Бікс Юрій Семенович

Кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету, переможець випуску Української Мережі Стартап Шкіл «Sikorsky Challenge», нагороджений почесними грамотами ВНТУ та Вінницької ОДА.

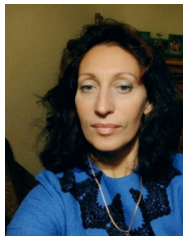
Автор понад 60 науково-методичних праць, у тому числі 14 патентів України на корисну модель, 2 монографій, 4 статей у міжнародних науково-метричних базах.

Ратушняк Георгій Сергійович

Кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерних систем у будівництві Вінницького національного технічного університету, професор Міжнародної Кадрової Академії, академік Академії будівництва України. Заслужений працівник освіти України, лауреат першої міністерської премії «За досягнення в навчально-виховній та науково-педагогічній роботі» та лауреат обласної педагогічної премії.

Автор понад 540 науково-методичних праць, серед яких 9 монографій, 32 підручників та навчальних посібників, 105 авторських свідоцтв та патентів на винаходи. Внесений до іміджевого видання «Кращі науково-педагогічні працівники вищих закладів України». Відзначений Почесними грамотами Академії педагогічних наук України та Державного комітету України з енергозбереження, знаками «Відмінник освіти України» та «За наукові та освітні досягнення».

Лялюк Олена Георгіївна



Кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету. Стипендіат фонду Сороcу, стипендіат Кабінету Міністрів.

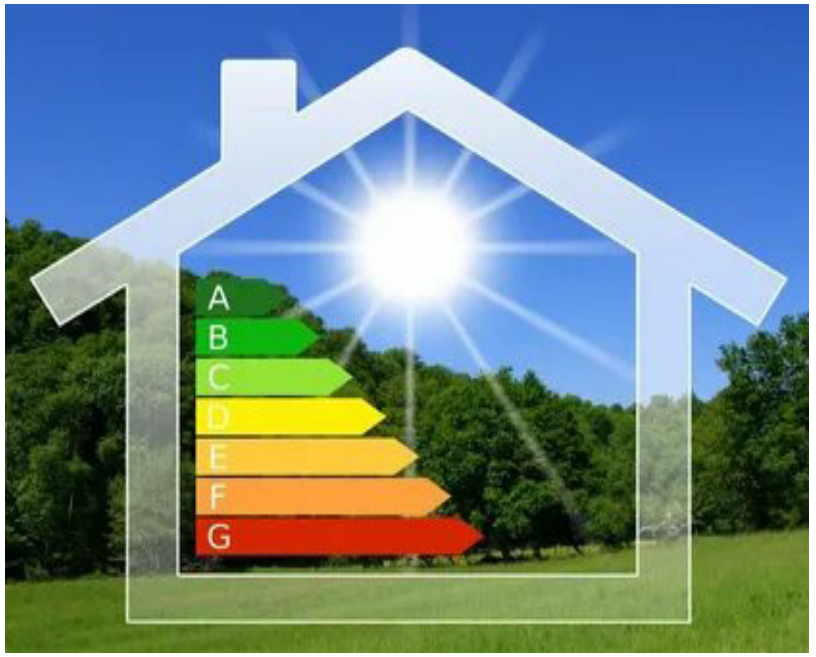
Автор більш ніж 130 наукових публікацій, у тому числі 12 патентів України на корисну модель, 24 методично-навчальних праць, 3 монографій, 2 статей в міжнародних науково-метричних базах.

Ратушняк Ольга Георгіївна

Кандидат технічних наук, доцент кафедри економіки підприємства і виробничого менеджменту Вінницького національного технічного університету. Лауреат премії Верховної Ради України найталановитішим молодим ученим в галузі фундаментальних і прикладних досліджень та науково-технічних розробок, стипендіат президента України.

Автор понад 140 наукових публікацій, у тому числі 8 монографій, 9 навчальних посібників, 7 методичних вказівок та 6 патентів України на корисну модель.

ПОТЕНЦІАЛ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ БІОСФЕРОСУМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

ПОТЕНЦІАЛ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ БІОСФЕРОСУМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2022

УДК 691.12
П64

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 07 від 31.03.2022 р.)

Автори:
Ю. С. Бікс, Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, О. Г. Ратушняк

Рецензенти:
В. М. Желих, доктор технічних наук, професор
А. С. Моргун, доктор технічних наук, професор

Потенціал енергоефективності огороджувальних конструкцій із біосферосумісних матеріалів / Ю. С. Бікс, Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, О. Г. Ратушняк. — Вінниця: ВНТУ, 2022. — 132 с.
П64

ISBN 978-966-641-903-6

Розглянуто чинники впливу на потенціал енергоефективності огороджувальних конструкцій будівель з теплоізоляційних матеріалів на засадах біосферосумісності. Наведено результати аналітичних та експериментальних досліджень визначення теплопровідності теплоізоляційних матеріалів рослинного походження. Запропоновано математичну модель оцінки надійності забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів. Наведено результати чисельного дослідження з використанням методів аналізу ієрархій, сірого реляційного аналізу, теорії критерійного значення та з врахуванням показника теплової інерції з обґрунтування оптимального типу й матеріалу огороджувальних конструкцій будівель за умов біосферосумісності.

УДК 691.12

ISBN 978-966-641-903-6

© Ю. Бікс, Г. Ратушняк, О. Лялюк, О. Ратушняк, 2022

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА 5
РОЗДІЛ 1 ЧИННИКИ ВПЛИВУ НА ПОТЕНЦІАЛ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ 8
1.1 Основні вимоги до енергоефективності будівель..... 8
1.2 Оцінювання енергоефективності огороджувальних конструкцій будівель при забезпеченні мікроклімату приміщень 12
1.3 Еколого-економічні механізми реалізації біосферо-сумісного будівництва з використанням матеріалів відходів виробництва 19
1.4 Оцінка ризиків при виборі механізму реалізації енергозберігаючого проекту 34
1.5 Напрямки подальшого розвитку досліджень з оцінювання потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій із біосферосумісних матеріалів.....38
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ ДО 1 РОЗДІЛУ 41
РОЗДІЛ 2 ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ОРГАНІЧНИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ 51
2.1 Фактори впливу на теплотехнічні властивості теплоізоляційних матеріалів рослинного походження 51
2.2 Методи та обладнання для дослідження теплопровідності теплоізоляційних матеріалів рослинного походження 56
2.3 Установка для дослідження теплопровідності теплоізоляційних матеріалів рослинного походження 63
2.4 Експериментальні дослідження теплопровідності соломи, як теплоізоляційного матеріалу рослинного походження 72
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ ДО 2 РОЗДІЛУ 84
РОЗДІЛ 3 БАГАТОФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ БІОСФЕРОСУМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ 87
3.1 Моделювання надійності забезпечення ефективності теплоізоляційних матеріалів рослинного походження 87

3.1.1 Методи оцінки надійності забезпечення ефективності матеріалів при влаштуванні теплоізоляційної оболонки будівель 87
3.1.2 Моделювання надійності забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів із соломи з використанням лінгвістичних змінних 90
3.2 Багатокритеріальна оцінка потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій будівель 98
3.2.1 Теоретичні засади багатокритеріальної оцінки потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій будівель .. 98
3.2.2 Чисельний аналіз моделювання оцінки потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій будівель ... 104
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ ДО 3 РОЗДІЛУ 123
ВИСНОВКИ 129

ПЕРЕДМОВА

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

Матеріали для влаштування непрозорих огороджувальних конструкцій будівель характеризуються різноманітними кількісними та якісними параметрами. Досягнення методів системного аналізу з використанням імітаційного та математичного моделювання є конструктивним інструментом комплексної оцінки матеріалів, що використовуються для влаштування теплоізоляційної оболонки будівель із заданими оптимальними теплотехнічними, екологічними та економічними властивостями.

Перспективним напрямком досліджень потенціалу енергоефективності огороджувальних 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 розв’язання цієї задачі є використання багатокритеріальних методів аналізу впливу факторів при прийнятті рішень відносно конструктивно-технологічного влаштування теплоізоляційної оболонки будівлі.

Інноваційним рішенням в будівництві малоповерхових енергоефективних житлових будинків є використання багатошарових огороджувальних 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 нового та термомодерніза-

ції існуючого малоповерхового житла потребує теоретичного та експериментального обґрунтування науково-методологічного механізму досліджування потенціалу енергоефективності огороджувальних 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 потенціалу енергоефективності 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.

Розглянуто шляхи вдосконалення еколого-економічних механізмів біосферосумісного будівництва з використанням матеріалів з відходів виробництва. Запропоновано структурно-логічну модель управління відходами виробництва при біосферосумісному будівництві. Оцінено можливі ризики при реалізації проектів з підвищення енергоефективності огороджувальних конструкцій із біосферосумісних матеріалів.

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 вектора теплового потоку та вологості матеріалу. Охарактеризовано методи та обладнання для дослідження параметрів теплопровідності теплоізоляційних матеріалів рослинного походження.

