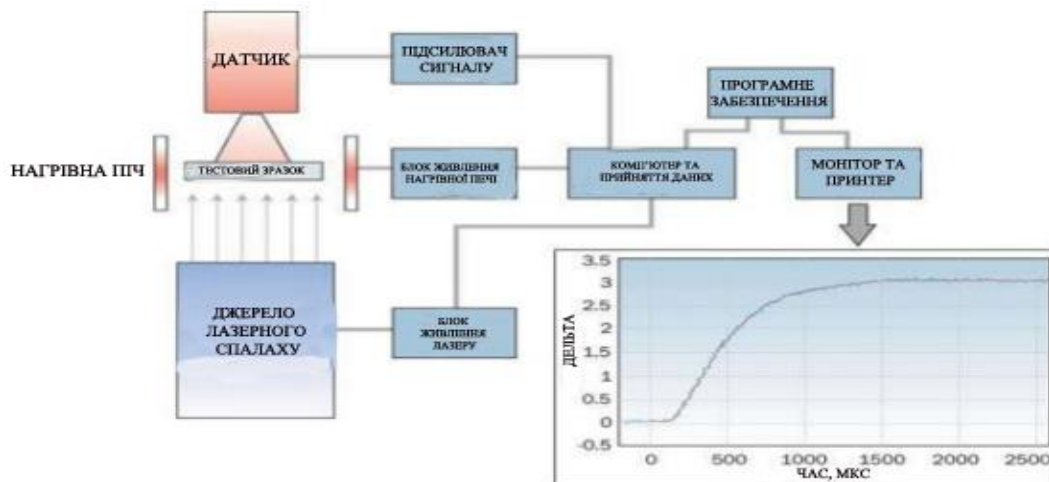


Рисунок 2.5 - Принципова схема вимірювання теплопровідності методом лазерного спалаху

Тривимірний метод передбачає використання тонкої металевої смужки, що нанесено на зразок та діє як джерело тепла. Нагрівач приводиться в дію змінним струмом, частотою ω , що призводить до коливання джерела тепла на частоті 2ω . За допомогою моніторингу напруги змінного струму, як функції від частоти змінного струму, можна визначити теплопровідність. Основними перевагами методу є мінімізація ефектів випромінювання і полегшення отримання температурної залежності теплопровідності.

Метод теплового відбиття випромінювання дозволяє визначити теплотехнічні параметри матеріалу, а саме теплопровідність. Цей метод може бути застосований головним чином до тонкоплівкових матеріалів, які мають різні властивості у порівнянні з аналогічними масивними матеріалами. Ідея методу полягає в тому, що після того як матеріал нагрівається, зміна коефіцієнта відбиття поверхні може бути використана для визначення теплопровідності.

2.3 Установка для дослідження теплопровідності теплоізоляційних матеріалів рослинного походження

Аналіз відомих методів дослідження теплопровідності матеріалів в стаціонарному та нестационарному режимах, конструктивних рішень та

відповідного обладнання [16-23] свідчить про необхідність удосконалення установки для дослідження теплопровідності теплоізоляційних матеріалів рослинного походження.

Авторами запропоновано принципову конструкцію установки для визначення теплопровідності теплоізоляційних матеріалів [24, 25, 26, 27]. Конструктивну схему установки та її окремих елементів наведено на рис. 2.6 та 2.7.

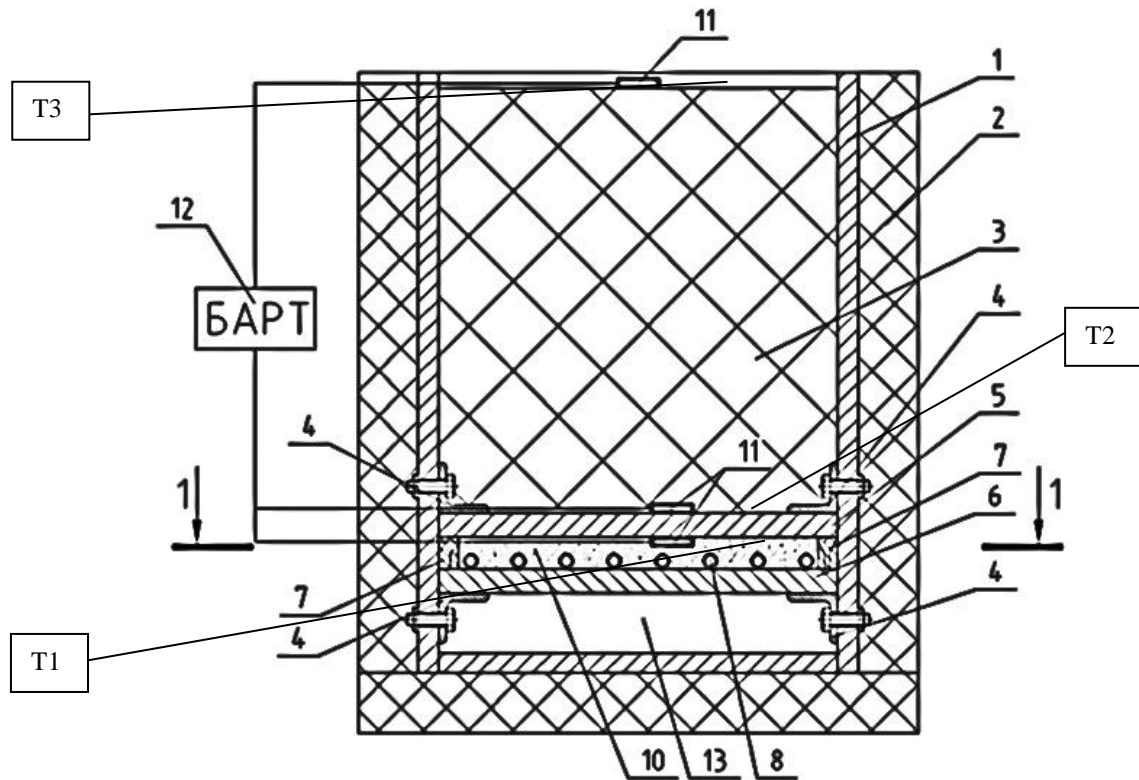


Рисунок 2.6 – Конструктивна схема установки для визначення теплопровідності теплоізоляційних матеріалів рослинного походження

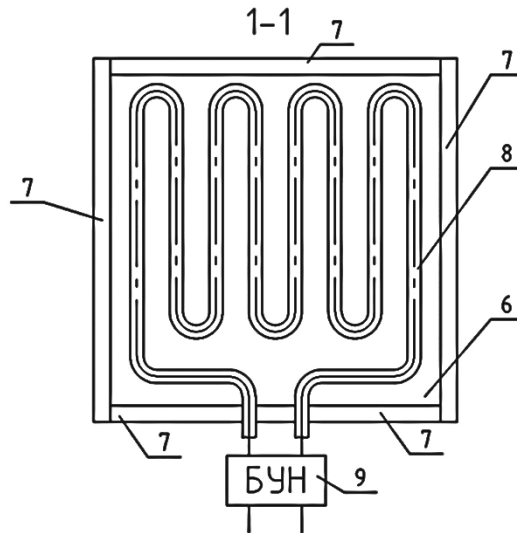


Рисунок 2.7 – Конструктивне виконання нагрівного елемента створення теплового потоку

Установка для визначення теплопровідності теплоізоляційних матеріалів (рис. 2.6) містить корпус 1, з теплоізольованими стінками 2. Внутрішній об'єм корпусу 1 створює пустотілу камеру для розміщення досліджуваного зразка матеріалу 3. Тепловий потік до матеріалу створюється нагрівним елементом, який прикріплено до стінок корпусу 1 фіксує елементами кріплення 4. Нагрівний елемент складається з верхньої 5 та нижньої 6 металеві пластини заданої товщини з відомим коефіцієнтом теплопровідності. Пластини закріплено фіксує елементами кріплення 7 по периметру нагрівного елемента. Задана товщина пластин нагрівного елемента 5 та 6 забезпечує гомогенний розподіл теплового потоку по площі поперечного перерізу досліджуваного зразка теплоізоляційного матеріалу 3. Внутрішній об'єм нагрівного елемента містить трубчатий електронагрівник (ТЕН) 8 відповідної конфігурації (рис. 2.7), температуру якого плавно можна змінювати за допомогою блока управління напруги (БУН) 9. ТЕН 8 розміщено та закріплено рівномірно по площі перерізу нижньої пластини нагрівного елемента 6, засипано кварцовим піском 10 для створення додаткового гомогенного розподілу теплового потоку по всьому перерізу досліджуваного зразка теплоізоляційного матеріалу 3.

Коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного матеріалу визначається за відомою формулою Фур'є для стаціонарного температурного режиму. Вхідною інформацією є перепад температур в характерних перерізах досліджуваного зразка теплоізоляційного матеріалу 3 з відомою площею поперечного перерізу. Через досліджуваний зразок проходить тепловий потік, що генерується нагрівним елементом через верхню металеву пластину 5. Температуру вимірюють за допомогою термоперетворювачів, з використанням термопар або датчиків температури 11. Дані температур всіх термоперетворювачів реєструються блоком автоматичної реєстрації температури (БАРТ) 12 (рис 2.8, 2.9).

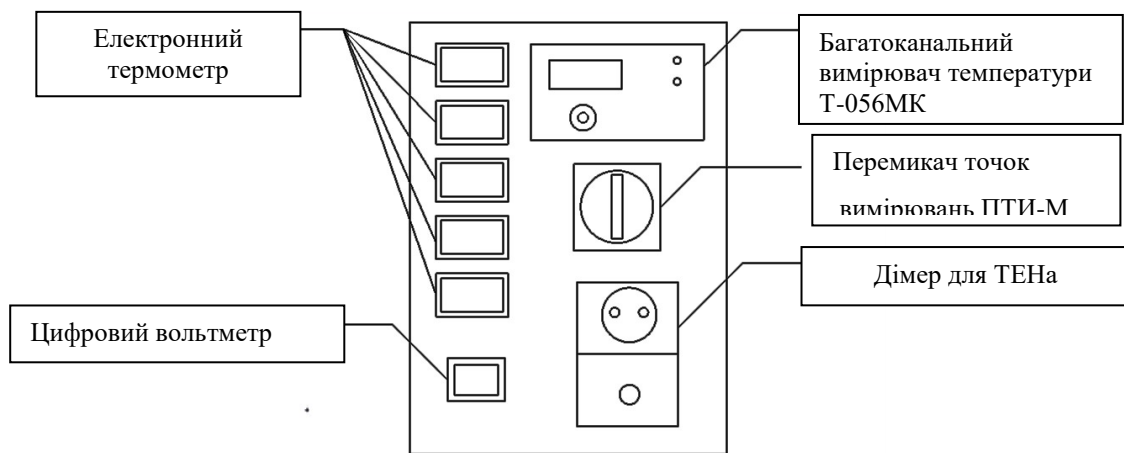


Рисунок 2.8 - Блок автоматичної реєстрації температури (БАРТ)



Рисунок 2.9 – Реалізація: БАРТ(зліва) та дослідний зразок спресованої соломи, що розміщено в корпусі установки (справа)

Блок автоматичної реєстрації температури (БАРТ) містить корпус розмірами 300 мм × 259 мм × 80 мм. В корпусі розміщено монтажну шину з хромель-копелевими термопарами, багатоканальний вимірювач температури Т-056МК, цифровий вольтметр, електронні термометри, перемикач точок вимірювання та дімер для ТЕНа.

Багатоканальний вимірювач температури Т-056МК, призначений для дистанційного вимірювання температури. Вимірювач здатний відображати температуру від одного до десяти датчиків температури DS18B20 на відстані до 100 метрів. Технічні характеристики: діапазон вимірюваної температури від -55,0 до 125 °С; похибка вимірювання температури 0,5 °С. (при додатковому коригуванні 0,1 °С); кількість каналів вимірювання від 1 до 10; напруга живлення DC 12 Вольт (допустимо від 7,5 до 20 Вольт); струм 30 мА; захист від перевищення живлення ε; довжина проводів, з'єднуючих прилад з датчиком в базовому варіанті 1,4 м; габаритні розміри приладу (Д × Ш × В): 78 мм × 21 мм × 13 мм; висота цифр індикатора приладу 14 мм.

Вольтметр V27D 2,5-30 В може використовуватися для контролю напруги в різних пристроях і приладах. Діапазон вимірюваної напруги від 2,5 В до 30 В. Значення вимірюваної напруги повинно бути 2,5 – 30 В постійного струму. Живлення вольтметра здійснюється від джерела вимірюваної напруги. Після підключення вольтметра до джерела напруги включиться LED дисплей і буде показувати поточне значення напруги з точністю до десятої частини вольта в режимі реального часу.

Електронний термометр ТРМ-10 призначений для вимірювання температури. Діапазон вимірювання температури: -50 ... +100 °С. Довжина виносного датчика температури - 1 метр. Живлення термометра здійснюється за допомогою двох батарей типу LR44. Цифровий термометр має чутливий датчик, похибка якого +, - 1 °С.

Перемикач точок вимірювання ПТІ-М призначений для почергового підключення до вимірювального приладу первинних вимірювальних перетворювачів - термоелектричних термометрів або термометрів опору. Підключення конкретного перетворювача проводиться поворотом рукоятки перемикача в необхідне положення, позначене цифрами на кришці. До перемикача можна підключити до 20 термоелектричних

термометрів або термоперетворювачів опору. Перемикач комутує електричні ланцюги постійного струму напруги 24 В при силі струму в кожному ланцюзі до 0,1 А і активному навантаженні.

Димер призначений для регулювання потужності активного і індуктивного навантаження ТЕНу.

Між нижньою площиною металеві пластини 6 та корпусом 1 установки для визначення теплопровідності теплоізолювальних матеріалів міститься повітряний прошарок 13 для мінімізації тепловтрат зі сторони нагрівного елемента.

Установка працює наступним чином. В пустотілій камері корпусу 1 розміщують досліджуваній зразок теплоізоляційного матеріалу 3. В характерних перерізах досліджуваного зразка розміщують термоперетворювачі 11 та з'єднують їх з блоком автоматичної реєстрації температури БАРТ12. Через блок управління напруги БУН 9 підводять електричний струм до трубчатого електронагрівника 8. Тепловий потік від трубчатого електронагрівника 8 передається кварцовому піску 10, верхній 5 та нижній 6 металевій пластині нагрівного елемента, які акумулюють теплову енергію. Акумульований тепловий потік гомогенно через верхню металеву пластину 5 нагрівного елемента надходить до теплої сторони досліджуваного зразка теплоізоляційного матеріалу 3. Термоперетворювачі 11, що розміщені в характерних перерізах досліджуваного зразка теплоізоляційного матеріалу 3, передають значення характеристик теплового потоку в БАРТ 12. За допомогою БУН 9 ТЕН-а 8 варіюють величинами теплового потоку, що надходить від теплої до холодної сторони досліджуваного зразка теплоізоляційного матеріалу 3. Визначення коефіцієнту теплопровідності виконують при досягненні сталого перепаду температур в характерних перерізах досліджуваного теплоізоляційного матеріалу 3.

Вимірювання температури виконується за допомогою хромель-копелевих (ХК) термопар типу L з дротами діаметром 0,25 мм, які мають індивідуальне градування.

Оскільки діапазон вимірювання температури знаходиться в межах 0-110°C, термопари градуються за методом реперних точок з екстраполяцією. Причому за реперні точки приймається потрібна точка кипіння

води і температура насичення води, з врахуванням барометричного тиску. Барометричний тиск вимірюється барометром БАММ-1. Глибина занурення термопар 200 мм.

Холодний спай термостатується при температурі 0 °С.

Для контролю температури при градуванні застосовується термопари ТПП типу S другого розряду.

В якості вимірювального приладу використовується комбінований цифровий прилад Щ300 на межі вимірювання 10 мВ, з вхідним опором $R > 10 \text{ МОм}$.

2.4 Експериментальні дослідження теплопровідності соломи, як теплоізоляційного матеріалу рослинного походження

Експериментальне дослідження залежності теплопровідності соломи від її щільності та вологості передбачає виготовлення зразків солом'яних блоків. Для цього сконструйовано та виготовлено установку для пресування соломи у експериментальні зразки з заданою щільністю та вологістю.

Конструктивні особливості установки для проведення пресування соломи наведено на рис. 2.10. Корпус установки який являє собою короб, який виготовлено з вологостійкої ламінованої фанери товщиною 12мм, з розмірами 282 мм × 282 мм × 800 мм. Ребра сторін короба укріплено металевими кутиками. Для діставання солом'яного блоку збоку корпусу короба зроблено дверцята з металевим засувом. Для обв'язки тюка зроблено вертикальні прорізи в бокових стінках корпусу.

Пресувальний шток висотою 950 мм складається з чотирьох стінок, кришки, чотирьох ребер жорсткості та подвійного днища. В днищі є прорізи для протягування через них мотузки для обв'язування солом'яних блоків.

Процес ущільнення тюків починається з визначення відповідної маси соломи для формування блоку певної щільності.

Експериментальні дослідження проведено з соломи пшениці. Кількість маси соломи, яка завантажується в короб пресувальної установки, визначається за формулою щільності

$$m_3 = \rho_3 V_3, \quad (2.6)$$

де ρ_3 – задана щільність зразка соломи, кг/м³; m_3 – маса зразка соломи, кг; V_3 - об'єм зразка соломи, який визначено через об'єм необхідної висоти паралелепіпеду при пресуванні солом'яного блока, м³.



Рисунок 2.10 – Установка для пресування солом'яних тюків, загальний вигляд

У табл. 2.2 наведено масу зразків для діапазону досліджуваних параметрів щільності солом'яних блоків. В залежності від щільності спресованих солом'яних блоків маса для зразка об'ємом 0,003125 м³ змінюється від 0,187 кг для щільності 60 кг/м³ до 0,50 кг для щільності 160 кг/м³.

Перед виготовленням основних серій зразків досліджено солом'яні блоки різної висоти, від 0,055 – 0,200 м. Експериментальним шляхом виявлено, що найдоцільнішими для проведення дослідження є солом'яні блоки висотою 0,055 м. В діапазоні отриманих щільностей 60-160 кг/м³ для кожного значення пресували серію необхідної кількості

зразків з різною вологістю. Додаткова вологість надається соломі за допомогою розпилювача води та контролюється за допомогою вологоміра ТК 100. Фотофіксація процесу пресування зразків соломи наведено на рис. 2.11.



Рисунок 2.11 - Процес пресування солом'яних тюків: а) відмітка потрібної висоти тюка на корпусі установки; б) пресування з передачею зусилля через домкрат та опорну балку; в) виймання готового зразка тюка після завершення пресування

Таблиця 2.2 – Залежність маси зразків солом'яних блоків від щільності соломи

| Щільність, кг/м ³ | Об'єм, м ³ | Маса, кг |
|------------------------------|-----------------------|----------|
| 60 | 0,003125 | 0,187 |
| 80 | 0,003125 | 0,250 |
| 100 | 0,003125 | 0,312 |
| 120 | 0,003125 | 0,375 |
| 140 | 0,003125 | 0,437 |
| 160 | 0,003125 | 0,500 |

Серія зразків №1 була без додаткового зволоження, її виміряна вологоміром вологість складала 9,4%. Зразки серії №2 зволожували до 20%, а зразки серії №3 до – 30%.

Вміст додаткової вологи в зразках солом'яних блоків серії 2 та 3 визначається за формулою

$$m_2 = \frac{W}{100} \cdot m_1 + m_1, \quad (2.7)$$

де W – відносна вологість, %; m_2 – маса вологого зразка, кг; m_1 – маса сухого зразка, кг.

У табл. 2.3 наведено маси зволжених зразків солом'яних блоків для серії 2 та 3 для досліджуваного діапазону щільностей.

Таблиця 2.3 – Фактична маса зразків для проведення експериментальних досліджень

| Маса зразків, кг | | | |
|------------------------------|---------|---------|---------|
| Щільність, кг/м ³ | Серія 1 | Серія 2 | Серія 3 |
| 60 | 0,187 | 0,224 | 0,243 |
| 80 | 0,250 | 0,300 | 0,325 |
| 100 | 0,312 | 0,374 | 0,405 |
| 120 | 0,375 | 0,450 | 0,487 |
| 140 | 0,437 | 0,524 | 0,568 |
| 160 | 0,500 | 0,600 | 0,650 |

Процес пресування експериментальних солом'яних зразків виконується наступним чином (рис. 2.10 та 2.11):

- на спеціальні дротяні шпиці нанизують поліпропіленову мотузку та протягують через спеціальні прорізи знизу в тілі коробу установки;

- в короб завантажується необхідна кількість соломи. Після завантаження здійснюють тиск на солом'яний пресувальний шток за допомогою домкрату, що передає зусилля через опорну частину консольної балки (рис. 2.11а та 2.11б);

- процес ущільнення соломи виконується до тих пір, поки опорна плита плунжера не досягне потрібної позначки на тілі корпусу установки. При досягненні цієї позначки припиняється пресування. Спресований солом'яний блок обв'язується мотузкою та виймається з установки (рис. 2.11в);

- для створення додаткової жорсткості кожний солом'яний блок після виймання з установки додатково обв'язується мотузкою в перпендикулярному напрямку до основної обв'язки. На цьому виготовлення експериментального солом'яного блоку завершується (рис. 2.12).



Рисунок 2.12 - Експериментальний солом'яний блок щільністю 160 кг/м³

Експериментальне визначення коефіцієнту теплопровідності солом'яних блоків заданого діапазону щільностей починається з нагрівання установки за допомогою ТЕН та доведення температури верхньої та нижньої частини пластини до сталого значення (рис. 2.6). Для визначення температури солом'яного зразка використовуються три канала збору даних: температурні датчики DS18B20, термометри ТРМ10 та хромель-копелеві термопари. Дослід повторюється з серіями 2 і 3 для кожної щільності солом'яних блоків.

Процес стабілізації температури в заданих точках Т1,Т2,Т3 триває від 5 до 6 годин.

Коефіцієнт теплопровідності обчислюється за формулою Фур'є:

$$Q = \frac{\Delta t \cdot S}{\frac{\delta}{\lambda}}, \quad (2.3)$$

де Q – тепловий потік, Вт; $\Delta t = t_1 - t_2$ – різниця температур в характерних точках після її стабілізації, °С; S – площа поверхні теплообміну (площа поверхні пластини), м²; δ – товщина елемента, м; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт / (м·°С).

Для визначення теплового потоку, який проходив через верхню пластину нагрівного елемента, що виконана зі сталі Ст3 товщиною 0,012 м та площею 0,0625 м², використовується усереднений коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{Ст3} = 47$ (Вт/м·К) [15].

Зразки солом'яних блоків мають поперечний переріз 0,25х0,25 м з висотою 0,050-0,055 м.

Знаючи величину теплового потоку, що проходить через верхню пластину нагрівного елемента, визначається коефіцієнт теплопровідності солом'яного зразка за формулою (2.3).

Результати обчислення величини коефіцієнту теплопровідності при різних значеннях вологості та густини зразків соломи наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Основні параметри експериментального дослідження теплопровідності соломи

| Критерії | Густина зразка ρ , кг/м ³ | Товщина зразка со- лом'яного блока δ , м | Температура горя- чої сторони метале- вої пластини T1, °С | Температура горя- чої сторони метале- вої пластини T2, °С | Температура холод- ної сторони зразка соломи T3, °С | Вологість зразку W, % | Коефіцієнт теплоп- ровідності λ , Вт/м°К |
|---|--|---|---|---|---|--------------------------|--|
| Серія 1 (без зволоження) при значенні вологості 9,4% | 60 | 0,05 | 110,00 | 109,97 | 17,30 | 9,20 | 0,051 |
| | 80 | 0,055 | 109,40 | 109,37 | 17,25 | 9,14 | 0,062 |
| | 100 | 0,054 | 107,50 | 107,46 | 16,47 | 9,28 | 0,070 |
| | 120 | 0,052 | 108,46 | 108,41 | 16,80 | 9,40 | 0,075 |
| | 140 | 0,053 | 108,35 | 108,31 | 16,53 | 9,37 | 0,077 |
| | 160 | 0,052 | 109,99 | 109,95 | 17,30 | 9,34 | 0,080 |
| Серія 2 (зволо- ження до 20%) | 60 | 0,05 | 110,00 | 109,97 | 17,30 | 19,70 | 0,060 |
| | 80 | 0,055 | 107,00 | 106,97 | 17,23 | 19,62 | 0,065 |
| | 100 | 0,054 | 107,00 | 106,97 | 17,00 | 19,57 | 0,070 |

| | | | | | | | |
|-----------------------------|-----|-------|--------|--------|-------|-------|-------|
| | 120 | 0,052 | 100,04 | 100,00 | 16,00 | 19,68 | 0,075 |
| | 140 | 0,053 | 105,00 | 104,96 | 16,00 | 19,92 | 0,078 |
| | 160 | 0,052 | 106,50 | 106,46 | 16,00 | 19,97 | 0,080 |
| Серія 3 (зволоження до 30%) | 60 | 0,05 | 106,50 | 106,45 | 16,50 | 29,67 | 0,085 |
| | 80 | 0,055 | 107,40 | 107,36 | 16,50 | 29,78 | 0,087 |
| | 100 | 0,054 | 105,56 | 105,52 | 17,20 | 29,94 | 0,092 |
| | 120 | 0,052 | 106,56 | 106,51 | 16,50 | 29,81 | 0,102 |
| | 140 | 0,053 | 107,53 | 107,47 | 17,00 | 29,74 | 0,110 |
| | 160 | 0,052 | 100,06 | 100,00 | 17,00 | 29,87 | 0,115 |

Графічний аналіз результатів експериментальних досліджень залежності теплопровідності від щільності для солом'яних блоків різних серій зволоження наведено на рис. 2.13.

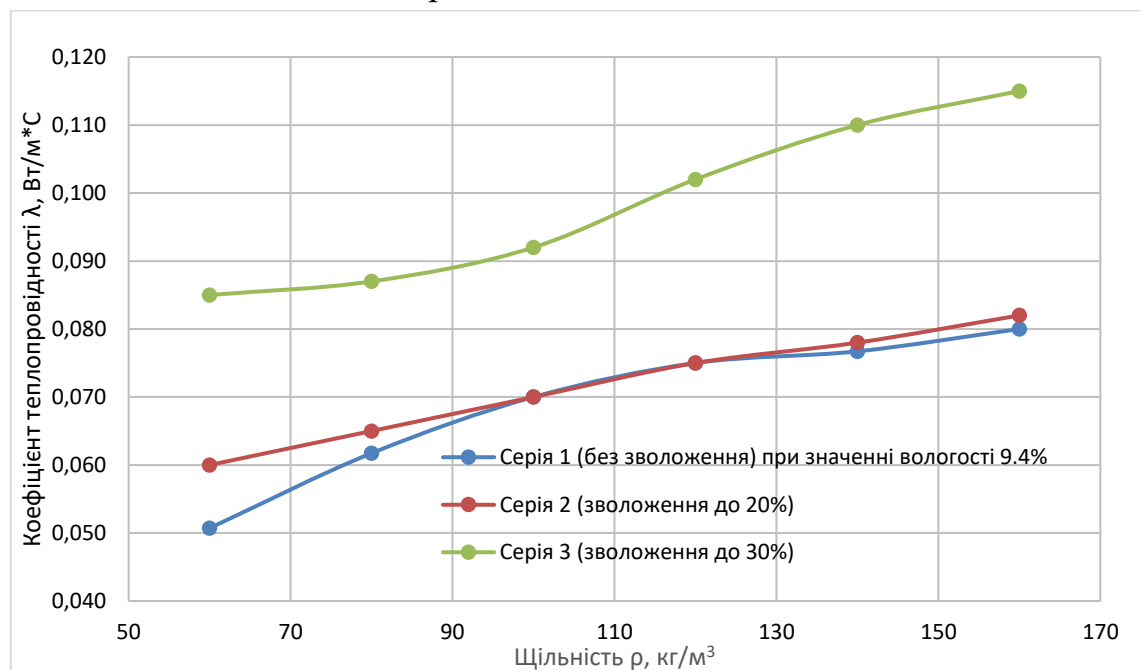


Рисунок 2.13 - Залежність теплопровідності спресованої соломи від щільності та вологості

Аналіз отриманих експериментальних даних (рис.2.12) свідчить про однозначний вплив щільності та вологості на величину коефіцієнта теплопровідності спресованого солом'яного блока. При цьому приріст щільності соломи несуттєво впливає на значення коефіцієнту її теплопровідності. Вміст води, що є в соломі (серія 2 та серія 3 зразків), чинить більший вплив на зміну величини коефіцієнта теплопровідності соломи (табл. 2.4). Так, при додатковому зволоженні

зразків солом'яного блока до 30% (серія 3) максимальне значення коефіцієнту теплопровідності соломи буде 0,115 Вт/м·К. Це на 30 % більше від значення коефіцієнту теплопровідності в серії 1 (із усередненим значенням вологості 9,4%). Збільшення теплопровідності зволоженої соломи обумовлено тим, що теплопровідність води значно більше від теплопровідності соломи.

Графічну інтерпретацію отриманих експериментальних даних зв'язку між теплопровідністю та щільністю солом'яних блоків при порівнянні з даними інших науковців наведено на рис. 2.14.

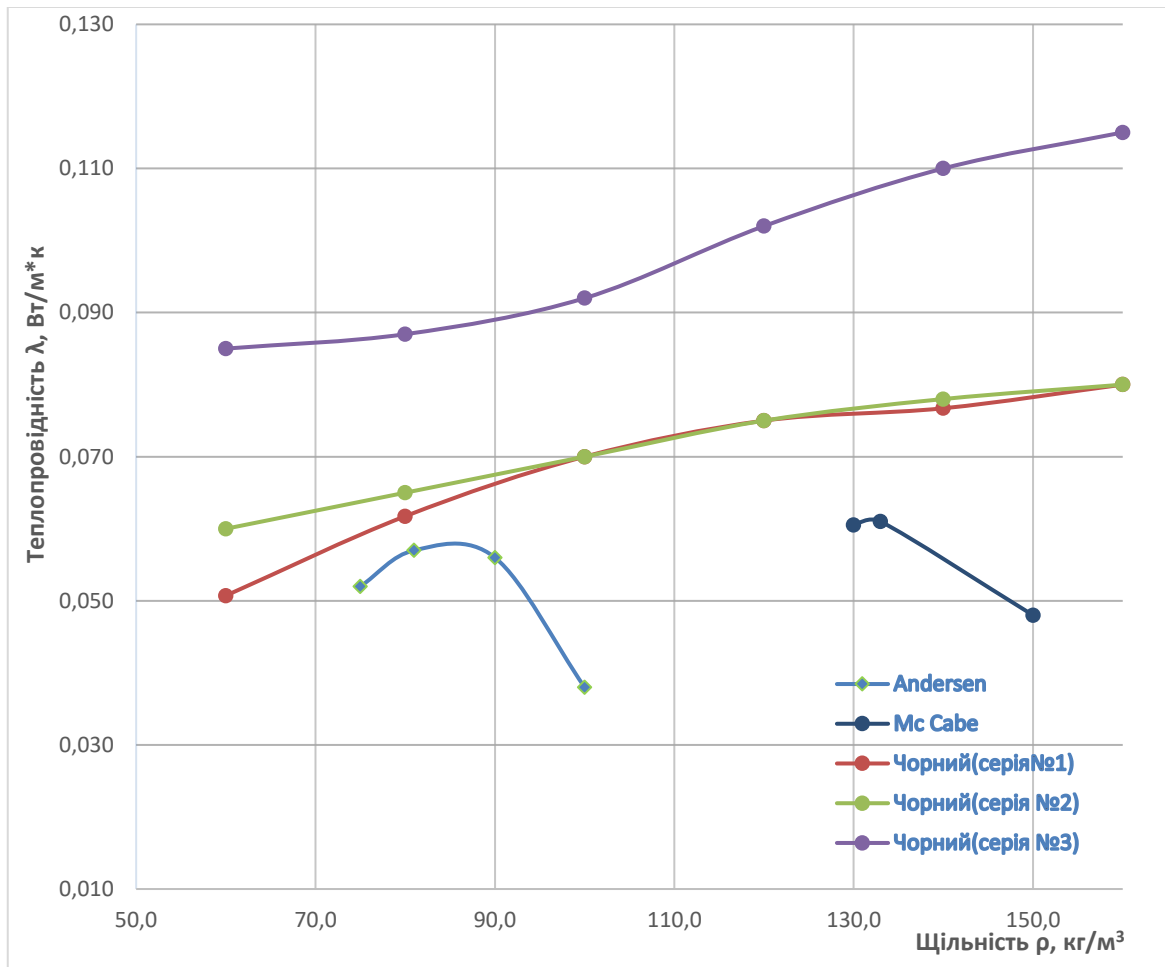


Рисунок 2.14 – Зв'язок між теплопровідністю та щільністю солом'яного блоку за дослідними даними та даними інших авторів при розташуванні зразків стебел соломи перпендикулярно до теплового потоку

Статистичний аналіз експериментальних даних дослідження залежності між теплопровідністю та щільністю солом'яних блоків виконано за допомогою програми Excel та наведено у табл. 2.4

Таблиця 2.4 – Ступінь тісноти взаємозв'язку між теплопровідністю та щільністю соломи

| Автор | Коефіцієнт кореляції, r | Коефіцієнт детермінації, R |
|------------------|-------------------------|----------------------------|
| Andersen [2] | -0,706 | 0,498 |
| McCabe [1] | -0,985 | 0,970 |
| Автор (серія №1) | 0,955 | 0,911 |
| Автор (серія №2) | 0,988 | 0,977 |
| Автор (серія №2) | 0,984 | 0,969 |

Аналіз даних табл. 2.4 свідчить про тісний кореляційний зв'язок між теплопровідністю та щільністю соломи, що збігається з результатами досліджень інших авторів [2,3]. Отримані експериментальні дослідження підтверджують висновки про однозначний домінуючий вплив щільності соломи на її коефіцієнт теплопровідності. Щільність зумовлює теплопровідність в діапазоні від 23,2% до 97%, що є неоднозначним показником для прогнозування фізико-механічних характеристик природного утеплювача соломи як теплоізоляційного матеріалу при будівництві енергоефективних будівель.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ ДО 2 РОЗДІЛУ

1. Філоненко О. І., Юрін О. І. Будівельна теплофізика огороджувальних конструкцій будівель: навч. посіб. Полтава: ПНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2015. – 328 с.
2. McCabe, J. Thermal Resistivity of Straw Bales for Construction. Master's Thesis, University of Arizona, Tucson, AZ, USA, 1993.
3. Andersen, B.M.; Munch-Andersen, J. Halmballer og Muslinger som Isoleringmaterialer; Report 2001-06-21; Statens Byggeforskningsinstitut: Copenhagen, Denmark, 2001.
4. Shea A., Wall K., Walker P. Evaluation of the thermal performance of an innovative prefabricated natural plant fibre building system. Building Services Engineering Research and Technology. 2013. Vol. 34, No. 4. P. 369-380.
5. Prüfbericht. Wärmeleitfähigkeit nach EN 12667; Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V.: München, Germany, 2010.