Запропоновано інноваційну конструкцію установки для визначення параметрів 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 математичного апарату нечіткої логіки та лінгвістичних змінних, яка дозволяє здійснювати інтелектуальну підтримку конструктивно-технологічних рішень при влаштуванні теплоізоляційної оболонки будівель. Наведено результати чисельного дослідження з використанням методів аналізу ієрархій, сірого реляційного аналізу, теорії важливості критеріїв, а також з врахуванням показника теплової інерції з обґрунтування оптимального типу й матеріалу стін та їхньої товщини за умов біосферосумісності. Такий багатокритеріальний аналіз дозволяє оцінити потенціал енергоефективності різних типів конструктивного виконання огороджувальних конструкцій з врахуванням їхніх теплофізичних, економічних та екологічних параметрів.

РОЗДІЛ 1 ЧИННИКИ ВПЛИВУ НА ПОТЕНЦІАЛ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ

1.1 Основні вимоги до енергоефективності будівель

Правові, соціально-економічні та організаційні засади діяльності в різних галузях економіки 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 умови 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. Відповідно до «Національного плану дій з енергоефективності на період до 2030 року», затвердженого Кабміном України в 2021 році передбачено комплексний підхід з термомодернізації у всіх сферах економіки.

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 [3]. При проектуванні пасивних будівель класу А необхідно втілювати інноваційні технології при влаштуванні енергоефективних зовнішніх огороджувальних конструкцій та генерації відновлювальної й альтернативної енергії інженерних систем із забезпечення нормованих параметрів мікроклімату приміщень.

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} $[(g_{буд} \cdot E_{max})/E_{max}] \cdot 100\%$
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

$$EP \leq EP_{max}, \tag{1.1}$$

де EP – розрахункова або фактична питома річна енергопотреба будівлі, кВт/год/м^2; EP_{max} – максимально-допустиме значення питомої річної енергопотреби будівлі, кВт/год/м^2 (табл. 1.2).

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

$$EP = (Q_{on} + Q_{ox} + Q_{гв})/A_f, \tag{1.2}$$

де Q_{on}, Q_{ox}, $Q_{гв}$ – відповідно річна енергопотреба будівлі на опалення, охолодження та гаряче водопостачання, кВт·год;

A_f – кондиціонована (опалювана) площа житлової будівлі, м^2.

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

Житлові будівлі поверховістю	Значення EP_{max} для температурної зони України, 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 їхньої енергоефективності з врахуванням споживання енергії на опалення та охолодження наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Класифікація будівель для оцінки їхньої 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 споживання енергії	60
Пасивні будівлі	15
Будівлі нульової енергії	0
Будівлі плюс енергія	Виробляють більше енергії, ніж самі споживають (встановлено сонячні батареї та колектори, теплові насоси, рекуператори, 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 та теплоізоляційних матеріалів [4] при влаштуванні огороджувальних 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 до даних Міжнародної енергетичної агенції 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 викопних 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 та підвищення конкурентоспроможності проектів будівництва.

Вітчизняна будівельна галузь в умовах сталого розвитку суспільства, як передбачено в стратегічних програмних документах, повинна розвиватися з врахуванням концепції проектування урбаністичного середовища та енергоефективності експлуатації кінцевої будівельної продукції протягом життєвого циклу проекту. Реалізація цих задач можлива з використанням інноваційних технологій на засадах біосферосумісного будівництва, що передбачає мінімізацію використання первинних природних ресурсів та максимального використання вторинних матеріалів та рециклінгу.

Для власників житлових будівель підвищення енергоефективності огороджувальних конструкцій дозволяє збільшити рівень доходів і зменшити витрати на закупівлю енергетичних послуг. Для суспільства загалом – це шлях наближення до сталого розвитку, що буде сприяти модернізації інвестиційно-будівельного циклу.

Підвищення енергоефективності будівель з використанням біосферосумісних матеріалів буде сприяти попередженню негативних змін компонентів природнього середовища.

1.2 Оцінювання енергоефективності огороджувальних конструкцій будівель при забезпеченні 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 зі створення теплоізоляційної оболонки будівель [6, 9, 10– 12, 21–28, 30, 31, 39, 44, 67, 68].

В монографії В. О. Семко [9] значну увагу приділено методам оцінювання теплотехнічних властивостей несучих та огороджувальних конструкцій зі сталевих холодноформованих тонкостінних профілів. Розглянуто питання визначення імовірності теплової відмови огороджувальних конструкцій зі сталевих холодноформованих елементів.

В роботі С. П. Шаповала [69] досліджено системи теплозабезпечення енергоефективних будівель на основі зовнішніх огороджень-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 розглядається в роботі В. М. Желиха [70]. Запропоновано шляхи підвищення енергоефективності будівель виробничих комплексів при створенні нормативних параметрів мікроклімату в них.

В роботі Ю. С. Бікса, Г. С. Ратушняка [46] розглянуто стан, особливості і перспективи підвищення енергоощадності малоповерхових будівель шляхом використання термічно неоднорідних непрозорих огороджувальних конструкцій. Проаналізовано основні переваги та недоліки використання теплоізоляційних матеріалів органічного походження при влаштуванні огороджувальних конструкцій. Запропо-

новано 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 В. О. Єгорченкова [71]. Запропоновано математичну модель нестандартних огороджувальних конструкцій для формування комфортного багатопараметричного середовища будівель. Також одержано принципи багатопараметричної оцінки варіантів огороджувальних конструкцій за різними параметрами середовища приміщень.

Шляхи вирішення актуальної проблеми формування теплофізичних властивостей макропористих теплоізоляційних матеріалів та елементів конструкцій теплового захисту шляхом регулювання процесу тепломасообміну в пористих структурах наведено в роботі А. О. Чеймитко [72]. Також встановлено закономірності динаміки формування теплофізичних властивостей пористої структури глиноземних матеріалів залежно від термодинамічних параметрів та вологості сировинної суміші при її термообробці.

Енергоефективні системи забезпечення кліматичних умов у приміщеннях з використанням різних видів відновлювальних джерел енергії досліджено в роботі Л. В. Накашидзе [73]. Розроблено методологію експериментального моделювання для визначення енергетичних параметрів енергоефективних огороджень.

За результатами теоретичних, експериментальних і натурних досліджень систем формування внутрішнього мікроклімату приміщень В. Б. Довгалюком [74] запропоновано шляхи вирішення науково-прикладної проблеми з обґрунтування принципів розвитку енергоефективних технологій забезпечення нормованих параметрів мікроклімату в приміщеннях. Запропоновано алгоритм системи керування температурно-вологісним режимом, що базується на узагальненому індексі дискомфорту повітряного середовища.

Наукове обґрунтування енергоощадних технологій формування динамічного мікроклімату у приміщеннях детально досліджено О. Т. Возняком [75, 76]. Запропоновано метод отримання багатофак-

торних емпіричних залежностей для розрахунку повітророзподілу для забезпечення необхідних параметрів мікроклімату в приміщеннях.

Теоретичне і експериментальне обґрунтування удосконалених методів і способів підвищення енергоефективності централізованих систем теплопостачання при зміні технології та організації спалювання альтернативних палив наведено в роботі І. О. Редька [77]. Запропоновано методику моделювання та оптимізації параметрів температурного графіка теплової мережі з використанням в якості критерію оптимальності мінімальне ентропію.

На основі теоретичних і експериментальних досліджень В. О. Мілейковського [78] вирішено науково-прикладну проблему обґрунтування теорії упорядкованої великомасштабної структури струмини. Це дозволяє 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 огороджувальних конструкцій досліджено О. М. Недбайлом [8, 82]. За результатами математичного моделювання визначено питомі теплові втрати будівлі в холодний період року для комбінованої огороджувальної конструкції з повітряним прошарком, запропоновано концептуальні передумови розробки енергоефективних та пасивних будівель нового покоління з високими експлуатаційними можливостями.

Науковоме обґрунтування теоретично-методологічних і прикладних засад через запровадження концептуально-інвайроментного інструментарію управління енергозбереженням на будівельних підприємствах розглядається в роботі М. М. Климчук [83]. 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 Д. О. Чернишева [12]. Для оцінювання біосферної сумісності архітектурно-будівельних об’єктів запропоновано показник біосферосумісності, який розрахову-

ється за формулою

$$Z_{bs} = (Z_i m_i) = ZM_1 mM + Z\text{Б}m\text{Б} + Z\text{Ж}m\text{Ж} + Z\text{Д}m\text{Д}, \qquad (1.3)$$

де ZM – показник біосферної сумісності матеріалів та виробів заводського виготовлення, з яких побудовано будівлю; ZБ – показник біосферної сумісності етапу будівництва будівлі; ZЖ – показник біосферної сумісності етапу експлуатації будівлі; ZД – показник біосферної сумісності етапу демонтажу та утилізації матеріалів і конструкцій, з яких була збудована будівля; m={mM; mБ; mЖ; mД} – вагові коефіцієнти відповідних показників, які визначаються експертним методом з використанням узагальненого досвіду фахівців-експертів.