6. Deutsches Institut für Bautechnik (DIB). URL: https://www.dibt.de/index_eng.html (Last accessed:14.05.2018).
7. Dubois, S.; Lebeau, F. Design, Construction and Validation of a Guarded Hot Plate Apparatus for Thermal Conductivity Measurement of High Thickness Crop-Based Specimens. *Mater. Struct.* 2015, 48, 407–421.
8. Douzane, O.; Promis, G.; Roucoult, J.-M.; Le, A.-D.T.; Langlet, T. Hygrothermal performance of a straw bale building: In situ and laboratory investigations. *J. Build. Eng.* 2016, 8, 91–98.
9. Conti, L.; Barbari, M.; Monti, M. Steady-State Thermal Properties of Rectangular Straw-Bales (RSB) for Building. *Buildings* 2016, 6, 44.
10. Wei, K.; Lv, C.; Chen, M.; Zhou, X.; Dai, Z.; Shen, D. Development and performance evaluation of a new thermal insulation material from rice straw using high frequency hot-pressing. *Energy Build.* 2015, 87, 116–122.
11. Grelat, A. Using Sustainable Materials as Walling for Individual Housing With Wood Structure; Final report; Centre D’expertise du Batiment et des Travaux Public: Saint-Remy-Les-Chevreuse, France, 2004.
12. Vincas Gurskis, Rytis Skominas. Investigation of physical and mechanical properties of straw as a building material, Latvia 2014.
13. Palumbo, M.; Lacasta, A.M.; Holcroft, N.; Shea, A.; Walker, P. Determination of hygrothermal parameters of experimental and commercial bio-based insulation materials. *Constr. Build. Mater.* 2016, 124, 269–275.
14. Семко О. В., Філоненко О. І., Панченко С. П., Мякий С. І. Спорудження малоповерхових житлових будинків із солом’яних блоків та визначення їх теплотехнічних характеристик. *Вісник Придніпр. держ. академ. буд. та арх. Дніпро: ПААТ*, 2013, №8. – с. 47-52.
15. F. D’alessandro, F. Bianchi, G. Baldinelli, A. Rotili, S. Schiavoni: *Journal of Building Engineering: Italy* 2017 - 2-3 p., 26 p.
16. Будівельна теплофізика. Курс лекцій для студентів усіх форм навчання будівельних спеціальностей. Укл. Маляренко В. А., Герасимова О. М., Малєєв О. І. Харків, ХНАМГ, 2007. – 100 с.

17. Маляренко В. А. Основи теплофізики будівель і енергозбереження. – Харків: - САГА, 2006.
18. Калінчак В. В., Орловська С. Г., Черненко О. С. Фізика теплопровідності та експериментальні методи визначення коефіцієнта теплопровідності. Одеса, 2012, 52 с.
URL:<http://fs.onu.edu.ua/clients/client11/web11/metod/fiz/teproprov.pdf> (дата звернення: 20.02.2021).
19. Теоретические основы теплофизики. Теплотехнический эксперимент. Справочник / Под общ. ред. В. Л. Григорьева, В. М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с. – (Теплоэнергетика и теплотехника, Кп. 2).
20. ДСТУ Б В.2.6-101.2010. Конструкції будинків і споруд. Метод визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій / Наук. стандарт України. – Вид. офіц. – [Уведено вперше, чинний від 01.10.2010 р.]. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. – 53 с.
21. Фаренюк Г. Г. Методи експериментального визначення показників теплової надійності конструкцій фасадної ізоляції. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. К.: 2010. Вип. 36, с. 76-83.
22. Спосіб визначення коефіцієнта теплопровідності для піностиролу: пат. 28093 Україна: МПК G01N 25/18, №u200707850; заявл. 12.07.2007; опубл. 26.11.2007, Бюл. №11, 3 с.
23. Риндюк С. В. Метод визначення теплопровідності будівельних матеріалів та виробів: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.23.05 / Вінниця, 2018, 18 с.
24. Бікс Ю. С., Чорний П. П. Лабораторна установка для дослідження впливу щільності солом'яного блоку на його теплотехнічні характеристики. Інноваційні технології в будівництві: зб. матеріалів Міжнар. наук.-техн. конф., м. Вінниця, 13-15 листопада 2018 р., Вінниця, ВНТУ, 2018, с. 64-66.
25. Установка для визначення теплопровідності будівельних матеріалів: пат. 141390 Україна: МПК G01N 25/18, №u201908718; заявл. 19.07.2019; опубл. 10.04.2020, Бюл. №7, 5 с.

- 26.Лабораторна техніка URL: <http://proflab.com.ua/produkt/product-details/444-pribory-itp-mg4-100-i-itp-mg4-250.html> (дата звернення 12.10.2018)
- 27.Каталог товарів: прилади для вимірювання теплопровідності URL: <https://prom.ua/p265239000-izmeritel-teploprovodnosti-its.html> (дата звернення 12.10.2018)

РОЗДІЛ 3 БАГАТОФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПОТЕНЦІАЛУ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ БІОСФЕРОСУМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1 Моделювання надійності забезпечення ефективності теплоізоляційних матеріалів рослинного походження

3.1.1 Методи оцінки надійності забезпечення ефективності матеріалів при влаштуванні теплоізоляційної оболонки будівель

Аналіз літературних джерел [1-10] свідчить, що однією із причин незначного використання виробів із соломи є недостатність практичного досвіду при влаштуванні теплоізоляційної оболонки будівель. На сьогодні відсутня методологія оцінювання надійності забезпечення енергоефективності будівельних виробів із соломи при влаштуванні теплоізоляційної оболонки. Тому розроблення математичної моделі надійності забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів із соломи з використанням відповідного математичного апарату є актуальною проблемою.

Реалізація цієї проблеми потребує розв'язання таких задач

- Ієрархічної класифікації кількісних та якісних факторів впливу на надійність забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних матеріалів із соломи;
- Розроблення математичної моделі оцінювання надійності забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних матеріалів із соломи за допомогою математичного апарату, який дозволить врахувати кількісні та якісні фактори впливу на ефективність теплоізоляційних матеріалів огорожувальних конструкцій будівель.

При оцінюванні надійності багатфакторних систем використовують структурно-імовірнісні моделі. Ці моделі вимагають наявності статистичної вибірки та достовірної інформації про розподіл показників надійності. Для аналізу видів, наслідків та інтенсивності відмов, як показника надійності, використовують такі методи: рівномірного розподілу надійності; вагових коефіцієнтів; невизначених множників Лагранжа; врахування впливу факторів на надійність; матричний метод розрахунку надійності; метод Дельфі; метод статистичного моделювання тощо [2].

Методи оцінки надійності конструктивних елементів будівель

вибирають за такими ознаками: залежно від життєвого циклу об'єкту та від вибраної моделі надійності, за критеріями відмов, якими можуть бути теплофізичні та екологічні фактори впливу [4,7].

Надійність забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів визначається імовірністю безвідмовного стану їх комплексних параметрів із забезпечення нормативного мікроклімату в приміщеннях протягом життєвого циклу проекту [4,7]

$$R(t) = 1 - F(t) = P(t \leq T), \quad (3.1)$$

де $R(t)$ – імовірність безвідмовного стану комплексних параметрів теплоізоляційних будівельних виробів,

t – час імовірності втрати нормативних параметрів будівельних виробів,

$F(t)$ – імовірність втрати нормативних параметрів будівельних виробів,

P – імовірність відмови нормативного стану комплексних параметрів теплоізоляційних будівельних виробів,

T – значення критерію, що характеризує безвідмовний стан.

Моделювання надійності забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів із соломи з використанням залежності (3.1) потребує значної бази експериментальних даних. Крім того, комплексні параметри теплоізоляційних будівельних виробів із соломи характеризуються кількісними та якісними факторами впливу на їх значення.

Для ідентифікації складних нелінійних закономірностей в сучасних інтелектуальних технологіях використовуються логіко-лінгвістичні моделі [2,11]. В цих моделях засоби обробки інформації ґрунтуються на логіці, а експериментальні дані представляються в лінгвістичній формі. Лінгвістичною змінною є змінна, значення якої є слово. Терм-множиною є множина цих можливих значень лінгвістичних значень змінної. Нечітким висновком називається апроксимація залежності $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ за допомогою нечітких правил «ЯКЩО-ТО» та нечітких логічних операцій.

Нечітка множина, за допомогою якої формалізується терм F , є сукупність параметрів [11]

$$F = \frac{\mu_F(u_1)}{(u_1)} + \frac{\mu_F(u_2)}{(u_2)} + \dots + \frac{\mu_F(u_n)}{(u_n)}, \quad (3.2)$$

де (u_1, u_2, \dots, u_n) – універсальна множина U , на якій задається нечітка множина $F \in U$; $\mu_F(u_i)$ – ступінь належності елемента $u_i \in U$ до нечіткої множини F .

Логічний висновок між причинами та наслідком описується системою нечітких логічних висловлювань відповідно:

до операції \min

$$\mu_C(u) = \mu_A(u) \wedge \mu_B(u), \quad (3.3)$$

до операції \max

$$\mu_D(u) = \mu_A(u) \vee \mu_B(u). \quad (3.4)$$

Нечіткі логічні операції $TA(\wedge)$, $ABO(\vee)$ виконуються з дотриманням правил:

$$\mu_{A \wedge B} = \min(\mu_A(u), \mu_B(u)), \quad (3.5)$$

$$\mu_{A \vee B} = \max(\mu_A(u), \mu_B(u)). \quad (3.6)$$

Правило розподілу ступенів належності за умови нормування $(\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n) = 1$ задається у вигляді співвідношення

$$\frac{\mu_1}{r_1} = \frac{\mu_2}{r_2} = \dots = \frac{\mu_n}{r_n}, \quad (3.7)$$

де $r_1 = r_F(u_1), \mu_n = \mu_F(u_n), i = 1 = 1, n$.

Ступінь належності $\mu_n(u_n)$ елементів $u_n \in (U)$ до нечіткого терму визначають за відносними оцінками рангів $r_i/r_{ij} = a_{ij}, I, j = 1, n$, що створюють матрицю

$$A = \begin{bmatrix} 1 & r_2 & r_3 & \dots & r_n \\ r_1 & r_1 & r_1 & \dots & r_1 \\ r_1 & 1 & r_1 & \dots & r_n \\ r_2 & r_2 & r_2 & \dots & r_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_1 & r_2 & r_3 & \dots & 1 \\ r_n & r_n & r_n & \dots & r_n \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

За відомими елементами рядки матриці (3.8) обчислюють елементи всіх інших рядків. Для експертної оцінки елементів матриці (3.8) використовують дев'ятибальну шкалу Сааті.

Техніка нечіткого логічного висновку дозволяє отримати показник ризику при оцінюванні надійності забезпечення ефективності теплоізоляційних матеріалів. Для переходу від отриманих нечітких множин до кількісної оцінки виконують процедуру дефазифікації, тобто перетворення нечіткої інформації в чітку форму, яка характеризує ефективність матеріалів при влаштуванні теплоізоляційної оболонки будівель.

3.1.2 Моделювання надійності забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів із соломи з використанням лінгвістичних змінних

В роботі [8] наведено ієрархічну класифікацію за кількісними та якісними теплофізичними, фізико-механічними й показниками довговічності як факторами, що характеризують надійність забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів із соломи для огорожувальних стінових конструкцій. З врахуванням результатів досліджень [8] структурну модель ієрархічних співвідношень між лінгвістичними змінними, що описують відповідно теплофізичні, фізико-механічні та показники довговічності як факторів впливу на надійність забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів із соломи, представлено у вигляді дерева логічного висновку (рис. 1). Корінь дерева логічного висновку відповідає показнику надійності забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів із застосуванням соломи, а всячі вершини – кількісні та якісні теплофізичні, фізико-механічні й показники довговічності як лінгвістичні змінні.

Відповідно до принципу лінгвістичних змінних причинно-наслідкові зв'язки між факторами, що впливають на параметри моделювання надійності забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів із соломи, описуються за допомогою нечітких термів [2,8]. Якісний нечіткий терм як лінгвістична змінна визначається словом, що характеризує кількісні вирази «Низька» (Н), «Нижче середньої» (НС), «Середня» (С), «Вище середньої» (ВС) та «Висока» (В). За допомогою нечітких термів створюється експертні нечіткі бази знань, які характеризують зв'язки між вхідними та вихідними змінними.

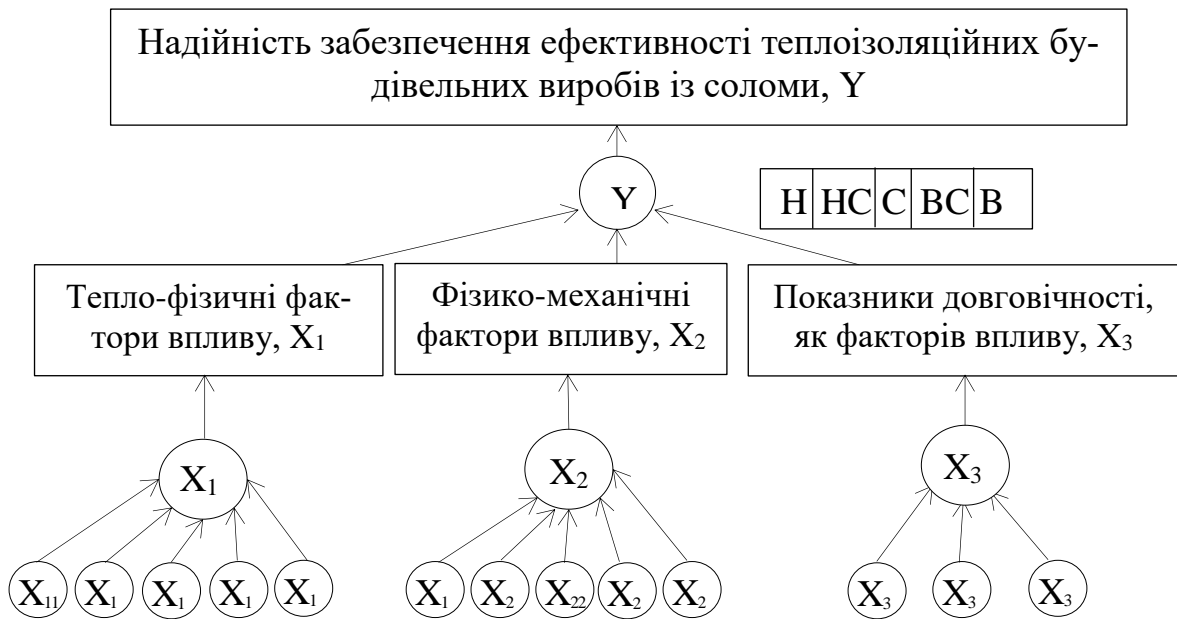


Рисунок 3.1 – Дерево логічного висновку ієрархічних зв'язків факторів, що визначають надійність забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів із соломи

Надійність забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів з соломи для огорожувальних стінових конструкцій відповідно до досліджень [9] та дерева логічного висновку (рис. 3.1) на системному рівні, як лінгвістичну змінну (ЛЗ) Y , представлено співвідношенням

$$Y = f(X_1, X_2, X_3), \quad (3.9)$$

де X_1, X_2, X_3 – лінгвістичні змінні, що описують відповідно теплофізичні, фізико-механічні та показники довговічності як факторів впливу на

надійність забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів із соломи.

Змістовна інтерпретація факторів, що впливають на надійність забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів із соломи, та відповідні множини лінгвістичних оцінок описано відповідними співвідношеннями (3.10, 3.11, 3.12).

Лінгвістичну змінну, що описує теплофізичні фактори впливу на надійність забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів із соломи, може бути подана співвідношенням

$$X_1 = f(X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}), \quad (3.10)$$

де X_{11} – питома теплоємність теплоізоляційного будівельного виробу визначено на універсальній множині $U(X_{11})=(0,06;0,08;0,10)$ (кДж/(кгм)). Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною $T(X_{11})=<$ низька, середня, висока $>$;

X_{12} – теплопровідність теплоізоляційного будівельного виробу визначено на універсальній множині $U(X_{12})=(0,07; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25)$ (Вт/м²К). Лінгвістична змінна цього фактора задається терм-множиною $T(X_{12})=<$ низька, нижче середньої, середня, вище середньої, висока $>$;

X_{13} – коефіцієнт теплосасвоєння теплоізоляційного матеріалу будівельного виробу визначено на універсальній множині $U(X_{13})=(1,5; 2,0; 2,5)$ (Вт/м²К). Лінгвістична змінна цього фактора задається терм-множиною $T(X_{13})=<$ низький, середній, високий $>$;

X_{14} – коефіцієнт паропроникності теплоізоляційного матеріалу будівельного виробу визначено на універсальній множині $U(X_{14})=(0,02; 0,04; 0,06)$ (м²/м·год·Па). Лінгвістична змінна цього фактора задається терм-множиною $T(X_{14})=<$ низька, середня, висока $>$;

X_{15} – коефіцієнт повітропроникності теплоізоляційного матеріалу будівельного виробу визначено на універсальній множині $U(X_{15})=(0,15; 0,35; 0,45)$ (кг/м³год). Лінгвістична змінна цього фактора задається терм-множиною $T(X_{15})=<$ низька, середня, висока $>$;

X_{16} – теплова інерційність теплоізоляційного матеріалу будівельного виробу визначено на універсальній множині $U(X_{16})=(5; 10;$

15)(год). Лінгвістична змінна цього фактора задається терм-множиною $T(X_{16}) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$.

Лінгвістичну змінну, що описує фізико-механічні фактори впливу на надійність забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних матеріалів із соломи, може бути подана співвідношенням

$$X_2 = f(X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}, X_{25}), \quad (3.11)$$

де X_{21} – густина теплоізоляційного будівельного виробу визначено на універсальній множині $U(X_{21}) = (100; 150; 200; 250)$ (кг/м³). Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною $T(X_{11}) = \langle \text{низька, нижче середньої, середня, висока} \rangle$;

X_{22} – міцність на стискування теплоізоляційного матеріалу будівельного виробу визначено на універсальній множині $U(X_{22}) = (1, 2, 3, 4, 5)$ (балів). Лінгвістична змінна цього фактора задається терм-множиною $T(X_{22}) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$;

X_{23} – несуча здатність теплоізоляційного матеріалу будівельного виробу визначається на універсальній множині $U(X_{23}) = (1, 3, 5)$ (балів). Лінгвістична змінна цього фактора задається терм-множиною $T(X_{23}) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$;

X_{24} – морозостійкість теплоізоляційного матеріалу будівельного виробу визначається на універсальній множині $U(X_{24}) = (1, 3, 5)$ (балів). Лінгвістична змінна цього фактора задається терм-множиною $T(X_{24}) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$;

X_{25} – звукопоглинання теплоізоляційного матеріалу будівельного виробу визначається на універсальній множині $U(X_{25}) = (20, 30, 40)$ (ДБ). Лінгвістична змінна цього фактора задається терм-множиною $T(X_{25}) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$.

Лінгвістичну змінну, що описує показники довговічності як фактори впливу на надійність забезпечення ефективності теплоізоляційних матеріалів із соломи, може бути подання співвідношенням

$$X_3 = f(X_{31}, X_{32}, X_{33}). \quad (3.12)$$

X_{31} – вогнестійкість теплоізоляційного матеріалу будівельного

виробу визначається на універсальній множині $U(X_{31})=(0,1;0,2;0,3)$ (годин). Лінгвістична змінна цього фактора задається терм-множиною $T(X_{31})=<низька, середня, висока>$;

X_{32} – хімічна стійкість теплоізоляційного матеріалу будівельного виробу визначається на універсальній множині $U(X_{32})=(1,3,5)$ (балів). Лінгвістична змінна цього фактора задається терм-множиною $T(X_{32})=<низька, середня, висока>$;

X_{33} – біологічна стійкість теплоізоляційного матеріалу будівельного виробу визначається на універсальній множині $U(X_{33})=(1,3,5)$ (балів). Лінгвістична змінна цього фактора задається терм-множиною $T(X_{33})=<низька, середня, висока>$.

Нечітку матрицю знань для апроксимації залежності (3.1), що описує лінгвістичну змінну надійність забезпечення енергоефективності багатошарових теплоізоляційних огорожувальних конструкцій із солом'яних виробів на системному рівні за допомогою нечітких правил «якщо-то» з врахуванням прийнятих якісних термів вхідних та вихідних лінгвістичних змінних, наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Нечітка матриця знань співвідношення на системному рівні для лінгвістичних змінних

| Якщо | | | То |
|-------|-------|-------|-----|
| X_1 | X_2 | X_3 | Y |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Н | Н | Н | Н |
| Н | НС | Н | |
| НС | Н | Н | |
| Н | НС | НС | НС |
| НС | НС | Н | |
| НС | Н | НС | |
| НС | НС | НС | |
| С | С | С | С |
| НС | С | С | |
| С | НС | С | |
| ВС | ВС | ВС | ВС |
| ВС | С | ВС | |
| ВС | ВС | С | |
| С | ВС | ВС | |

| | | | |
|----|----|----|---|
| BC | B | B | B |
| B | B | B | |
| B | B | BC | |
| B | BC | B | |

Лінгвістичним висловлюванням, що наведено в нечіткій матриці знань для апроксимації залежності (3.1), відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності лінгвістичної змінної надійність забезпечення енергоефективності багатошарових теплоізоляційних огорожувальних конструкцій із солом'яних виробів за відповідним якісним термом:

$$\begin{aligned} \mu_H(Y) = & \mu_H(X_1) \wedge \mu_H(X_2) \wedge \mu_H(X_3) \vee \mu_{HC}(X_1) \wedge \mu_H(X_2) \wedge \mu_H(X_3) \vee \\ & \mu_H(X_1) \wedge \mu_{HC}(X_2) \wedge \mu_H(X_3) \vee \mu_H(X_1) \wedge \mu_H(X_2) \wedge \mu_{HC}(X_3), \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} \mu_{HC}(Y) = & \mu_H(X_1) \wedge \mu_{HC}(X_2) \wedge \mu_{HC}(X_3) \vee \mu_{HC}(X_1) \wedge \mu_{HC}(X_2) \wedge \mu_{HC}(X_3) \\ & \vee \mu_{HC}(X_1) \wedge \mu_{HC}(X_2) \wedge \mu_H(X_3) \vee \mu_{HC}(X_1) \wedge \mu_H(X_2) \wedge \mu_{HC}(X_3), \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(Y) = & \mu_C(X_1) \wedge \mu_{HC}(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \vee \mu_{HC}(X_1) \wedge \mu_C(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \vee \\ & \mu_C(X_1) \wedge \mu_C(X_2) \wedge \mu_{HC}(X_3) \vee \mu_C(X_1) \wedge \mu_C(X_2) \wedge \mu_C(X_3), \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \mu_{BC}(Y) = & \mu_{BC}(X_1) \wedge \mu_{BC}(X_2) \wedge \mu_{BC}(X_3) \vee \mu_{BC}(X_1) \wedge \mu_{BC}(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \\ & \vee \mu_{BC}(X_1) \wedge \mu_C(X_2) \wedge \mu_{BC}(X_3) \vee \mu_C(X_1) \wedge \mu_{BC}(X_2) \wedge \mu_{BC}(X_3), \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(Y) = & \mu_{BC}(X_1) \wedge \mu_B(X_2) \wedge \mu_B(X_3) \vee \mu_B(X_1) \wedge \mu_B(X_2) \wedge \mu_B(X_3) \vee \\ & \mu_B(X_1) \wedge \mu_B(X_2) \wedge \mu_{BC}(X_3) \vee \mu_B(X_1) \wedge \mu_{BC}(X_2) \wedge \mu_{BC}(X_3). \end{aligned} \quad (3.17)$$

Відповідно до математичного апарату нечіткої логіки [] кількісний та якісний вплив факторів впливу на надійність забезпечення енергоефективності теплоізоляційних будівельних матеріалів використано функції належності. Функцію належності складає сукупність значень μ (μ_i) для всіх $i=1, n$, яку необхідно визначити. Розв'язання задачі базується на розподілу ступенів належності універсальної множини, яка представлена лінгвістичною змінною Y , відповідно до їх рангів. Ранг характеризує значимість кожного фактора впливу як лінгвістичними

змінними (X_i). Для кожного ступеня належності до нечіткого терму оцінки складено матрицю. Для експертної оцінки елементів матриці використано дев'ятибальну шкалу Сааті [12].

Метод побудови функцій належності розглянуто на прикладі фактора впливу X_{21} – густина теплоізоляційного матеріалу. Цей фактор характеризується відповідною універсальною множиною $U(X_{21})=(25,50,75,100,125)/\text{кг/м}^3$.

При лінгвістичній оцінці використано терм-множини $T(X_{21})=\langle \text{низька, менше середньої, середня, більше середньої, висока} \rangle$. Матриця, яка характеризує парні порівняння різних величин густини теплоізоляційного матеріалу з точки зору їх близькості до терму «низька», має вигляд

$$A_{\text{низька}}(X_{21}) = \quad (3.18)$$

З врахуванням матриці () обчислюють окремі належності U_1, U_2, U_3, U_4 до терму «низька»

$$\mu_L(U_1) = \frac{1}{(1 + 6/8 + 4/8 + 2/8 + 1/8)} = 0,38,$$

$$\mu_L(U_2) = \frac{1}{(8/6 + 1 + 4/6 + 2/6 + 1/6)} = 0,29,$$

$$\mu_L(U_3) = \frac{1}{(8/4 + 6/4 + 1 + 2/4 + 1/4)} = 0,19,$$

$$\mu_L(U_4) = \frac{1}{(8/2 + 6/2 + 4/2 + 1 + 1/2)} = 0,10,$$

$$\mu_L(U_5) = \frac{1}{(8 + 6 + 4 + 2 + 1)} = 0,05,$$

Відповідно до наведеної методики знаходження ступеня належності до терму «низька» обчислюють матриці парних порівнянь для термів «менше середньої», «середня», «більше середньої» та «висока» і відповідні ступені належності.

$$\langle \text{низька} \rangle = \left\{ \frac{1}{25}; \frac{0,75}{50}; \frac{0,5}{75}; \frac{0,25}{100}; \frac{0,13}{125} \right\},$$

$$\langle \text{менше середньої} \rangle = \left\{ \frac{0,78}{25}; \frac{1}{50}; \frac{0,56}{75}; \frac{0,33}{100}; \frac{0,11}{125} \right\},$$

$$\langle \text{середня} \rangle = \left\{ \frac{0,5}{25}; \frac{0,75}{50}; \frac{1}{75}; \frac{0,75}{100}; \frac{0,5}{125} \right\},$$

$$\text{«більше середньої»} \left\{ \frac{0,25}{25}; \frac{0,5}{50}; \frac{0,75}{75}; \frac{1}{100}; \frac{0,13}{125} \right\},$$

$$\text{«висока»} \left\{ \frac{0,11}{25}; \frac{0,33}{50}; \frac{0,56}{75}; \frac{0,78}{100}; \frac{1}{125} \right\}.$$

Graphic representation of the fuzzy sets for certain linguistic variables (membership functions) as the factors of influence on the objective function is shown in Fig. 2-4. It should be mentioned that designing method of these membership functions is based on the pairwise comparison, as it described in (Averkin, Batyrshin, Blishun, Silov, & Tarasov, 1986, pp. 265–267)

Запропонована структурна ідентифікація ієрархічних зв'язків універсальної множини, за яку прийнято надійність забезпечення енергоефективності багат шарових теплоізоляційних огорожувальних конструкцій із застосуванням виробів із соломи охарактеризовано, у вигляді дерева логічного висновку є підґрунтям для встановлення причинно-наслідкових зв'язків між факторами впливу на цільову функцію.

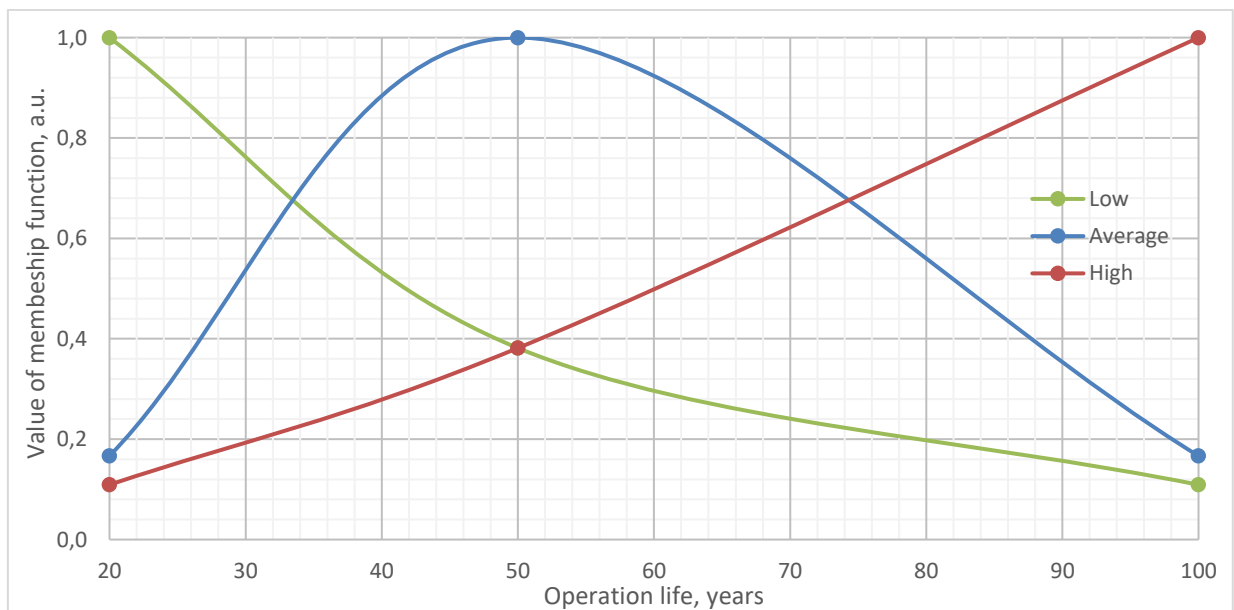


Рисунок 3.2 – Функції належності для лінгвістичної змінної «густина теплоізоляційного матеріалу»

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що встановлюють зв'язок між факторами впливу на системному рівні на надійність забезпечення енергоефективності багат шарових теплоізоляційних огорожуваль-

них конструкцій, виконується у вигляді нечіткої матриці знань за відповідними термами.

Отримана система нечітких логічних рівнянь до лінгвістичних висловлювань, які характеризують поверхню належності змінних за відповідними термами, що дозволить з врахуванням запропонованої математичної моделі, здійснювати інтелектуальну підтримку прийняття рішень щодо підвищення надійності забезпечення енергоефективності багат шарових теплоізоляційних огорожувальних конструкцій.