Дослідженнями В. В. Ковальова [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 обмеженнях з урахуванням вимог до енергоефективності, безпечності та екологічності об’єктів і прийнятого рівня ризиків.

В роботі Т. М. Ткаченко [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 огороджувальних конструкцій будівель.

Дослідження М. А. Максименко [84] присвячені вирішенню актуальної задачі щодо підвищення термічного опору дрібнорозмірних стінових утеплюючих виробів за рахунок використання невентильованих повітряних прошарків, екранованих фольгованим матеріалом. Експериментально підтверджено збільшення термічного опору будівельних виробів внаслідок використання екранованої ізоляції. Виявлено закономірності розповсюдження температурних полів у замкнених повітряних прошарках, розділених тепловідбиваючим екраном, а також під-

тверджено, що закономірність розповсюдження теплового потоку не залежить від матеріалу оболонки виробу. Запропоновано конструкцію теплоізоляційної плитки, яка складається із передньої, задньої та бічної стінок з екструдованого пінополістиролу або полімернопіщаної суміші, порожнина між якими заповнена нерухомим шаром, розділеним на два прошарки тепловідбиваючим екраном.

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 Г. В. Шпакової [67]. Запропонована цільова функція визначення оптимального показника біосферосумісності в часі у векторному вигляді [67]

$$Z_{bs} = Z_{bs}^{ce}(x_i) + Z_{bs}^{cx}(y_i) + Z_{bs}^{ve}(z_i), \qquad (1.4)$$

де $Z_{bs}^{ce}(x_i), Z_{bs}^{cx}(y_i), Z_{bs}^{ve}(z_i)$ – 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).

Г. В. Шпакова підкреслює [67], що біосферосумісне будівництво повинно передбачати забезпечення всіма стейкхолдерами інвестиційно-будівельних деволоперських проектів та реалізацій заходів з екологічної стабільності будівельних об'єктів за рахунок підвищення довговічності та надійності теплоізоляційної оболонки будівель. Крім того, еколого-економічною доцільністю є використання теплоізоляційних матеріалів органічного походження та рециклінгу уже раніше використаних матеріалів.

В роботі Ю. А. Табунщикова, Ю. А. Бородача [86] на підґрунті принципів системного аналізу будівлі як єдиної теплоенергетичної

системи запропоновано методику побудови математичної моделі будівлі. При моделюванні використано декомпозицію трьох основних теплоенергетично взаємопов'язаних підсистем: енергетичною дією зовнішнього клімату на оболонку будівлі; енергією, що міститься в оболонці будівлі; енергією, що міститься всередині об'єму будівлі. Також запропоновано принципи проектування енергоефективних будівель, що ґрунтуються на використанні оптимізаційних математичних моделей системного аналізу з врахуванням використання інноваційних рішень, які технічно можливі та економічно, екологічно і соціально обґрунтовані. Наведено методологічні засади побудови математичної моделі управління тепловим режимом інтелектуальної будівлі. Пріоритетність при виборі енергозберігаючих технологій необхідно надавати технічним рішенням, які одночасно сприяють поліпшенню мікроклімату приміщень та захисту навколишнього середовища.

В. Н. Немченко, М. В. Посаненков [87] запропонували інженерну методику оперативної оцінки енергоефективності будинків, що дозволить виконати ранжування об'єктів за класом енергоефективності. При цьому використано індикаторний підхід до оцінювання порівняльної енергоефективності за інтегральним енергоспоживанням будівлі, використовуючи метод багатокритеріального оцінювання. Цільова функція максимінізованого функціонування енергоефективності опалення визначається з врахуванням позитивних вагових коефіцієнтів вхідних та вихідних параметрів структурної моделі енергоефективності будівлі.

В. К. Савин [88] виконав аналіз з оцінки енергозбереження при будівництві та експлуатації споруд та запропонував ідеологію й підходи до визначення енергетичної ефективності будівель. За результатами теоретичних обґрунтувань запропоновано враховувати шість основних параметрів процесу переходу первинної енергії через огороджувальні конструкції в космос: кліматичний район будівництва; мікроклімат приміщення; теплозахист; довговічність й енергоємність конструкції; геометричні розміри площі зовнішньої огороджувальної конструкції та підлоги. Багатокритеріальний аналіз з одноразовим врахуванням сумарних мінімальних витрат енергії на будівництво й експлуатацію будівель буде сприяти підвищенню їхньої енергоефективності.

Дослідженнями В. К. Савіна, Н. В. Савінової [89] за результатами багатокритеріального аналізу встановлено залежність енергетичної ефективності будівель від формоутворюючих факторів. Підкреслено, що ускладнення конфігурації будівель за рахунок більш розвинутої поверхні зовнішніх огороджувальних конструкцій, що характеризується коефіцієнтом компактності, збільшує сумарні питомі витрати енергії, а збільшення кількості поверховості зменшує енергозатрати будівель.

В монографії В. К. Савина [90] розглянуто стратегію сучасного розвитку будівельної енергофізики та нову цифрову модель енергетичного оцінювання житлових будівель. Запропоновано критерії для автоматизації процесів в будівництві, що дозволяють визначити енергетичну складову будівлі, її форму, розміри та поверховість, а також клімат району. Наведено розрахунки мінімізації енергозатрати будівлі на всіх етапах життєвого циклу, включно з демонтажем конструкцій будівлі та їх утилізації.

В монографії Г. С. Ратушняк, О. Г. Ратушняк [7] розглянуто загальні положення про управління проектами енергозбереження та методи моделювання еколого-економічних ризиків в управлінні проектами підвищення енергоефективності будівель. Наведено механізми управління проектами енергозбереження, моніторинг матеріалів для термореновації захисних конструкцій будівель з метою підвищення їхньої енергоощадності та методика еколого-економічної оцінки інвестиційних проектів з підвищення енергоефективності будівель з врахуванням кількісних та якісних параметрів теплоізоляційних будівельних матеріалів при влаштуванні огороджувальних конструкцій будівель. Пропонується методика інтелектуальної підтримки проектних рішень при впровадженні інноваційних енергозберігаючих технологій при влаштуванні теплоізоляційної оболонки будівель.

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

- питомі тепловтрати на опалення будівлі за опалювальний період, кВт·год/м^2;
- загальний коефіцієнт теплопередачі теплоізоляційної оболонки будівлі, Вт/(м^2·К);

- приведений коефіцієнт теплопередачі теплоізоляційної оболонки будівлі, Вм/(м^2·К);

- умовний коефіцієнт теплопередачі огороджувальних конструкцій будівлі, Вт/(м^2·К);

- безрозмірний показник теплової інерції огороджувальних конструкцій будівлі;

- показник імовірності теплової відмови огороджувальних конструкцій будівлі;

- середня кратність повітрообміну за опалювальний період;

- коефіцієнт скління фасадів огороджувальних конструкцій будівлі.

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

1.3 Еколого-економічні механізми реалізації біосферосумісного будівництва з використанням матеріалів відходів виробництва

Виробники будматеріалів з метою заощадження коштів використовують відходи виробництва хімічної та металургійної промисловості та сільськогосподарського виробництва [1]. Важливо вибирати для будови та ремонту натуральні біосферосумісні матеріали з врахуванням частки екологічно налаштованих споживачів, яка становить 10–12 %. З метою заміни поведінки споживача будівельної галузі через посилення екологічних переваг. Суттєвим механізмом є вдосконалення екологічного маркетингу в будівництві [92].

Будівельні матеріали поділяють на три категорії – нейтральні, лікувальні та шкідливі [93]. Раціональне використання будівельних матеріалів передбачає знання їхніх властивостей, способів одержання,

правил зберігання і транспортування, а також умови їхньої роботи в конструкціях і спорудах.

Властивістю матеріалу є здатність певним чином реагувати на окремий або в сукупності з іншими зовнішній або внутрішній фактор. Властивості матеріалів визначаються особливостями будови та властивостями тих речовин, з яких складається цей матеріал. Будова і склад природних матеріалів залежать від їхнього походження і умов утворення, а для штучних – від технології виробництва і обробки.

Властивості будівельних матеріалів, що зумовлюють їхню якість і області застосування, за сукупністю ознак поділяють на фізичні, механічні, хімічні та технологічні.

Властивості матеріалів оцінюють кількісно за числовими показниками, визначеним шляхом випробувань за певними методиками, передбаченими Державними Стандартами або технічними умовами [94, 95]. При купівлі будівельного матеріалу споживач повинен перевірити сертифікат якості та паспорт.

Екомаркетинг у будівництві зв'язаний зі споживачами та його потребами і може впливати на збільшення еконалаштованих споживачів. Основні задачі екомаркетингу в будівельній галузі: сприяння збільшення споживання будівельної продукції через удосконалення екологічних переваг; покращення сприйняття будівельної продукції.