3.2 Багатокритеріальна оцінка потенціалу енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель

3.2.1 Теоретичні засади багатокритеріальної оцінки потенціалу енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель

Глобальна тенденція енергозбереження та концепція сталого розвитку дедалі більше стимулюють використання багатокритеріальних методів аналізу факторів впливу (MCDA) при прийнятті рішень. Як зазначає Wang et al., [13], “методи MCDA стають все більш популярними «через багатовимірність цілей сталого розвитку та складність соціально-економічних та біофізичних систем». У цьому контексті використання будівельних матеріалів призводить до підвищеної всебічної відповідальності перед наступними поколіннями. Вибір огорожувальних конструкцій елементів стелі / покриття вимагає одночасного аналізу низки впливових факторів [13,14,15,16,17,18,19]. Слід зазначити, що різноманітність різнорозмірних критеріїв, які слід порівнювати, і що є “правильним” критерієм у процесі прийняття рішень, залишається суттєвою проблемою. Оптимальний тип матеріалу стін, їх товщини та типа для сучасного будівництва за умов біосферосумісності, який є водночас енергоефективним, дешевим та екологічним, все ще залишається невирішеною проблемою [20]. Аналогічну думку має [15] "... ідентифікація найкращих рішень залишається відкритою проблемою". Вибору доцільного методу (методів) для об'єктивної оцінки різних будівельних конструкцій з точки зору сталого розвитку присвячені дослідження [16,19,21,22] та інші.

Методологія дослідження методом аналізу ієрархій (АНР)

Використання методу аналізу ієрархії АНР для багатовимірного аналізу досліджуваних типів огорожувальних конструкцій може бути корисним при багатокритеріальній оцінці альтернативного типу стін.

Дослідження узагальненого індексу потенціалу енергоефективності конкретної теплоізоляційної оболонки будівель виконується за факторами впливу, що визначено за ISO 13786: 2017 [23]: характеристика нестационарного стану теплових характеристик - внутрішня поверхнева теплоємність (*the internal areal heat capacity*) кДж/м²К; характеристика стаціонарного теплового процесу (час теплової інерції τ [24], годин; безрозмірний показник теплової інерції оболонки D ; загальний термічний опір оболонки R_{tot} , м²К/Вт) [25]; маса стіни, кг/м² та вартість стінових матеріалів, €/м².

Методику побудови та створення ієрархічної моделі для узагальненого індексу визначення потенціалу енергоефективності наведено нижче. Шляхом методу парних порівнянь (Saaty, 2009) [26] переваги кожного фактору впливу були зважені на величину узагальненого індексу потенціалу енергоефективності.

Етапи дослідження методом аналізу ієрархії АНР при визначенні узагальненого індексу потенціалу енергоефективності огорожувальної конструкції наступні.

Крок 1. Кожен з факторів впливу є матрицею, яка заповнюється наступним чином [26]:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{r_1}{r_2} & \frac{r_1}{r_3} & \dots & \frac{r_1}{r_n} \\ \frac{r_2}{r_1} & 1 & \frac{r_2}{r_3} & \dots & \frac{r_2}{r_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{r_n}{r_1} & \frac{r_n}{r_2} & \frac{r_n}{r_3} & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.19)$$

де r_1, r_2, r_3, r_n - відповідні значення пріоритетів оцінюваних параметрів матриці, що характеризують значення шести включених пара-

метрів (внутрішня поверхнева теплоємність, час теплової інерції τ , показник теплової інерції оболонки D , загальний термічний опір огорожувальної конструкції R_{tot} , маса стіни та витрати коштів на матеріали стіни).

За відомими елементами рядка матриці (3.19) обчислюються елементи всіх інших рядків. Довільний елемент $a_{ij} = r_i / r_j$ з відомими елементами $a_{kj} = r_k / r_j$, $k, i = 1, \dots, n$. певного n -го рядка обчислюється як $a_{ji} = a_{kj} / a_{ki}$, $j, k = 1, \dots, n$.

Крок 2. Вектор переваги кожного i -го параметра m_i як середнє геометричне значення кожного рядка елементів матриці, поділене на суму всіх середніх геометричних значень для оцінюваних параметрів, обчислюється за формулою

$$\sqrt[n]{1 \times \frac{r_1}{r_2} \times \frac{r_1}{r_3} \times \dots \times \frac{r_1}{r_n}} = m_i. \quad (3.20)$$

Крок 3. Вектор пріоритетів для першого рядка матриці, що отримано за рівнянням (3.19) з урахуванням середнього значення геометричних елементів кожного рядка, обчислюється як

$$\frac{m_1}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} = x_1, \quad (3.21)$$

де x_1, x_2, \dots, x_n - вектор пріоритетів першого, другого, n -го рядка матриці відповідно.

Компоненти власного вектора та вектора пріоритетів для інших рядків m_n визначаються аналогічно.

Крок 4. Як набір відносних ваг альтернативи використовуються компоненти власного вектора, що відповідають максимальному характеристичному числу. Показник ступеня узгодженості елементів матриці A (формула 3.19) (*consistency index, CI*) обчислюється як [26]:

$$CI = (\eta_{\text{max}} - n) / (n - 1), \quad (3.22)$$

де n - ранг матриці.

Крок 5. Для оцінки адекватності ступеню узгодженості використовується коефіцієнт узгодженості (*consistency ratio, CR*), який розраховується як

$$CR = CI / MRCI, \quad (3.23)$$

де *MRCI* - середній індекс випадкової узгодженості - це середнє значення, яке випадковим чином обчислюється для великої кількості попарних матриць, які були сформовані в основному масштабі [26].

Отриманий вектор переваг певної матриці попарних порівнянь вважається прийнятним, якщо *CR* не перевищує поріг когерентності в діапазоні 0,10 ... 0,20.

Крок 6. Отримане значення *V* альтернативного узагальненого індексу *j*-ої стінового огороження у вигляді аддитивної нормалізованої композиції [25] обчислюється наступним чином:

$$V = \sum_{i=1}^n a_i \cdot w_i, \quad (3.24)$$

де - *i*-й критерій пріоритету; *w_i* - вектор пріоритету альтернатив за *i*-м критерієм.

Методологія дослідження методом сірого реляційного аналізу (GRA)

Сірий реляційний аналіз - розділ теорії сірих систем, розроблений у 1980 р. [27] і значною мірою застосовується до проблем при багатокритеріальному аналізі рішень (MCDA) у широкому спектрі прикладних задач [13,27,28,29]. Етапи розрахунку за цим методом наступні [19].

Крок 1. Вибірка даних порівнянь, які слід підготувати. Таким чином *x_{ij}* - аналітично розраховане значення *i*-го параметра для *j*-ої альтернативи стінової конструкції.

Крок 2. Отримано вибірку даних необхідно нормалізувати.

В теорії сірих систем нормалізацією називається сіре реляційне генерування (GRG). Нормалізація даних вважається одним із широко використовуваних методів лінійної попередньої обробки даних

[13,28,29]. Нормалізація критерію виконується згідно відповідної важливості критерію для даної серії („Чим більше - тим краще”, „Чим менше - тим краще”).

Якщо бажаним є максимум критерію, нормалізацію слід розраховувати [29] як

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}, \quad (3.25)$$

де - $\min x_{ij}$, $\max x_{ij}$ мінімальне та максимальне розрахункове значення i -го параметра впливу для j -ої альтернативи стіни в серії; x_{ij} - нормалізоване значення i -го параметра для j -ої альтернативи стінової конструкції в серії.

Якщо бажаним є мінімум критерію, нормалізацію слід розраховувати за наступним рівнянням [29]

$$x_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} . \quad (3.26)$$

Крок 3. Розрахунок послідовностей відхилень для значень, нормованих за рівнянням ряду даних виконується за наступною формулою [29]:

$$ds_{ij} = x_{ij} - \max x_{ij} . \quad (3.27)$$

Крок 4. Розрахунок коефіцієнта сірого співвідношення виконується за формулою [29]

$$c_{ij} = \frac{\min ds_{ij} + \xi \cdot \max ds_{ij}}{ds_{ij} + \xi \cdot \max ds_{ij}}, \quad (3.28)$$

де ξ - коефіцієнт розрізнення, $0 < \xi < 1$, який зазвичай становить 0,5.

Крок 5. У зв'язку з відсутністю іншого параметру цільової функції

на результати узагальненого індексу, обчислюється нормоване значення сірого відносного ступеня [29]

$$\gamma_j = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i}, \quad (3.29)$$

Методологія дослідження показника теплової інерції

Поняття теплової інерції [15,30,31] використовується як кількісна міра для оцінки тепловтрат через будівельні елементи. Значення теплової інерції - це показник акумулюючої здатності огорожувальної конструкції накопичувати тепло або проміжок часу, протягом якого відбувається стабілізація температури між зовнішньою та внутрішньою поверхнями. Як зазначає [23], для огорожувальних конструкцій, які в основному завжди є багатошаровими, «... неможливо використовувати залежність тривалості квазістаціонарного теплового процесу (час теплової інерції) в простому вигляді для однорідної стіни» наступним чином:

$$\tau_u = \pi^{-2} c \rho \delta R, \quad (3.30)$$

де c - питома теплоємність матеріалу стіни, кДж / кг·м;

ρ - щільність матеріалу шарів огорожувальних конструкцій стін, кг / м³;

$R = \frac{\delta}{\lambda}$ - термічний опір стіни, м²·К / Вт;

δ - товщина шару огорожувальної конструкції стіни, м;

λ - теплопровідність матеріалу оболонки, Вт / м × К.

Для чисельного моделювання часу теплової інерції багатошарових огорожувальних конструкцій використовується аналітична залежність [23]:

$$\tau_u = \tau'_u L_n, \quad (3.31)$$

де τ'_u - час теплової інерції однорідної стінової конструкції товщиною δ з параметрами першого шару, що визначається залежністю [23]:

$$\tau'_u = c_i \rho_i \delta^2 / \pi^2 \lambda_i, \quad (3.32)$$

L_n - коефіцієнт шаруватості огорожувальної конструкції, який розраховується як [23]:

$$L_n = \{3\delta_{tot}\delta_1^2 - 2\delta_1^3 + \frac{\lambda_1}{c_1\rho_1} \sum_{i=2}^n c_i \rho_i \delta_i^2 [\frac{\Delta\delta_i}{\lambda_i} + (1 + 2\frac{\Delta\delta_i}{\delta_i})(3\sum_{j=1}^{i-1} \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{\delta_i}{\lambda_i})]\} \delta_{tot}^{-3}, \quad (3.33)$$

де δ_{tot} - загальна товщина багатошарової огорожувальної конструкції, м;

δ_1 - товщина першого шару багатошарової огорожувальної конструкції, м;

$\Delta\delta_i = \sum_{j=i+1}^n \delta_j$ - товщина багатошарової огорожувальної конструкції,

починаючи з другого шару $i = 2$, м.

Розрахунок безрозмірного показника теплової інерції D виконується наступним чином [30]

$$\sum_{i=1}^n D_i = \sum (S_i \cdot R_i), \quad (3.34)$$

де $S_i = \sqrt{\frac{2\pi\lambda_i c_i \rho_i}{T}}$ коефіцієнт теплопоглинання Вт / м²·К, i -го шару огорожувальної конструкції [32];

T - період теплових коливань, с.

Для визначення коефіцієнта теплопоглинання прийнято 24-годинний добовий період теплових коливань, тобто $T = 24 \cdot 3600 = 86400$ sec.

3.2.2 Чисельний аналіз моделювання оцінки потенціалу енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель

Для чисельного моделювання та аналізу отриманих даних запропоновано вісім типів стінових конструкцій. Серед них стіна з арболіту

(тип "А"), стіна з саману (тип "В"), стіна з солом'яних панелей (тип "С"), стіна із землєбиту (тип "D"), стіна з чуркобетону (тип "Е"), SIP стіна (фанера + екофібра) (тип "F"), комбінована стіна з арболіту+со-ломи (тип "G") та стіна з енергоефективного теплоблоку (тип "H") [19,34]. Ширина всіх досліджуваних типів стін становить 500 мм. Схеми перерізу типів стін наведено на рис. 3.3.

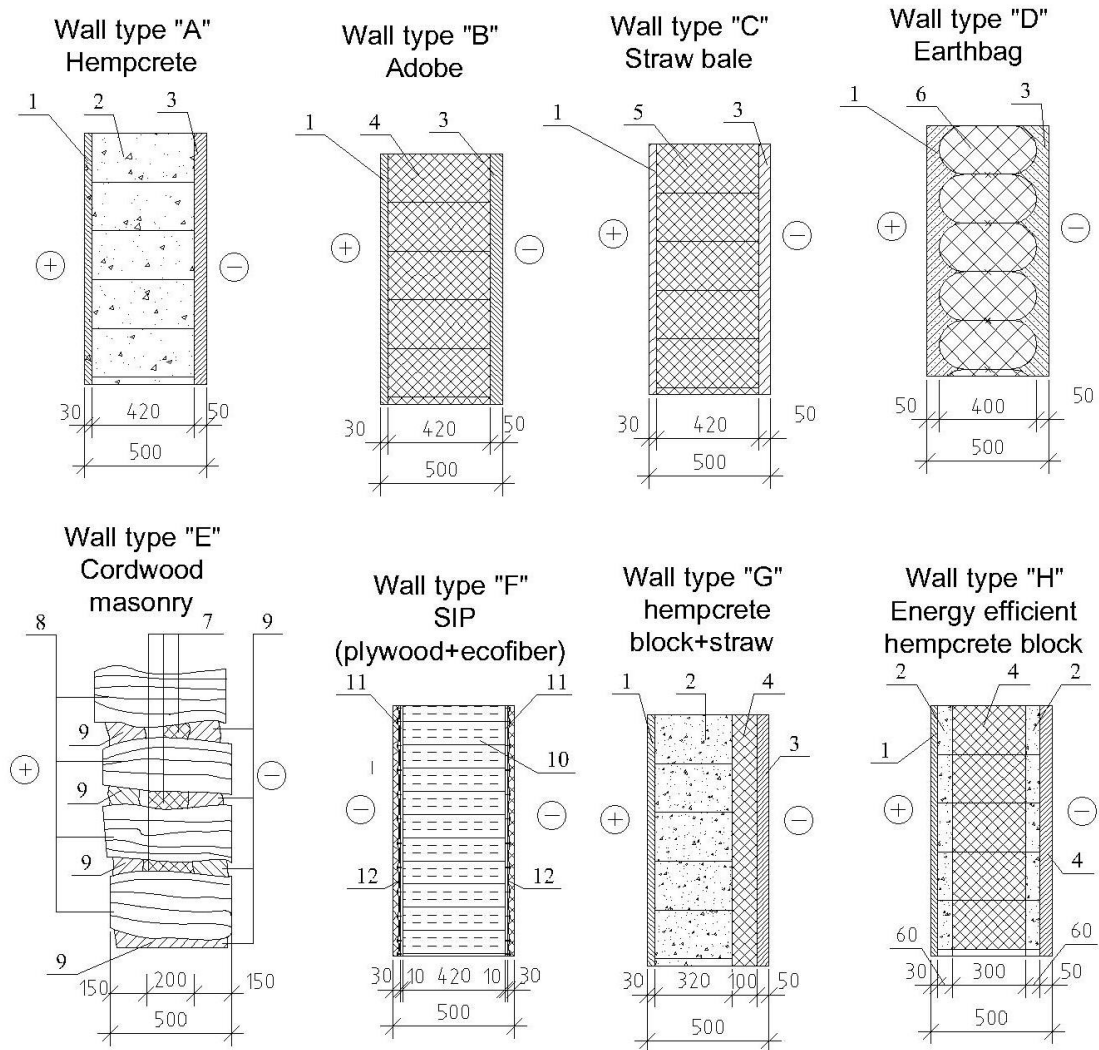


Рисунок 3.3 – Схема поперечного перерізу розглянутих типів стін (1 - внутрішня вапняно-піщана штукатурка, 2 - арболіт, 3 - зовнішня вапняно-піщана штукатурка, 4 - саман, 5 - солом'яна панель, 6 - землєбит, 7 – посічена солома, як утеплювач, 8 - чуркобетон, 9 - вапняно-піщана розчин, 10 - екофібра, 11 - вапняно-піщана штукатурка, 12 - фанера)

Усереднені актуальні значення цін на матеріали для запропонованих типів стін були взяті з українських сайтів. Теплофізичні та фізичні

характеристики стінових матеріалів взято з довідкової літератури [14,15,32], а також з вітчизняних будівельних норм та національних стандартів [24,30,33] (див. табл. 3.2).