Набір переваг-характеристик будівельних матеріалів може оцінюватися з використанням рівняння [95]

$$E_j = \sum_{i=1}^{m} e_i \cdot \omega_i \,, \tag{1.5}$$

де ω – оцінка переваг споживачами; e – величина споживчого потенціалу продукту; m – кількість переваг.

Основні характеристики будівельних матеріалів, за якими оцінюють їхню небезпечність, вплив на здоров'я та довкілля такі:

– горючість: негорючі (НГ) та горючі (Г) – групи Г1 (слабо горючі), Г2 (помірно горючі), Г3 (нормально горючі) і Г4 (сильно горючі);

– токсичність (отруйність);

– природні (неорганічні), штучні або синтетичні (неорганічні та органічні);

– мінеральний, хімічний склад;

– наявність шкідливих легких речовин, розчинних в повітрі;

– наявність шкідливих пилоподібних речовин;

– акустичне (шумове) забруднення;

– тепловіддача та всі параметри мікроклімату, включаючи інтенсивність теплового випромінювання.

– випромінювання іонізуючі і не іонізуючі, поля електромагнітні, електростатичні та наявність радіонуклідів.

Екомаркетинг передбачає розробку стратегії – це довгострокові плани поведінки на початковій фазі життєвого циклу проекту енергозбереження, а саме:

1) по відношенню до різних ланок ринку, до конкурентів та до часу. Відбувається сегментування ринку на основі характеристик продуктів та споживачів;

2) по відношенню до конкурентів. Розробляється диференціація та зайняття ринкової ніші;

3) по відношенню до часу. Розрізняють стратегії лідерства та орієнтації на лідера.

Інструменти маркетингу закладаються в екологічно-портфельному аналізі, в якому оцінюються різні екологічні стратегії з урахуванням:

А – величини переваг, які отримає підприємство від своїх природоохоронних заходів;

В – величини небезпечного забруднення довкілля в результаті виробничої діяльності.

На практиці використовують різні комбінації інструментів:

– A_{min}, B_{max}, мінімізація витрат, що зумовлює вихід з ринку;

– A_{min}, B_{min};

– A_{max}, B_{max} – діяльність необхідно спрямувати на впровадження інновацій з метою зайняття ринкових ніш;

– A_{max}, B_{min}.

Екомаркетинг передбачає чотири рівня якості оцінювання продукції:

– висока якість основної корисності товару, що дозволить допустимість споживання, довготривалість, можливість технічного обслуговування, смак, зовнішній вигляд;

– екологічна якість продукту в цілому через відсутність шкідливих речовин, що дозволить використання природних матеріалів, умов експлуатації, що не шкодить довкіллю;

– екологічна якість виробництва з мінімумом використання матеріалів, енергії, заміни дефіцитних ресурсів, зниженням викидів та відходів;

– екологічна якість усунення відходів з метою використання продуктів, які можуть бути вторинною будівельною сировиною.

Соціально-екологічні характеристики будматеріалів:

– економічні показники (ціна, гарантійні умови, допоміжні послуги);

– естетичні показники (якість дизайну);

– функціональні (строк служби, область застосування);

– екологічне маркування та дизайн, як символ товару;

– екологічні показники (вплив на здоров’я, витрати енергії, безпечне робоче місце).

Інструменти та механізми управління екомаркетингу в будівельній галузі:

– політика збуту будівельної продукції;

– логістика, тобто управління та контроль за рухом матеріальних ресурсів;

– комунікативна політика, що передбачає рекламу, повідомлення споживачів про стан фірми, якості наданих послуг;

– формування ціни на екопродукти, які повинні бути доступними для споживача і він готовий придбати продукцію;

– еко-спонсоринг, як форма співтовариства між будівельними компаніями та екологічними організаціями;

– еко-тайнмент, що застосовується в розвинених країнах з насиченим розвитком реклами та створення центрів задоволення, де покупці не тільки купують товари, а й стають учасниками дозвілля;

– еко-лізинг, як оренда з правом викупу будівельної продукції;

– моделювання процесів створення екологізованого будівельного виробництва на принципах біосферосумісності [96, 97].

Темпи загального будівництва збільшуються, а отже зменшується кількість вільних незабудованих територій. У зв'язку з цим фізично та морально старі будівлі підлягають знесенню з метою звільнення необхідної кількості площ під будівництво нових об’єктів. Виникає необхідність вирішувати питання утилізації будівельних відходів, отриманих у ході демонтажу будівель і споруд. Щорічний обсяг будівельних відходів тільки з бетону і залізобетону в Києві складає близько 300 тис. т [91]. На сьогоднішній день міські звалища заповнені на 90 %, вивозити будівельне сміття стає дорого та нікуди.

Будівельне сміття становить 10–30 % усіх відходів світу. Щорічно в сучасному світі кількість будівельних відходів збільшується на 2,5 млрд тонн (за даними фахівців з Європейської Асоціації, до якої входять компанії по знесенню будівель). Наприклад, у Великобританії з метою збереження природних ресурсів і стимулювання повторної переробки введено податок на застосування кожної тонни природного заповнювача у розмірі 1,6 фунта стерлінгів. У Нідерландах вже близько 10 років діє закон, що забороняє звозити на полігони будівельні відходи, які можна переробити. Багато інших країн при прийомі відходів на полігони потребують офіційних доказів того, що відходи переробці не підлягають. Для повноцінного розвитку технологічних процесів необхідне потужне законодавство, в якому б утворення несанкціонованих звалищ жорстко переслідувалося за законом, тобто вивіз відходів на полігони був би або економічно невигідний, або взагалі заборонений. Переробка відходів повинна бути не тільки екологічно доцільна, але і економічно ефективною.

Утворено відходів в сфері капітального будівництва за 2015 рік 89,9 тис. т (рис. 1.1) [91]. Щорічний обсяг будівельних відходів тільки з бетону і залізобетону в Києві складає близько 300 тис. т, а міські звалища, як зазначалося вище, заповнені на 90 %.

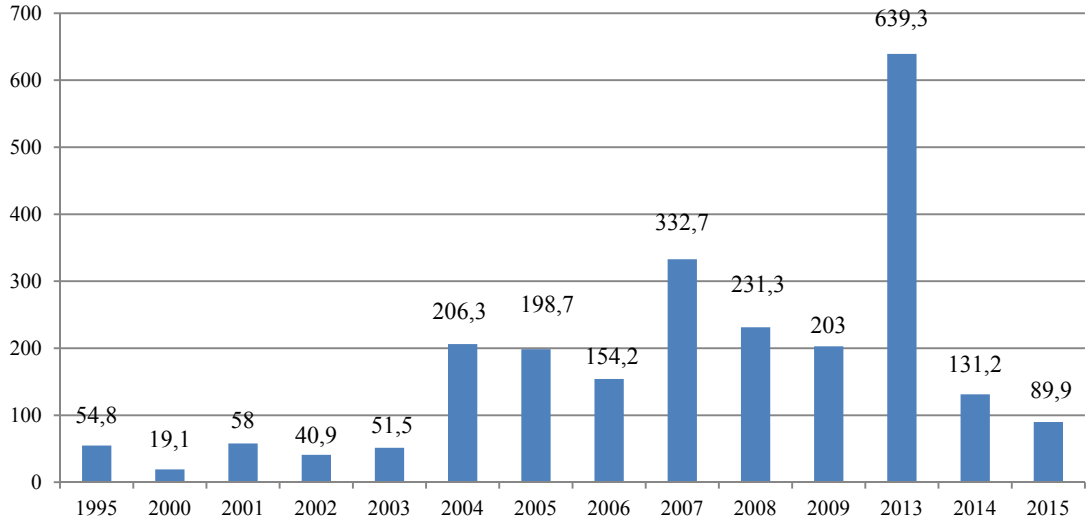


Рисунок 1.1 – Утворення відходів в будівництві, тис. т/рік

Рециклінг дозволяє утилізувати будівельні відходи, не завдаючи шкоди навколишньому середовищу [92]. В Європейських країнах і в Америці проблема утилізації відходів вже давно вирішується на державному рівні. В деяких країнах взагалі заборонені будівельні звалища, а в Америці і Канаді вони ще існують, але вартість вивезення туди таких відходів значно перевищує вартість їхньої переробки. У більшості держав вже зараз частка переробки будівельних відходів складає в середньому близько 50 % від загального обсягу виробництва будматеріалів. За рахунок вдосконалення технологій і законодавства змогли досягти дуже високого рівня переробки будівельних відходів такі країни, як Данія, Голландія, Швеція, де в даний час переробляють понад 90 % відходів.

Економія при переробці будівельного сміття досягається тим, що ці відпрацьовані матеріали немає потреби перевозити з місця демонтажу, тобто нести витрати на навантаження, транспортування і розвантаження. Покупці битої цегли, вторинного щебеню та інших будівельних відходів самі приїжджають до місця демонтажу споруд і вивозять все, що їм потрібно для будівництва. Необхідно також врахувати, що в місцях демонтажу будівель майже завжди передбачається будівництво нових, де буде потреба у вторинних будівельних матеріалах.

Вторинна сировина не завжди є повноцінним будівельним матеріалом та має обмежену сферу застосування.

Для повноцінного розвитку технологічних процесів необхідно потужне законодавство, при якому утворення несанкціонованих звалищ жорстко переслідується за законом, тобто вивіз відходів на полігони або економічно невигідний, або взагалі заборонений. Переробка відходів повинна бути не тільки екологічно доцільною, але і економічно ефективною. Наприклад, у Великобританії з метою збереження природних ресурсів і стимулювання повторної переробки введено податок на застосування кожної тонни природного заповнювача у розмірі 1,6 фунта стерлінгів. У Нідерландах вже близько 10 років діє закон, що забороняє звозити на полігони будівельні відходи, які можна переробити. Багато інших країн при прийомі відходів на полігони вимагають офіційних доказів того, що відходи переробці не підлягають.

Управління відходами включає заходи з поводженням відходів та попередженням їх утворення. Основним напрямком зниження об'ємів утворення відходів є розробка та застосування на практиці ресурсозберігаючих технологій.

Відповідно до прав європейських країн є ієрархія принципів поводження із відходами: 1) уникнення появи відходів; 2) переробка та вторинне використання; 3) знешкодження з урахуванням інтересів довкілля [92].

Ефективно організована логістика уникнення відходів на будівельному виробництві дозволить знизити витрати на управління відходами, збільшить доходи від первинних і вторинних залишків матеріалів. Логістика передбачає диференціацію відходів, їх вторинне використання, знищення, проблеми транспортування, складування, розробку ресурсозберігаючих та маловідходних технологій. Незважаючи на примусовий характер впровадження на підприємстві таких дій, вони є ефективними та економічними.

Впровадження на будівельних підприємствах строгих міжнародних стандартів з екологічного менеджменту ISO 14001 та ISO 14010 «Загальні вказівки з екологічного аудиту» поліпшать систему керування відходами [93, 94]. Плани екологічного менеджменту мають охоплювати такі заходи, які спрямовані на поліпшення еколого-економічних показників виробництва:

• зниження ресурсоємності та енергоємності технологічних процесів;

• зниження токсичності сировини, що використовується;

• підвищення ефективності наявних та впровадження сучасних систем очищення викидів шкідливих речовин в атмосферу та скидів стічних вод у водні об'єкти;

• утилізація й перероблення виробничих відходів;

• організація й проведення поточного контролю джерел та обсягів надходження шкідливих речовин у навколишнє середовище;

• впровадження сучасних «екологічно чистих» технологій і технологічного обладнання.

На всіх етапах життєвого циклу створення будівельної продукції повинно бути передбачено заплановане та послідовне здійснення організаційних, правових та технічних заходів природоохоронного, ресурсозберігаючого та ресурсо-відтворюючого характеру на основі моделі інтегрованого еколого-економічного управління [95–102]. Головною метою цієї моделі є забезпечення мінімальних екологічних витрат при існуючому технічному розвитку будівельного виробництва.

Управління відходами включає заходи з поводженням відходів та попередженням їхнього утворення. Основним напрямком зниження об'ємів утворення відходів є розробка та застосування на практиці ресурсозберігаючих технологій відповідно до стратегічних пріоритетних напрямків інноваційної діяльності на 2011–2021 роки, які передбачені в законі України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні». Наприклад, використані пластмасові пляшки можна закладати в якості утеплювача стін. Найбільш поширеними методами вирішення проблеми збільшення відходів було депонування та спалювання, які є екологічно небезпечними. При депонуванні можуть відбуватися різні реакції між змішаними відходами із надходженням шкідливих речовин в атмосферу. Спалювання збільшує концентрацію токсичних речовин, призводить до викидів діоксинів, ртуті. Уникнути утворення відходів неможливо, тому слід кваліфіковано їх знешкоджувати: роздільний збір, рециклінг. Наприклад, біла жерсть може на 100 % підлягати рециклінгу, в Німеччині – на рівні 80 %. За допомо-

гою переробки будівельного сміття друге «життя» знаходять багато матеріалів — це і деревина, і коріння викорчуваних дерев, і залізобетонний лом, і пластик, і скло, і старі шини, також цегельний бій і багато інших матеріалів.

Застосування будівельних відходів

Вторинна сировина не є повноцінним будівельним матеріалом, вона має низьку вартість та обмежену сферу застосування. Після демонтажу споруд, на майданчику залишається переважно залізобетон, який сортується за допомогою спеціальної техніки. Занадто великі шматки подрібнюються на більш дрібні за допомогою гідромолота або гідроножиць.

Бетон, перероблений в щебінь, служить для засипки боліт і котлованів, а також для створення тимчасових доріг. Асфальт повторно застосовують у будівництві доріг, але спочатку його термічно обробляють при дуже високій температурі. Арматура так само повторно використовується в будівництві. Брак і склобій можна відправляти на переплавлення. Можливе застосування склобою в якості наповнювача в дорожньому будівництв для одержання будівельної кераміки, ударна міцність якої складає 0,83 кг/см^2. Цегла з використанням склобою (до 50–90 %) може застосовуватися в суворих кліматичних умовах.

Відходи з дерева (на сьогодні 15 % піддаються переробці) можна використовувати після роздрібнення для одержання деревинно-цементної маси, із якої виробляють деревинно-цементні плити. З 1 м^3 відходів з дерева можна одержати 169 кг штучного шовку, 150 кг паперу, 20 кг сухих дріжджів, 170 кг штучної вовни, 90 л спирту [2]. Пресовану деревину осики, берези, вільхи і тополі – для виготовлення деталей машин, підшипників, прокладок, що раніше виготовлялися з металу. Деталі з пресованої деревини служать у декілька разів довше, а їх вартість у 3–20 разів нижча.

Макулатура в сполученні з органічними і неорганічними складниками використовується у виробництві різноманітних плит, теплоізоляційних панелей на основі перліту, порошкоподібного твердого та газоподібного палива, етанолу, азотного добрива з додаванням калію і кальцію.

Відповідно до законодавства європейських країн пропонується ієрархія принципів поводження із відходами: 1) уникнення появи відходів; 2) перероблення та вторинне використання; 3) знешкодження з урахуванням можливого негативного впливу на довкілля [93].

На законодавчому рівні повинні бути сформовані еколого-економічні інструменти для стимулювання зменшення відходів утилізації та їхнього рециклінгу, а саме:

1. Впровадження податкових пільг: на виробництво будівельних матеріалів екологічного призначення; на види діяльності, що спрямовані на перероблення відходів; зменшення податку на власність та на землю для економічних суб'єктів, що займаються екологічно обґрунтованими видами діяльності.

2. Штрафні санкції за недотримання вимог екологічного законодавства.

3. Надання субсидій за рахунок державних, спеціальних державних та недержавних фондів на здійснення природоохоронних програм з утилізації відходів, а також фінансування науково-дослідних робіт з обґрунтування методів та способів екологічного будівництва.

4. Дотації на підтримання ризиків при впровадженні інноваційної еко-будівельної продукції з використанням відходів виробництв.

5. Впровадження екологічного податку на конкретні групи товарів та комунального податку на утилізацію відходів.

6. Гранди як грошові засоби, які виділяються в порядку доброчинності для фінансової підтримки наукових досліджень екологічних виробництв.

7. Надання кредитів для вирішення екопроблем: пільги за строками кредитування; пільги за відсотковими ставками; пільги за об'ємами кредитування; пільги за гарантіями на кредит.

8. Прискорена амортизація як система заходів, що дозволяє збільшити величину амортизаційних фондів в перші роки експлуатації та сприяє модернізації обладнання й впровадженню інновацій.

9. Сприяння, обмеження на ринку – комплекс організаційних заходів, які надають додаткові економічні переваги екологічно орієнтованим будівельним підприємствам, чи створення економічних обмежень несприятливим суб'єктам:

- присудження нагород (звання, призов);

- маркетингові сприяння екологічно перспективним суб'єктам (безкоштовна реклама);

- надання додаткових видів ресурсів (території) лімітів на електроенергію, воду, газ під розвиток екологічно сприятливих видів діяльності;

- інформаційна підтримка підприємства (безкоштовно власним підприємствам – технічна документація на виготовлення нових видів продукції);

- державна протекція для екологічно орієнтованих видів будівельної продукції в зовнішній торгівлі.

10. Цінові інструменти як система заходів впливу на економічні інтереси суб'єктів зі зміною вигідності різних видів діяльності (товарів) шляхом збільшення чи зменшення цін:

- методи прямого регулювання цін: диверсифікація цін з часом; диверсифікація цін для споживачів на природні ресурси; встановлення завищених цін на екологічно чисту продукцію; адміністративний контроль цін на відходи;
- методи непрямого регулювання: збільшення рівня цін споживання на екологічно сприятливу продукцію, на види продукції, виробництво і споживання якої пов'язано з процесами порушення природного середовища (знижує вигідність виробництва та споживання продукції); зниження рівня цін споживання на екологічно несприятливу продукцію, на ті види продукції, які сприяють зниженню екологічного тиску на різних стадіях виробництва і споживання продукції (збільшення вигідності виробництва та споживання продукції); створення цінових гарантій рішення екологічних проблем (в ціну продукції входить вартість її утилізації після використання).