Таблиця 3.2 - Теплофізичні, фізичні та економічні характеристики матеріалу огорожувальної конструкції

| Будівельні матеріали | Питома теплоємність c_i , Дж/кг*К | Теплопровідність λ_i , Вт/м*К | Густина ρ_i , кг/м ³ | Усереднена вартість* матеріалу Q , €/м ³ |
|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---|
| Арболіт | 1700 | 0,065 | 350 | 75.36 |
| Солом'яна панель | 1675 | 0,07 | 80 | 75.96 |
| Саман | 880 | 0,4 | 1400 | 18.84 |
| Чуркобетон* | 2146 | 0,5 | 866 | 75.36 |
| Землебит | 837 | 1,05 | 1800 | 18.09 |
| Фанера | 2400 | 0,18 | 600 | 325.55 |
| Екофібра | 1880 | 0,06 | 55 | 45.22 |
| Посічена солома | 1675 | 0,06 | 60 | 9.04 |
| Вапняно-піщана штукатурка | 840 | 0,81 | 1600 | 36.17 |

* - Для розрахунку був прийнятий курс Національного Банку України 1€ = 33,1744 грн.

Загальний термічний опір огорожувальної конструкції R_{tot} , м²К/Вт розраховується, приймаючи значення внутрішнього $R_{si} = 8.7$ м²К / Вт, а також зовнішнього опору теплопередачі $R_{se} = 23.0$ м²К / Вт, згідно з Додатком В [30]. Аналітичні значення всіх шести значущих факторів впливу згруповано в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 - Теплофізичні, фізичні та економічні параметри стін

| Тип Стіни | Загальна величина теплової інерції стіни τ , год | Показник теплової інерції, D | Загальний термічний опір стіни R_{tot} , м ² К/Вт | Внутрішня теплоємність стіни, кДж/м ² К | Маса стіни m , кг/м ² | Вартість стіно-вих матеріалів, €/м ² |
|---|---|--------------------------------|--|--|------------------------------------|---|
| Стіна "А" (Арболіте) | 58,39 | 12,16 | 7,14 | 37,57 | 300 | 33,59 |
| Стіна "В" (Саман) | 18,77 | 7,08 | 1,28 | 62,76 | 720 | 11,10 |
| Стіна "С" (Солом'яна панель) | 13,38 | 5,82 | 6,00 | 57,02 | 192 | 33,83 |
| Стіна "D" (Землебит) | 10,84 | 5,18 | 0,66 | 68,53 | 880 | 10,80 |
| Стіна "Е" (Чуркобетон)* | 35,01 | 7,14 | 4,09 | 64,20 | 272 | 24,29 |
| Стіна "F" (СІП фанера +екофібра) | 12,52 | 5,84 | 7,34 | 49,88 | 131 | 27,53 |
| Стіна "G" (Арболіт+ солома) | 47,64 | 10,31 | 6,61 | 45,59 | 248 | 34,43 |
| Стіна "H" (Енергоефективний тепло-блок) | 21,17 | 7,51 | 6,39 | 46,45 | 194 | 34,55 |

1. Співвідношення обсягів глини V_2 та деревини V_d зовнішнього та внутрішнього шару становить 1/3 до 2/3;
2. Дерев'яні чурки із сосни (волокна, паралельні тепловому потоку), глиняно- піщаний розчин;
3. Питома теплоємність c_i конструкції змішаного шару визначається як $(c_d \times V_d + c_2 \times V_2) / (V_d + V_2)$;
4. Інші параметри, а саме щільність і середня теплопровідність знаходяться за подібними залежностями.

Графічне порівняння отриманих значень (табл. 3.3) для різних типів огорожувальних конструкцій представлено на рис. 3.4-3.9.

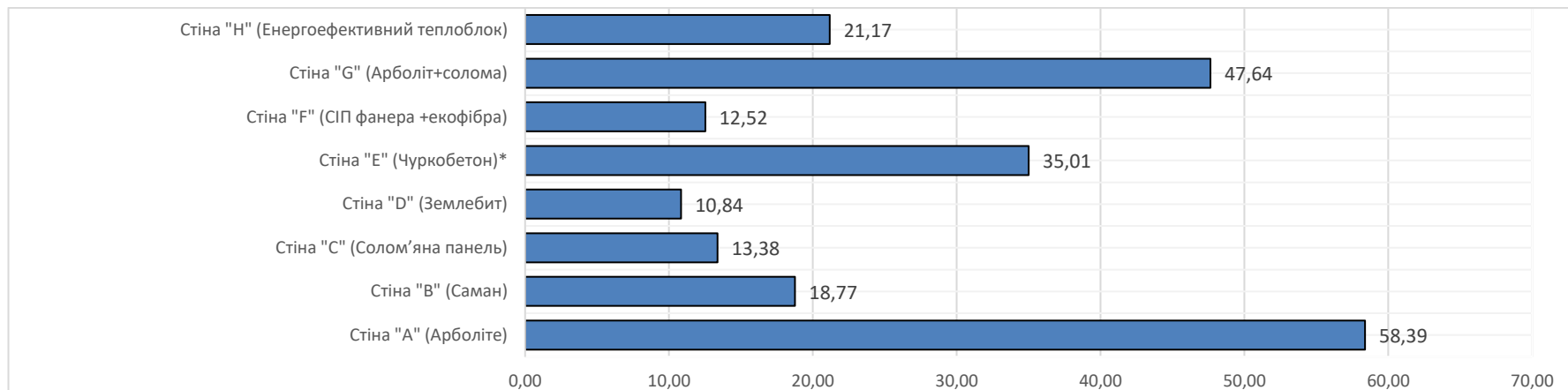


Рисунок 3.4 - Загальний час сумарної теплової інерції τ , год

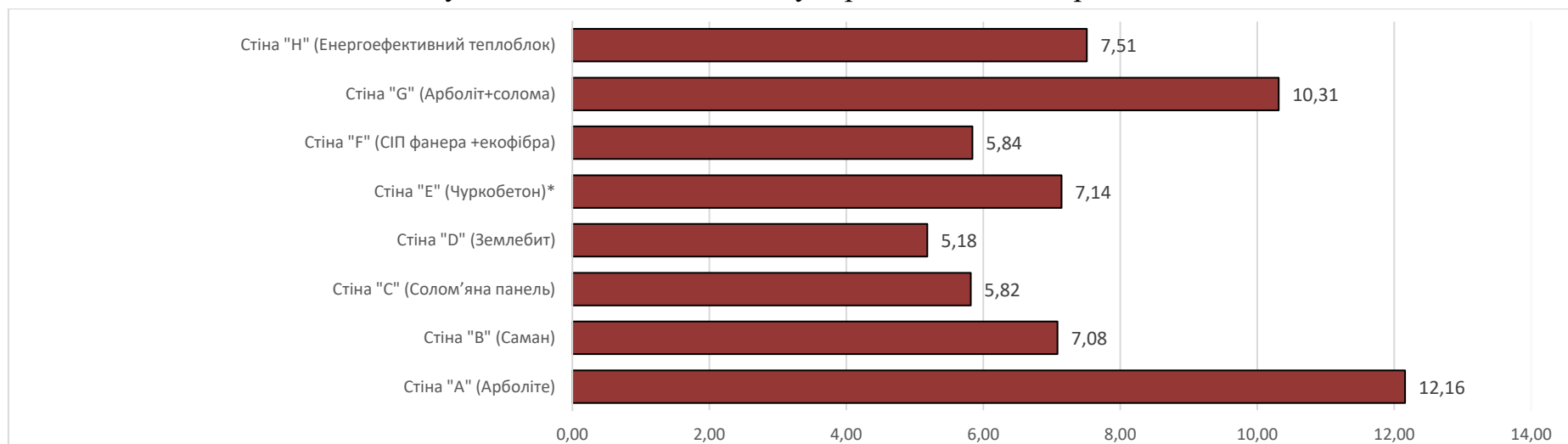


Рисунок 3.5 - Показник теплової інерції стін, D

З аналізу рис. 3.4 та рис. 3.5 видно, що безрозмірний показник теплової інерції D має хорошу кореляцію з часом сумарної теплової інерції. Для подальших досліджень може бути кориснішим виразити одного параметру, наприклад часу теплової інерції τ через інший, безрозмірний показник теплової інерції D .

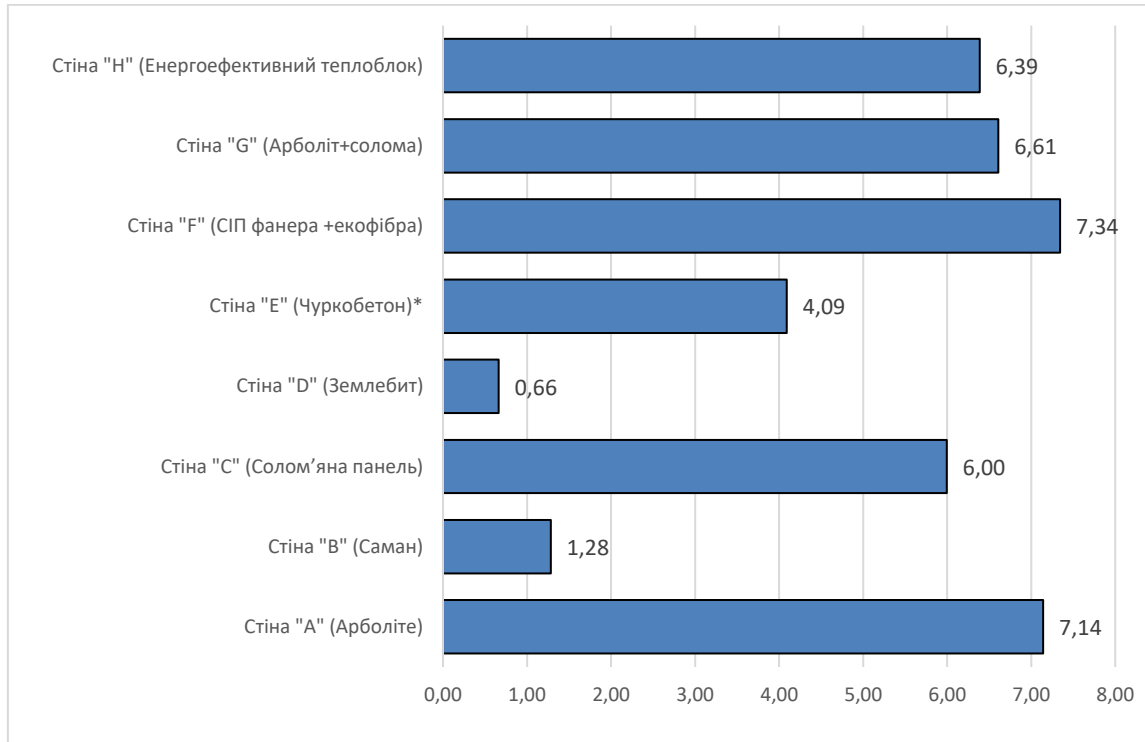


Рисунок 3.6 – Загальний термічний опір стін R , м²К / Вт

Аналіз діаграми на рис. 3.6 показав, що такі стіни, як тип "Д" і тип "В", не можуть бути застосовані для нового будівництва через їх низьке, неприйнятне значення термічного опору, як слід ($R_{q, \min} = 3,3$ м²К / Вт для першої температурної зони, згідно з ДБН В. 2.6-31: 2016) [24]. Інші типи стін можуть застосовуватись як огорожувальні конструкції з точки зору термічного опору. Кореляція між часом теплової інерції (рис. 3.4) та показником теплової інерції (рис. 3.5) не є очевидною, що можна пояснити різницею в теплофізичних характеристиках матеріалу конкретного варіанту стінової конструкції.

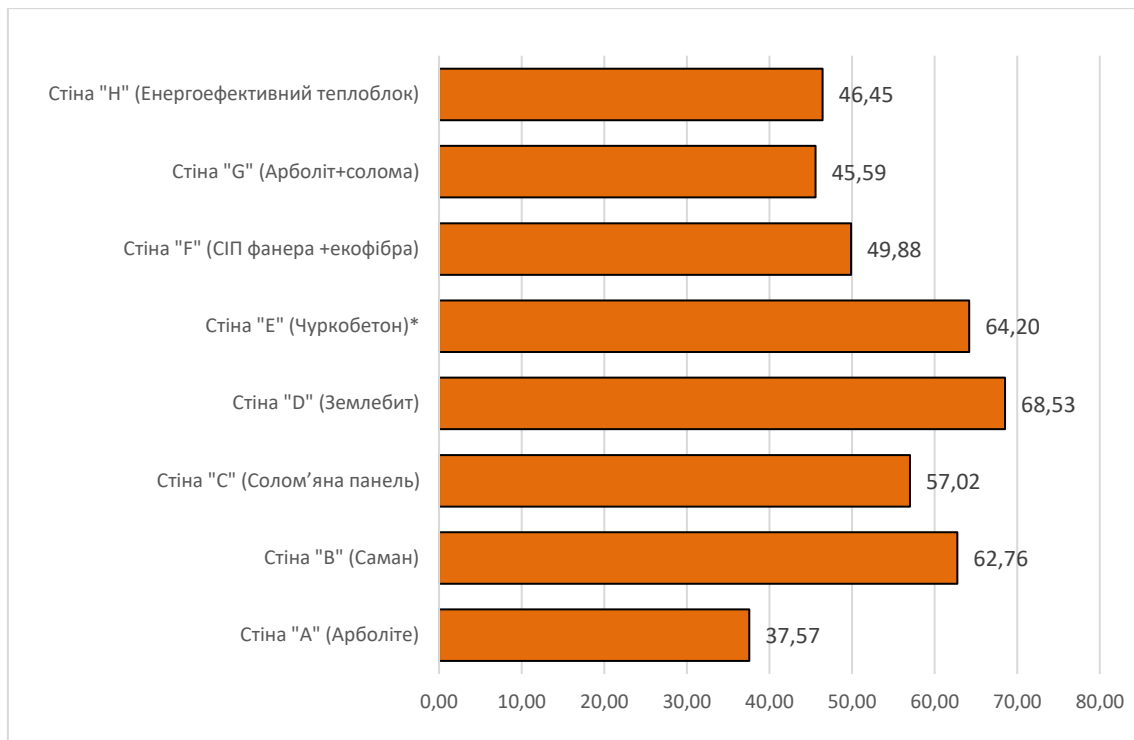


Рисунок 3.7 – Внутрішня поверхнева теплоємність огорожувальних конструкцій кДж/м²К, за ISO 13786: 2017 [23]

Значення внутрішньої поверхневої теплоємності характеризує кількість тепла, яке може бути заакумульоване одним квадратним метром поверхні огорожувальних конструкцій протягом однієї доби при коливанні температури 1 градус. Бажано також максимізувати значення внутрішньої поверхневої теплоємності, щоб уникнути перегріву влітку та / або зменшити пов'язані з цим витрати на охолодження. З огляду на вищесказане, згідно рис. 3.7, найкращим типом огорожувальної конструкції є стіна із землебиту (тип "D"), який при цьому має мінімальне значення загального термічного опору R_{tot} з усіх запропонованих типів стінового огородження (рис. 3.6). Таке явище можна пояснити теплофізичними характеристиками - його висока теплоємність головним чином визначається об'ємною щільністю та теплопровідністю, що безпосередньо впливає на величину термічного опору R_{tot} .

Виклик при виборі конструкції стінового огородження полягає в тому, щоб вибрати такий тип, який матиме високе значення термічного опору, а також найбільше значення поверхневої теплоємності одночасно.

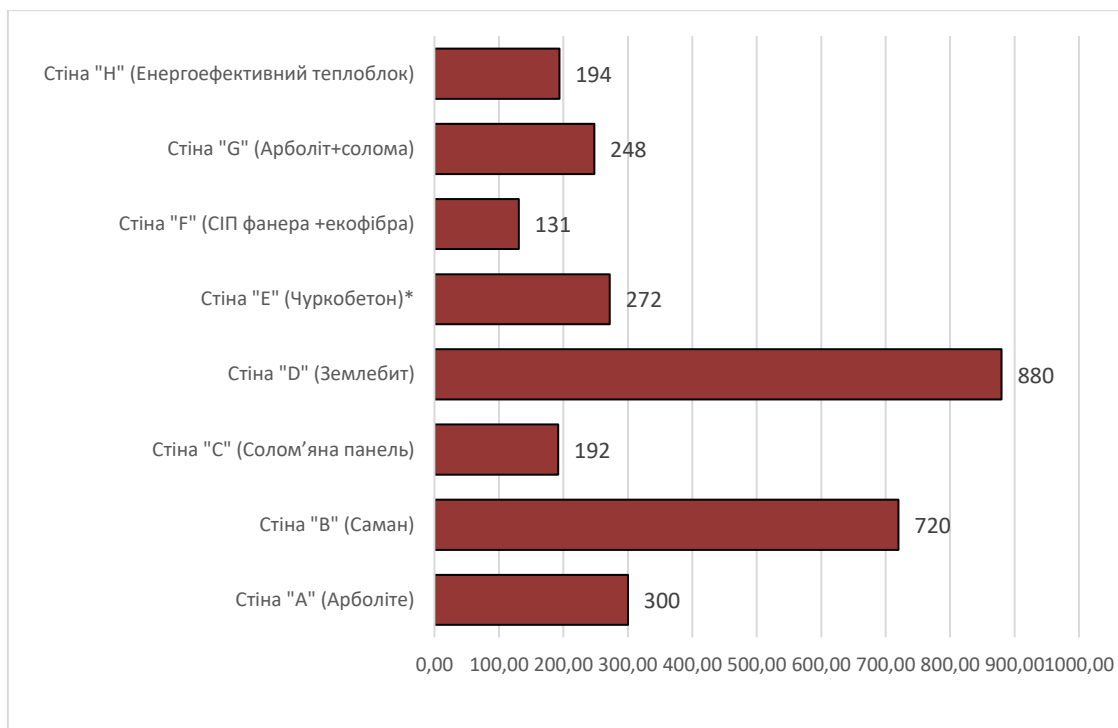


Рисунок 3.8 – Маса стінового огородження, кг / м²

Вважається, що більша маса стіни огорожувальних конструкцій вимагає більших капітальних витрат на облаштування фундаменту. Таким чином, з цієї точки зору стіна типу «D» з масою 880 кг / м² є найдорожчою, в порівнянні зі стіною конструкцією типу «F» з мінімальною масою стіни - 131 кг / м². В реальній будівельній практиці кореляція між масою стін і вартістю фундаменту може бути не настільки очевидною і прямопропорційною, як це прийнято в першому наближенні досліджень.

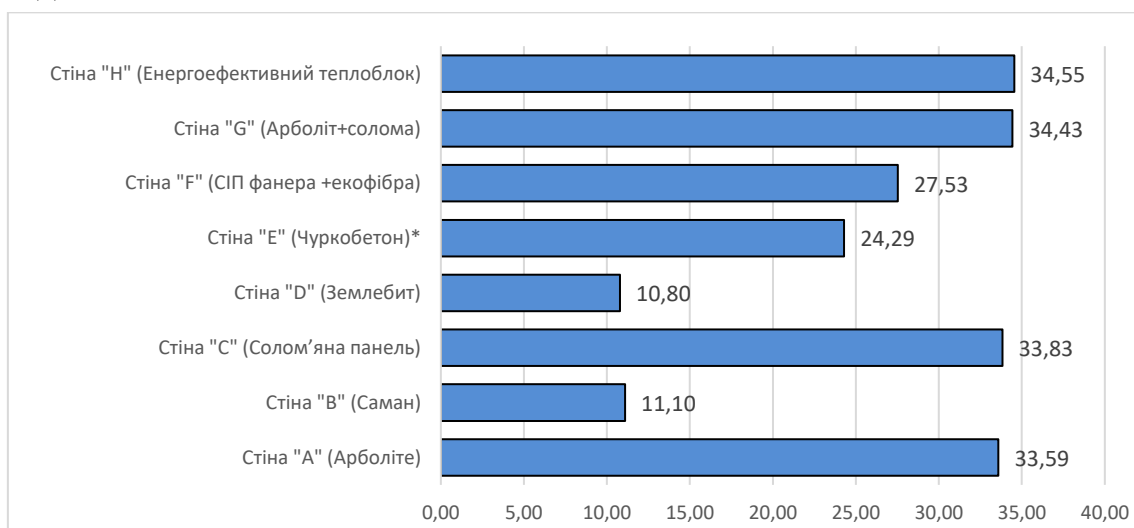


Рисунок 3.9 – Вартість стінових матеріалів, € / м²

В роботі [35] підкреслено, що економічні критерії, як правило, є головним фактором прийняття рішення при виборі матеріалу стін будинку. Так, найдешевшими (найдоступнішими) для будівництва є стіни типів «В» та «D» (рис. 3.9). Беручи до уваги інші параметри, особливо теплофізичні характеристики стін огорожувальних конструкцій, оптимальний та доречний вибір можливий лише за умови використання методів аналізу MCDA.

Для проведення чисельного дослідження та аналізу запропоновано безрозмірний узагальнений індекс потенціалу енергоефективності, який дозволяє комплексно оцінити різновимірні значення характеристик, що входять до його складу. При аналізі використовуються теплофізичні, економічні та фізичні параметри матеріалів огорожувальних конструкцій. Трирівнева ієрархічна модель, згідно з АНР [25], може бути побудована для визначення безрозмірного узагальненого індексу потенціалу енергоефективності огорожувальної конструкції (рис. 3.10).

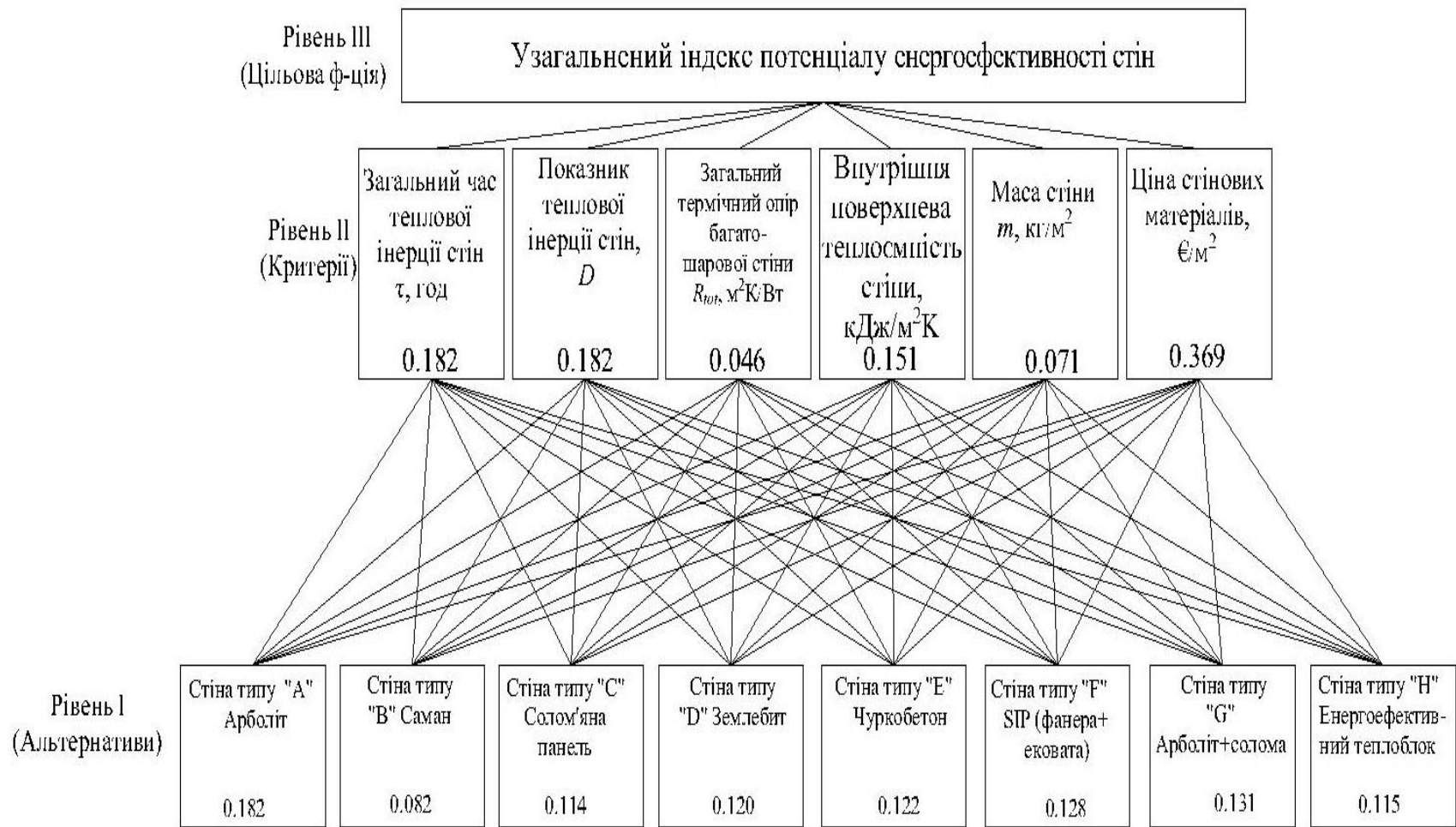


Рисунок 3.10 – Ієрархічна модель узагальненого індексу потенціалу енергоефективності огорожувальної конструкції

Згідно з вищезазначеним поетапним розрахунком методології багатокритеріальної оцінки АНР, числа в прямокутниках рівня I ієрархічної моделі альтернативного стінового огороження отримано згідно рівнянь (3.19) – (3.24) з точки зору запропонованих критеріїв (рівень II). Числа в прямокутниках рівня II ієрархічної моделі є значеннями ваги критеріїв, розрахованих за рівнянням (3.19) - (3.24) відповідно. Наповнення та знаходження всіх компонентів матриці - її власного вектора λ_{max} , попарних порівнянь, індексу узгодженості CI , а також коефіцієнта узгодженості CR наведено в табл. 3.4 на прикладі матриці "Критерії" (Рівень II) ієрархічної моделі (рис. 3.10).

Таблиця 3.4 - Матриця попарного порівняння для "Критеріїв" (рівень II на рис. 3.3)

| Критерії | Загальна величина теплової інерції стіни τ , год | Показник теплової інерції, D | Загальний термічний опір стіни R_{tot} , $m^2K/Вт$ | Внутрішня теплоємність стіни, kJ/m^2K | Маса стіни m , kg/m^2 | Вартість стінових матеріалів, $€/m^2$ | Вага критерію | Нормалізоване значення ваги критерію |
|---|---|--------------------------------|--|---|------------------------------------|---------------------------------------|---------------|--------------------------------------|
| Загальна величина теплової інерції стіни τ , год | 1 | 1 | 4 | 1 | 3 | 1/2 | 1.348 | 0.182 |
| Показник теплової інерції, D | 1 | 1 | 4 | 1 | 3 | 1/2 | 1.348 | 0.182 |
| Загальний термічний опір стіни R_{tot} , $m^2K/Вт$ | 1/4 | 1/4 | 1 | 1/3 | 1/2 | 1/7 | 0.338 | 0.046 |
| Внутрішня теплоємність стіни, kJ/m^2K | 1 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1/3 | 1.122 | 0.151 |
| Маса стіни m , kg/m^2 | 1/3 | 1/3 | 2 | 1/2 | 1 | 1/5 | 0.530 | 0.071 |
| Вартість стінових матеріалів, $€/m^2$ | 2 | 2 | 7 | 3 | 5 | 1 | 2.737 | 0.369 |
| Власний вектор $\lambda_{max}= 6.039$ | | Індекс узгодженості $CI=0.196$ | | | Коефіцієнт узгодженості $CR=0.158$ | | | |

У матриці (табл. 3.4) у кожній клітині експертні оцінки переваг факторів впливу проранжовано за популярною 9-бальною шкалою Сааті [35]. Крім того, заповнення матриці (табл. 3.4) здійснюється за правилом: число більше одиниці, розташовується в клітинку, якщо оцінений критерій ліворуч має перевагу над критерієм над ним за шуканим параметром. Числа менше одиниці розміщуються у відповідних комірках, якщо оцінюваний параметр ліворуч має нижчу перевагу над оціночним критерієм вище розташованого параметру. Для визначення узагальненого індексу потенціалу енергоефективності варіанту стінового огорожування (рівень III, рис. 3.10) для конкретної альтернативи стіни, отримано значення кожного локального вектору нормованої ваги критерію (див. останній стовпець у табл. 3.4) кожного з факторів, що впливають (рівень II) множиться на глобальний вектор ваги альтернатив і після цього всі значення підсумовуються. Результуючі значення представлено у вигляді значень у прямокутниках рівня I на рис. 3.10. Усі ваги критеріїв для решти матриць та фактори впливу знайдено за схожою методикою. Для кращої інтерпретації результатів аналізу запропоновано діаграму на рис. 3.11.

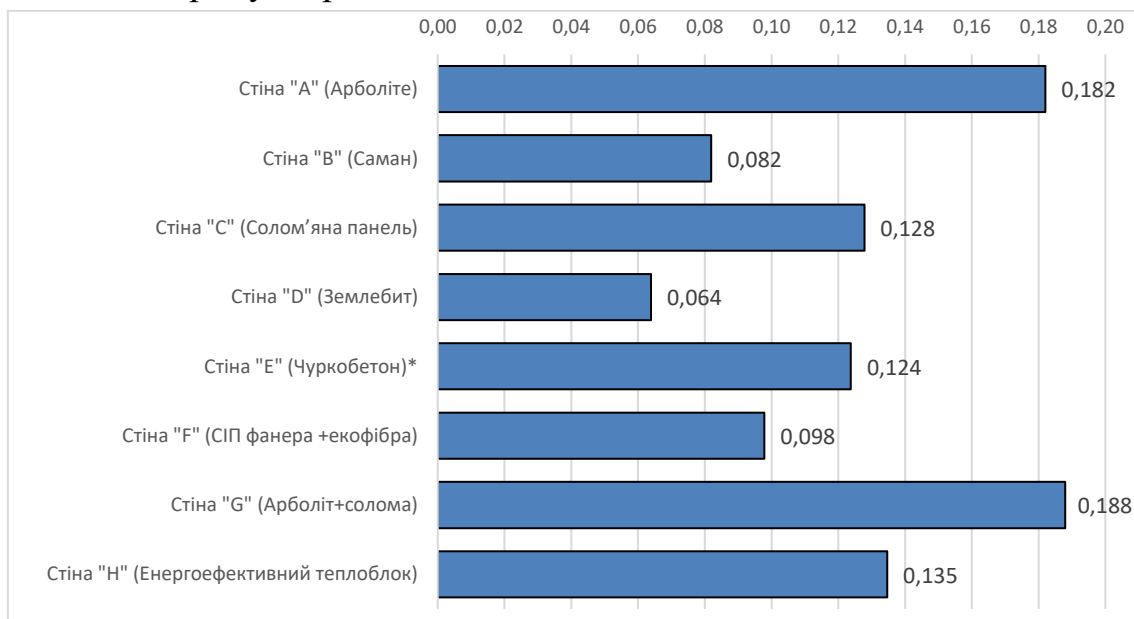


Рисунок 3.11 - Узагальнений показник потенціалу енергоефективності огорожувальної конструкції (за АНР)

Аналіз показнику потенціалу енергоефективності стінових огорожувальних конструкцій, проведений за АНР, показав, що найкращим

рішенням є конструкція стіни типу "G" (арболіт + солома) з узагальненим показником потенціалу $V = 0,188$, а найближчим значенням є стіна типу "A" із арболіту з $V = 0,182$. Найгіршим рішенням є конструкція стіни типу "D" із землебиту зі значенням $V = 0,064$, тобто узагальнений показник потенціалу майже втричі менше, ніж найкращий варіант стіни "G".

Для додаткового порівняння оцінених за методом АНР значень узагальненого індексу потенціалу енергоефективності застосовано метод GRA, як описано в рівняннях (3.25) - (3.29). У табл. 3.5 наведено нормовані за рівняннями (3.25) та (3.26) значення досліджуваних параметрів, що характеризують особливості стінових огорожувальних конструкцій за табл. 3.3.

Таблиця 3.5 - Нормалізовані характеристики стінових огорожувальних конструкцій

| Тип конструкції стіни | Загальна величина теплової інерції стіни τ , год | Показник теплової інерції, D | Загальний термічний опір стіни R_{tot} , м ² К/Вт | Внутрішня теплоємність стіни, кДж/м ² К | Маса стіни m , кг/м ² | Вартість стінових матеріалів, €/м ² |
|---|---|--------------------------------|--|--|------------------------------------|--|
| Стіна "A" (Арболіт) | 1.000 | 1.000 | 0.970 | 0.000 | 0.774 | 0.040 |
| Стіна "B" (Саман) | 0.167 | 0.272 | 0.093 | 0.814 | 0.214 | 0.987 |
| Стіна "C" (Солом'яна панель) | 0.053 | 0.091 | 0.798 | 0.628 | 0.919 | 0.030 |
| Стіна "D" (Землебит) | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 1.000 |
| Стіна "E" (Чурко-бетон) | 0.508 | 0.281 | 0.513 | 0.860 | 0.812 | 0.432 |
| Стіна "F" (СП фанера + еко-фібра) | 0.035 | 0.094 | 1.000 | 0.398 | 1.000 | 0.295 |
| Стіна "G" (Арболіт+ солома) | 0.774 | 0.736 | 0.890 | 0.259 | 0.844 | 0.005 |
| Стіна "H" (Енерго-ефективний теплоблок) | 0.217 | 0.334 | 0.857 | 0.287 | 0.916 | 0.000 |

В табл. 3.6 наведено обчислені за формулою (3.27) відхилення величин нормалізованих характеристик стінових огорожувальних конструкцій, що представлено у табл. 3.5, від максимального значення.