Недосконалі методи планування будівельних матеріалів під час будівництва створюють надлишок відходів на будівельному майданчику [94]. Для уникнення цього ефективно організована логістика уникнення відходів на будівельному виробництві дозволить знизити витрати на управління відходами, збільшить доходи від первинних і вторинних залишків матеріалів. Логістика передбачає диференціацію відходів, їх вторинне використання, знищення, проблеми транспорту-

вання, складування, розробку ресурсозберігаючих та маловідходних технологій. Незважаючи на примусовий характер впровадження на підприємстві таких дій, вони є ефективними та економічними.

Впровадження ресурсозберігаючих технологій в системах менеджменту відходів потребує оцінювання їх ефективності на кожній фазі життєвого циклу інвестиційного проекту. Розв'язання цієї задачі можливе за результатами моделювання управління показниками динамічного оточення проекту. Обґрунтування економічної доцільності одного із альтернативних інноваційних проектів утилізації відходів в системі логістики на кожній фазі життєвого циклу проекту доцільно здійснювати відповідно до запропонованої структурно-логічної моделі управління будівельними відходами при біосферосумісному будівництві (рис. 1.2).

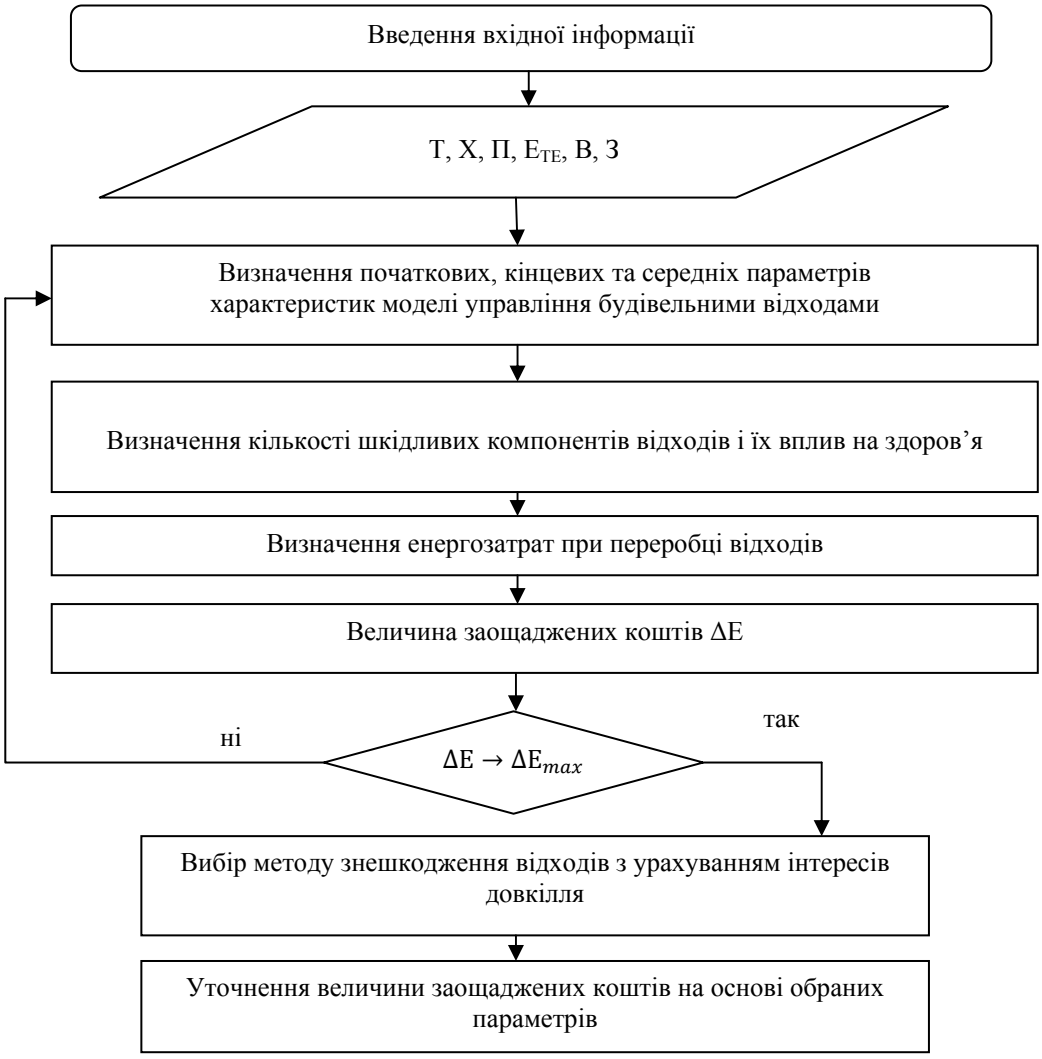


Рисунок 1.2 – Структурно-логічна модель управління будівельними відходами при біосферосумісному будівництві

Вхідними змінними параметрами в структурно-логічній моделі управління будівельними відходами (див. рис. 1.2) є витрати при транспортуванні твердих компонентів (Т), економічний ефект запобіганню втрат за час хвороби (Х) при шкідливому впливі на здоров'я, попит на вторинну сировину та споживча вартість (П), вартість розміщення відходів у навколишньому середовищі (Р), отримання теплоенергії та електроенергії ($E_т$) при термічній переробці, витрати на перетворення відходів на вторинну сировину (В), вартість, яка включає компенсацію віддалених екологічних збитків від розміщення або ліквідацію відходів (З).

Величина заощаджених коштів при раціональному підході утилізації будівельних відходів становить

$$\Delta E = f(Т, Х, П, Е_{ТЕ}, В, З) \rightarrow \Delta E_{мах}. \quad (1.6)$$

За результатами чисельного моделювання, варіюючи змінними параметрами динамічного оточення інноваційно-інвестиційного проекту управління будівельними відходами, уточнюються чинники впливу на навколишнє середовище і обирається оптимальний ресурсозберігаючий варіант.

Часто нешкідливий на перший погляд будівельний матеріал, насправді має істотний екологічний вплив, якщо враховувати всі стадії його життєвого циклу: добування, підготовку сировини, виробництво й транспортування до місця реалізації. Тому на всіх етапах життєвого циклу створення будівельної продукції повинно бути передбачено заплановане та послідовне здійснення організаційних, правових та технічних заходів природоохоронного, ресурсозберігаючого та ресурсовідтворюючого характеру на основі моделі інтегрованого еколого-економічного управління [97–102]. Головною метою цієї моделі є забезпечення мінімальних екологічних витрат при даному існуючому технічному розвитку будівельного виробництва.

Впровадження та розвиток територіально-муніципальної, галузево-бізнесової, інноваційно-інвестиційної моделей [99] утилізації відходів є вагомим засобом стимулювання соціальної, економічної та екологічної ефективності утилізації відходів на будівельному виробництві. Територіально-муніципальна модель дозволить здійснювати жорсткий контроль місцевих муніципальних служб відповідності санітарно-епідеміологічним вимогам усіх будівельних відходів і сприятиме впровадженню еколого-економічних інструментів для стимулювання утилізації, рециклінгу відходів. Галузево-бізнесова модель розширить ринок створенням нових виробництв, заснованих на використанні вторинних ресурсів. Інноваційно-інвестиційна модель надасть можливості оновлення будівельних виробництв зі застарілими багатовідходними виробництвами, підвищити конкурентоспроможність вітчизняної продукції на внутрішньому та зовнішньому ринках. Прийому

інноваційного менеджменту (бенчмаркінг, інжиніринг інновацій, франчайзинг) прискорять планування і продаж інноваційних проектів утилізації відходів. Бенчмаркінг дозволить систематично знаходити і оцінювати всі позитивні здобутки західного досвіду і організовувати їхнє використання у власній діяльності будівельних виробництв. Інжиніринг інновацій – це комплекс робіт і послуг зі створенню інноваційного проекту, що включає:

1) проведення попередніх досліджень;

2) встановлення мети та завдань, які постають перед інноваціями;

3) техніко-економічне обґрунтування інноваційного проекту;

4) розробка рекомендацій по створенню нового продукту чи операції;

5) визначення обсягу необхідних витрат всіх видів ресурсів, строків виконання робіт за проектом та економічної ефективності інноваційного проекту в цілому;

6) оформлення проекту у вигляді документа;

7) консультації працівників-виконавців заходів за цим проектом.