Таблиця 3.6 - Відхилення від максимального значення нормалізованих характеристик для розглянутих стінових огорожувальних конструкцій

| Тип стіни | Загальна величина теплової інерції стіни τ , год | Показник теплової інерції, D | Загальний термічний опір стіни R_{tot} , м ² К/Вт | Внутрішня теплоємність стіни, кДж/м ² К | Маса стіни m , кг/м ² | Вартість стінових матеріалів, €/м ² |
|---|---|--------------------------------|--|--|------------------------------------|--|
| Стіна "А" (Арболіт) | 0.000 | 0.000 | 0.030 | 1.000 | 0.226 | 0.960 |
| Стіна "В" (Саман) | 0.833 | 0.728 | 0.907 | 0.186 | 0.786 | 0.013 |
| Стіна "С" (Солом'яна панель) | 0.947 | 0.909 | 0.202 | 0.372 | 0.081 | 0.970 |
| Стіна "D" (Землебит) | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 |
| Стіна "Е" (Чуркобетон) | 0.492 | 0.719 | 0.487 | 0.140 | 0.188 | 0.568 |
| Стіна "F" (СІП фанера +екофібра) | 0.965 | 0.906 | 0.000 | 0.602 | 0.000 | 0.705 |
| Стіна "G" (Арболіт+ солома) | 0.226 | 0.264 | 0.110 | 0.741 | 0.156 | 0.995 |
| Стіна "H" (Енерго-ефективний теплоблок) | 0.783 | 0.666 | 0.143 | 0.713 | 0.084 | 1.000 |

У табл. 3.7 наведено коефіцієнти, що визначені методом сірого реляційного аналізу (GRA) та ранжування альтернатив згідно формул (3.28), (3.29).

Таблиця 3.7 - Коефіцієнти GRA та нормалізовані значення рангу стінових конструкцій

| Тип стіни | Загальна величина теплової інерції стіни τ , год | Показник теплової інерції, D | Загальний термічний опір стіни R_{tot} , м ² К/Вт | Внутрішня теплоємність стіни, кДж/м ² К | Маса стіни m , кг/м ² | Вартість стінових матеріалів, €/м ² | Ранг за GRA | Нормалізоване значення рангу за GRA |
|--|---|--------------------------------|--|--|------------------------------------|--|-------------|-------------------------------------|
| Стіна "А" (Арболіт) | 1,000 | 1,000 | 0,943 | 0,333 | 0,689 | 0,343 | 0,718 | 0,155 |
| Стіна "В" (Саман) | 0,375 | 0,407 | 0,355 | 0,729 | 0,389 | 0,975 | 0,538 | 0,116 |
| Стіна "С" (Солом'яна панель) | 0,346 | 0,355 | 0,713 | 0,574 | 0,860 | 0,340 | 0,531 | 0,114 |
| Стіна "D" (Землебит) | 0,333 | 0,333 | 0,333 | 1,000 | 0,333 | 1,000 | 0,556 | 0,120 |
| Стіна "Е" (Чурко-бетон) | 0,504 | 0,410 | 0,507 | 0,782 | 0,727 | 0,468 | 0,566 | 0,122 |
| Стіна "F" (СПП фанера +екофібра) | 0,341 | 0,356 | 1,000 | 0,454 | 1,000 | 0,415 | 0,594 | 0,128 |
| Стіна "G" (Арболіт+ солома) | 0,689 | 0,654 | 0,820 | 0,403 | 0,762 | 0,334 | 0,610 | 0,131 |
| Стіна "H" (Енергоефективний теплоблок) | 0,390 | 0,429 | 0,778 | 0,412 | 0,856 | 0,333 | 0,533 | 0,115 |

Порівняння отриманих значень узагальненого показника потенціалу енергоефективності стін, що виконаний за двома методами MCDA, наведено на рис. 3.12.

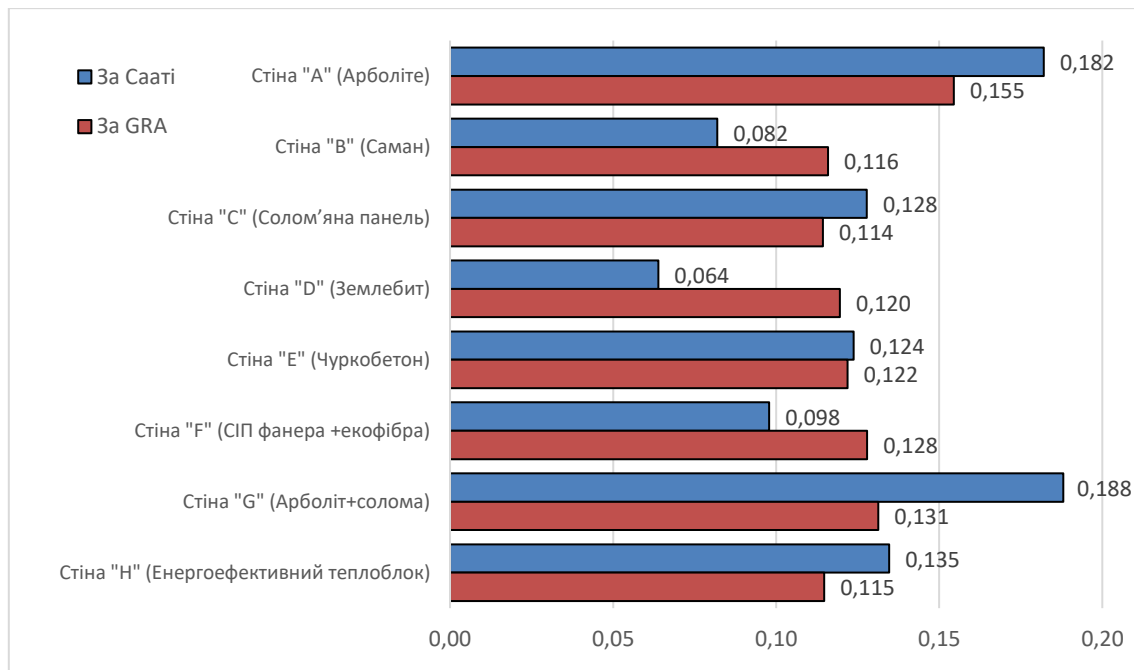


Рисунок 3.12 - Узагальнений індекс потенціалу енергоефективності огорожувальної конструкції за методами АНР та GRA

З аналізу рис. 3.12 можна зробити висновок, що метод АНР показав більш неоднорідні результати, ніж GRA. Можливою причиною цього є різниця в самих методах оцінювання - АНР розглядається як суб'єктивний метод, тоді як GRA є об'єктивним методом порівняння.

Аналіз результатів на рис. 3.12 виявив, що лише стіна типу "Е" (чуркобетон) має мінімальну розбіжність оцінок за двома методиками. Приблизно вдвічі більша різниця в оцінці спостерігається у стін типу "D" (землебит). Ймовірну причину такої різниці у значеннях можна пояснити суб'єктивним оцінюванням, який мав місце в матрицях попарного порівняння методу АНР. Значення, що отримані для стін типу «H», «C» «F», мають незначні відмінності між результатами згідно із запропонованими методиками. З іншого боку, в обох багатокритеріальних методиках порівняння перші місця в ранжуванні займають альтернативи типу стін «А» та «G». Слід зазначити, що чим більше методів MCDA буде залучено до порівняльних досліджень, тим більш об'єктивною буде оцінка результатів визначення потенціалу енергоефективності конкретного типу огорожувальних конструкцій будівель.

Оцінка огорожувальної конструкції з використанням узагальненого індексу потенціалу енергоефективності повинна бути перевірена

та вдосконалена в деяких аспектах, наприклад у доповненні, подальшому розвитку та "правильному" виявленні найбільш значущих критеріїв оцінки (кліматичний фактор, термін експлуатації стінової конструкції / цілої будівлі без капітального ремонту тощо). Процедура оцінки потенціалу енергоефективності огорожувальних конструкцій може бути застосована також у поєднанні з іншими методами MCDA, такими як комбінований метод зважування. Запропонована модель може стати одним із інструментів, який допомагає проєктантам та інвесторам зробити оптимальний вибір в конкретних задачах.

Беручи до уваги різноманітність фізичних, фізико-механічних та економічних параметрів матеріалу для зведення стін, запропонований узагальнений індекс потенціалу енергоефективності огорожувальної конструкції може бути одним із інструментів при обґрунтуванні типу огорожувальних конструкцій. Проведені дослідження показали, що найкращим типом стін з точки зору узагальненого індексу потенціалу енергоефективності є стіна з арболіту та стінка арболіт + солома, майже втричі менше значення індексу виявлено у стіни із землєбиту. Стіни з саману, чуркобетону та солом'яних панелей мають практично однакове значення узагальненого індексу потенціалу енергоефективності. При аналізі результатів виявлено, що метод аналізу ієрархії (АНР) показав більшу неоднорідність результатів, ніж метод сірого реляційного аналізу (GRA). Можливою причиною цього є різниця в техніках оцінювання - АНР позиціонується як суб'єктивний метод оцінювання з матрицями парних порівнянь, тоді як GRA є об'єктивним методом порівняння.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ ДО 3 РОЗДІЛУ

1. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» - К.: ВВР. 2017, №3, с. 5.
2. Ратушняк Г. С., Ратушняк О. Г. Управління проєктами енергозбереження шляхом термореновації будівель: навч. посіб. Вінниця: Універсум-Вінниця, 2006. 120 с.
3. ДБН В.6 – 31:2016. Теплова ізоляція будівель.[Чинний від 2017-05-01]. Вид. Офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2017. – 33 с. (Державні будівельні норми).

4. Семко О. В., Філоненко О. І., Панченко С. П., Мякий Є. І. Спорудження малоповерхових житлових будинків із солом'яних блоків та визначення їх теплотехнічних характеристик. Вісник Придніпр. держ. академ. буд. та арх. Дніпро: ПДАБА. 2013. №8. С. 47–52.
5. Каркасна стінова панель із теплозвукоізоляційних солом'яних блоків, пат. 127505 Україна: МПК E04/C 2/16 заявл. 02.02.2018, опубл. 10.08.2018. Бюл. №15, 7 с.
6. Brojan L., Petric A., Clouston Peggi L. A comparative study of brick and straw bale wall systems from environmental, economical and energy perspectives. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2013. Vol. 8, No. 11. P. 920–926.
7. Фаренюк Г. П. Основи забезпечення енергоефективності будинків та теплової надійності огорожувальних конструкцій. Київ: Гамма-Принт, 2009. 137 с.
8. Ратушняк Г.С. Фактори надійності забезпечення енергоефективності багатошарових теплоізоляційних будівельних виробів із застосуванням соломи // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2018. - №2. – с. 25-30.
9. Stankevicius V. The Effect of stochastically dependent physical parameters on the materials thermal receptivity coefficient / Vytautas Stankevicius, Liutauras Kairys // Materials Science (Medziagton). – Vol. 11. - №2. – 2005. – P. 188-192.
10. Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials / F. Domingues-Munoz, B. Anderson, I.M. Cejudo-Lopez, A. Carrillo-Andres // Eleventh International IBPSA Conference, July 27-30, 2009. – Glasgow. Scotland. – 2009. – P. 1008-1013.
11. Матюшкин Ю. И. Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний / Ю. И. Матюшкин, Б. И. Мокин, А. Л. Ротштейн. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2002. – 145 с.
12. Саати Т. Аналитическое планирование. Организация системы пер. сант. / М.: Радко и связь, 1991. – 224 с.
13. Wang J. J., Jing Y. Y., Zhang C. F., Zhao J. H. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making.

- Renewable and sustainable energy reviews*. 2009. Vol. 13. №9. P. 2263-2278. doi:10.1016/j.rser.2009.06.021.
14. Bläsi W. *Bauphysik*. Bibliothek des technischen Wissens. 3 Auflage. Haan: Verlag Europa Lehrmittel, 2001. 536 p.
 15. Stazi F. *Thermal Inertia in Energy Efficient Building Envelopes*. Butterworth-Heinemann, 2017. doi: 10.1016/B978-0-12-813970-7.00001-7.
 16. Shimray B. A., Singh, K. M., Mehta, R. K. A survey of multi-criteria decision making technique used in renewable energy planning. *International Journal of Computer*. 2017. Vol. 4523. P. 124-140.
 17. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий: монография. Москва: АВОК, 2012. 204 с.
 18. Фаренюк Г. П. Основи забезпечення енергоефективності будинків та теплової надійності огорожувальних конструкцій. Київ: Гамма-Принт, 2009. 137 с.
 19. Wang J. J., Jing Y. Y., Zhang C. F., Zhang X. T., Shi G. H. Integrated evaluation of distributed triple-generation systems using improved grey incidence approach. *Energy*. 2008. Vol. 33. № 9. P. 1427-1437. doi: 10.1016/j.energy.2008.04.008.
 20. Biks Y., Ratushnyak G., Ratushnyak, O. Energy performance assessment of envelopes from organic materials. *Architecture Civil Engineering Environment*. 2019. № 3: 55-67. doi: 0.21307/ACEE-2019-036.
 21. Hopfe C. J., Augenbroe G. L., Hensen J. L. Multi-criteria decision making under uncertainty in building performance assessment. *Building and environment*. 2013. № 69, P. 81-90. doi: 10.1016/j.buildenv.2013.07.019.
 22. Kheiri F. A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 92. P. 897-920. doi: 10.1016/j.rser.2018.04.080
 23. Коршунов О. В., Зуев В. И. Время тепловой инерции термическое сопротивление слоистых стен. *Энергоресурсосбережение и энергоэффективность*. 2011. №4(40). С.23–26.

24. ДБН В.6 – 31:2016. Теплова ізоляція будівель. [Чинний від 2017-05-01]. Вид. Офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2017. 33 с. (Державні будівельні норми).
25. Коршунов О. В., Зуев В. И. Время тепловой инерции термическое сопротивление слоистых стен. *Энергоресурсосбережение и энергоэффективность*. 2011. №4(40). С.23–26.
26. Саати Т. Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети. Москва: К. дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 360 с.
27. Liu S., Yang Y., Forrest J. Grey data analysis. *Springer Singapore*. Singapore, 2017. Vol. 10. №1007. P. 978-981.
28. Daniel S. A. A., Pugazhenthir R., Kumar R., Vijayananth, S. Multi objective prediction and optimization of control parameters in the milling of aluminium hybrid metal matrix composites using ANN and Taguchi-grey relational analysis. *Defence Technology*. 2019. Vol. 15. № 4. P. 545-556. doi: 10.1016/j.dt.2019.01.001.
29. Sarpkaya C., Sabir E. C. Optimization of the sizing process with grey relational analysis. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 2016. №1(115). P. 49-55. doi: 10.5604/12303666.1172087.
30. ДСТУ-Н. Б. В. 2.6-190:2013. Настанова з розрахункової оцінки показників теплостійкості та теплосвоєння огорожувальних конструкцій [Чинний від 2014-01-01]. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014. 40 с. (Державний стандарт України).
31. De Saulles T. Thermal mass explained. Concrete Centre, 2009.
32. Філоненко О.І., Юрін О.І. Будівельна теплофізика огорожувальних конструкцій будівель: навч. посібник. Полтава: Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 2015. 328 с.
33. ДСТУ Б В.2.6. – 189:2013. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ, Мінрегіон України, 2014. 55 с. (Державний стандарт України).

34. Композиційний будівельний теплоблок: пат. 130276 Україна: МПК (2006): E04B 1/00, E04C 2/16 (2006.01). № u201808845; заявл. 20.08.2018; опубл. 26.11.2018, Бюл. № 22. 8 с.
35. Куліченко І. І. та ін. Економічна ефективність використання місцевих екологічних матеріалів в малоповерховому будівництві доступного житла. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. 2013. №.69. С.257-264.
36. A brief guide and free tool for the calculation of the thermal mass of building components. URL: <https://www.htflux.com/en/free-calculation-tool-for-thermal-mass-of-building-components-iso-13786/> (дата звернення 20.09.2020).
37. Clarke J. A., Yaneske P. P., Pinney A. A. The Harmonisation of Thermal Properties of Building Materials. URL: http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/89/thermop_rep.pdf (дата звернення 26.09.2020).