Впровадження на будівельних підприємствах строгих міжнародних стандартів з екологічного менеджменту ISO 14001 та ISO 14010 «Загальні вказівки з екологічного аудиту» поліпшать систему керування відходами [95, 96]. Плани екологічного менеджменту мають охоплювати такі заходи, які спрямовані на поліпшення еколого-економічних показників виробництва:

• зниження ресурсоємності та енергоємності технологічних процесів;

• зниження токсичності використовуваної сировини;

• підвищення ефективності наявних та впровадження сучасних систем очищення викидів шкідливих речовин в атмосферу та скидів стічних вод у водні об’єкти;

• утилізація й перероблення виробничих відходів;

• організація й проведення поточного контролю джерел та обсягів надходження шкідливих речовин у навколишнє середовище;

• впровадження сучасних «екологічно чистих» технологій і технологічного обладнання.

Застосування еколого-економічних інструментів на законодавчо-

му рівні та впровадження стандартів екологічного менеджменту та аудиту на будівельному підприємстві дозволить управляти відходами при оптимальному співвідношенні між екологічними та економічними показниками. Логістика уникнення відходів на будівельному виробництві дозволить знизити витрати на управління відходами. Запропонована структурно-логічна модель управління будівельними відходами при регулюванні витрат в системі логістики дозволить керувати змінними параметрами динамічного оточення інноваційно-інвестиційного проекту екологічного менеджменту відходів будівельного виробництва.

1.4 Оцінка ризиків при виборі механізму реалізації енергозберігаючого проекту

Оцінка ризиків та управління факторами впливу на вибір механізму реалізації енергозберігаючого проекту потребує вивчення та аналізу причин їхнього виникнення.

Причиною виникнення ризиків є невизначеності, що існують у проекті з підвищення енергоефективності огороджувальних конструкцій. Ризики можуть бути «відомі» – ті, які визначені, оцінені, для яких можливе планування та «невідомі» – ті, які не ідентифіковані й не можуть бути прогнозованими. Процеси прийняття рішень у ході планування проекту відбуваються в умовах наявності тієї або іншої міри невизначеності, обумовленої такими факторами [103]:

- неповне знання всіх параметрів, обставин, ситуації для вибору оптимального рішення, а також неможливість адекватного і точного обліку всієї навіть доступної інформації й наявність ймовірнісних характеристик зміни середовища;

- наявність фактора випадковості, тобто реалізації факторів, які неможливо передбачити й спрогнозувати навіть в імовірнісній реалізації;

- наявність суб'єктивних факторів протидії, коли прийняття рішень пов'язане з протилежними й суперечливими інтересами партнерів.

На всіх фазах життєвого циклу енергозберігаючого проекту з підвищення енергоефективності огороджувальних конструкцій виника-

ють ризики, що впливають на фінансові результати проекту.

Ризики на інвестиційній фазі: помилки в процесі здійснення енергетичного аудиту; прорахунки у технічних рішеннях та неякісна проектна документація; ризик перевищення кошторисної вартості проекту; ризик затримки здачі об'єкта; ризик низької якості робіт й об'єкта; ризик фінансування й рефінансування проекту.

Ризиками на фазі реалізації проекту можуть бути: виробничі ризики, наприклад технологічні, пов'язані з використання неякісних матеріалів; управлінські – порушення технологічних процесів і забезпечення ресурсами; транспортні – недодержання узгоджених термінів виконання транспортних робіт; ризики громадянської відповідальності; фінансові ризики – отримання кредитів, зміни процентної ставки, ризик конвертації валюти.

Ризики на фазі закриття проекту: пов'язаний з необхідністю фінансування й рефінансування робіт із закриття проекту; громадянської відповідальності (екологічні й ін.)

Ризики всього проектного циклу: державні; адміністративні; юридичні; політичні; форс-мажорні.

Наслідками ризиків є недосягнення очікуваної економії; перевищення вартості проекту, неможливість окупити проект в оптимальні строки. Управління ризиками – це процеси, пов'язані з ідентифікацією, аналізом ризиків і прийняттям рішень, які включають максимізацію позитивних і мінімізацію негативних наслідків настання ризикових подій.

Процес управління ризиками проекту включає:

– планування управління ризиками – вибір підходів і планування діяльності керування ризиками проекту;

– ідентифікація ризиків – визначення ризиків, здатних вплинути на проект, і документування їхніх характеристик;

– якісна оцінка ризиків – якісний аналіз ризиків й умов їхнього виникнення з метою визначення їхнього впливу на успіх проекту;

– кількісна оцінка – кількісний аналіз імовірності виникнення й впливу наслідків ризиків на проект;

– планування реагування на ризики – визначення процедур і методів ослаблення негативних наслідків ризикових подій і використанню можливих переваг;

– моніторинг і контроль ризиків – моніторинг ризиків, визначення ризиків, що залишаються, виконання плану управління ризиками проекту й оцінка ефективності дій мінімізації ризиків.

Всі ці процедури управління ризиками енергозберігаючими проектами взаємодіють одна з одною, а також з іншими процедурами. Кожна процедура виконується, принаймні, один раз у кожному проекті. Незважаючи на те, що представлені процедури розглядаються як дискретні елементи із чітко визначеними характеристиками, на практиці вони можуть частково збігатися й взаємодіяти.

Вивчення, аналіз та класифікація факторів, які впливають на управління фінансовими механізмами з реалізації енергозберігаючих проектів по підвищенню енергоефективності будинків свідчить про необхідність розроблення методики реалізації цих інноваційних проектів.

З метою інтелектуальної підтримки управління ризиками при реалізації проекту збільшення потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій запропоновано структурно-алгоритмічну модель (рис. 1.4).

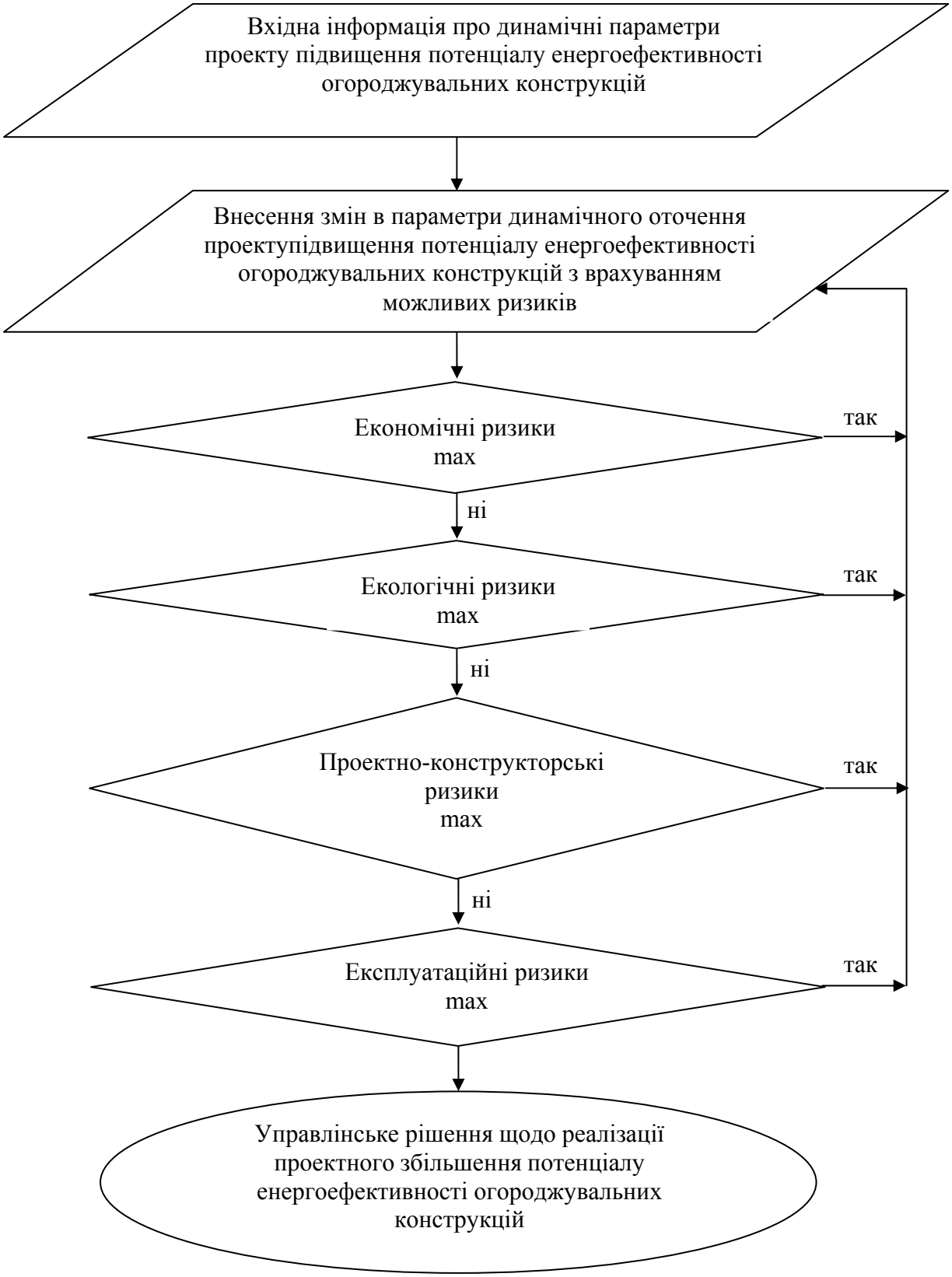


Рисунок 1.4 – Структурно-алгоритмічна модель управління ризиками при реалізації проекту збільшенню потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій

1.5 Напрямки подальшого розвитку досліджень з оцінювання потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій із біосферосумісних матеріалів

Створення інструментарію організації будівництва для методологічного обґрунтування та прикладного супроводу з реалізації проектних рішень з влаштування теплоізоляційної оболонки будівель на засадах біосферосумісності на всіх етапах життєвого циклу об'єкта у форматі вітчизняного девелопменту є актуальною проблемою [10–15]. Вдосконалення методів багатофакторного та багатокомпонентного моделювання та багатокритеріального вибору альтернатив влаштування біосферосумісних огороджувальних конструкцій будівель досліджуються іноземними та вітчизняними вченими [85].

Для аналізу й кількісної оцінки показників енергетичної ефективності теплоізоляційної оболонки будівель із забезпечення оптимального 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, функціонально-вартісний аналіз, функції корисності, нечітких парних порівнянь Сааті тощо [85]. Домінуючі фактори впливу на енергоефективність потенціалу теплоізоляційних властивостей огороджувальних конструкцій: недостатньо ефективні проектні рішення, порушення технології влаштування зовнішніх огороджувальних конструкцій та недотримання експлуатаційних вимог.

Основні помилки при проектуванні зовнішніх огороджувальних конструкцій теплоізоляційної оболонки будівель такі:

- помилково вибраний теплоізоляційний матеріал та його товщина;
- недостатньо обґрунтовані розрахункові величини теплопровідності та щільності матеріалів, режиму вологості приміщення, теплозасвоєння;
- неточне оцінювання термічної неоднорідності конструкцій та як наслідок недостовірність в розрахунках приведеного опору теплопередачі непрозорих та світлопрозорих елементів огороджувальних конструкцій;

- неякісні конструктивні рішення влаштування теплопровідних включень;
- недостатня герметизація стиків та зовнішніх поверхонь огороджувальних конструкцій;
- помилковий вибір пароізоляційного шару або невдале його розміщення.

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

- суттєві відхилення проектної щільності теплоізоляційних матеріалів та їхніх 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 такі:

- 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 проекту-

вання, реконструкції та експлуатації будівель, направлених на пошук організаційно-технологічних шляхів підвищення енергоефективності будівель, дозволяють зробити висновок про відсутність єдиного підходу до вибору критерію прогнозування та управління їхньою енергоефективністю та екологічністю на всіх стадіях життєвого циклу. Також відсутні вичерпні наукові обґрунтування методології багатокритеріальної оцінки енергоефективності потенціалу огороджувальних конструкцій із біосферосумісних матеріалів. Концептуальний підхід з вирішення цих питань може бути частково реалізований з використанням науково-методологічного механізму дослідження потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій на засадах біосферосумісності (рис. 1.5).

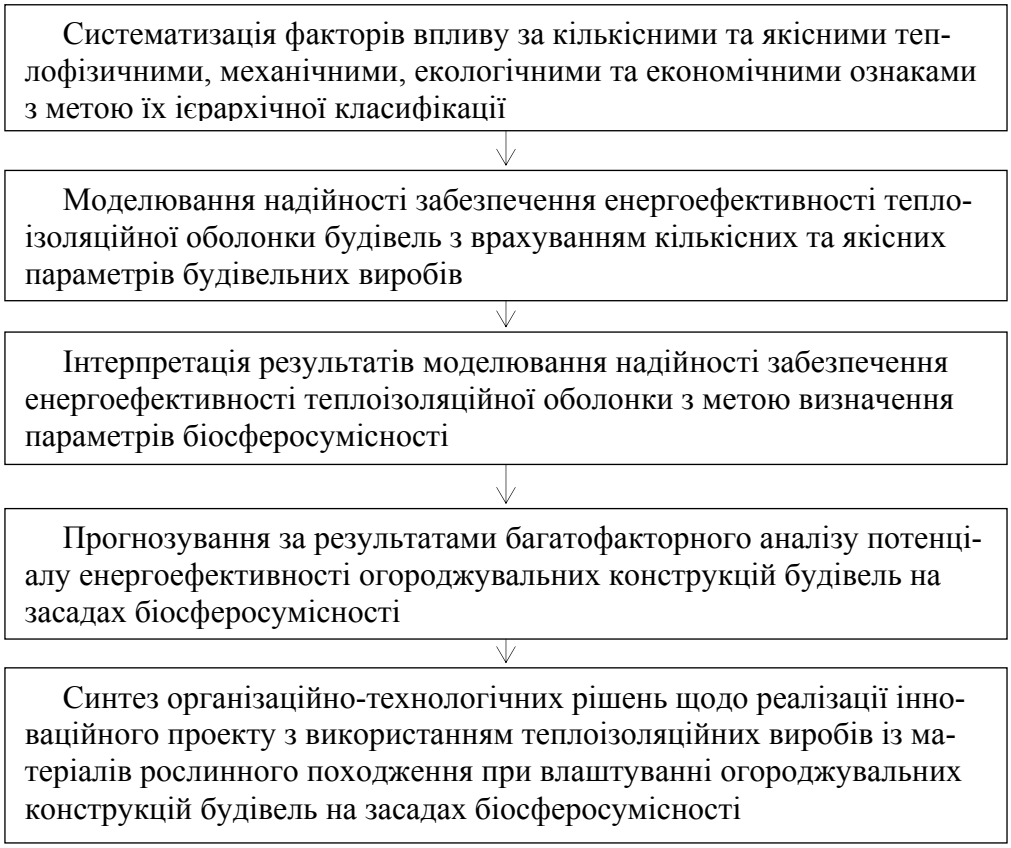


Рисунок 1.5 – Науково-методологічний механізм подальшого розвитку досліджування потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій на засадах біосферосумісності

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ ДО 1 РОЗДІЛУ

[1] Верховна Рада України. (2017, лип. 23, дата оновлення). Закон України від 01.07.94 р. № 74/94-ВР. «*Про енергозбереження*». [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/74/94-вр. Дата звернення: 23.02.2019.

[2] Верховна Рада України. (2017, черв. 22). *Закон України № 2118-VIII. «Про енергетичну ефективність будівель*». [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2118-19. Дата звернення: 23.02.201).

[3] *Теплова ізоляція будівель.* ДБН В.6-31:2016, 2017.

[4] *Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель*. ДСТУ Б В.2.6-189:2013, 2014.

[5] І. Н. Дудар, Л. В. Кучеренко і В. В. Швець, *Енергозбереження в житловому будівництві*. Вінниця: ВНТУ, 2015.

[6] М. А. Саницький, О. Р. Позняк і У. Д. Марущак, *Енергозберігаючі технології в будівництві*. Львів: Національний ун-т «Львів. Політехніка», 2013.

[7] Г. С. Ратушняк і О. Г. Ратушняк, *Управління проектами енергозбереження шляхом термореновації будівель*. Вінниця: Універсум-Вінниця, 2006.

[8] О. М. Недбайло, «Теплофізичні аспекти підвищення ефективності будівлі при використанні низькотемпературних систем її теплозабезпечення та термомодернізації огороджувальних конструкцій»: автореф. дис. д-ра техн. наук, Київ, 2018.

[9] О. В. Семко, О. І. Філоненко, С. П. Панченко та Є. І. Мякий, «Спорудження малоповерхових житлових будинків із солом'яних блоків та визначення їх теплотехнічних характеристик», *Вісник Придніпровської державної академії буд. та арх.*, № 8, с. 47-52, 2013.

[10] Т. М. Ткаченко, «Науково-методологічні основи підвищення рівня екологічної безпеки урбоценозів шляхом створення енергоефективних технологій «зеленого будівництва»», автореф. дис. д-ра техн. наук,-Київ, 2018.

[11] Г. П. Фаренюк, *Основи забезпечення енергоефективності будинків та теплової надійності огороджувальних конструкцій*. Київ: Гамма-Принт, 2009.

[12] Д. О. Чернишев, «Науково-методологічний інструментарій організації будівництва на засадах біосферосумісності», автореф. дис. д-ра техн. наук, Дніпро, 2019.
[13] М. В. Нагорний, «Ефективні енергозберігаючі конструкції малоповерхових житлових будинків», дис. канд. техн. наук, Харківська державна акад. залізн. Транспорту, Харків, 2001.
[14] *Теплоизоляция. Материалы, конструкции, технологии*, Ред. С. М. Кочергин. Москва: Стройинформ, 2008.
[15] П. В. Кривенко та ін., *Будівельне матеріалознавство.* Київ: ЕКСОб, 2004.
[16] Л. Й. Дворкін і С. Л. Липовська, *Будівельне матеріалознавство.* Рівне: НУВГП, 2016.
[17] О. М. Лівінський та ін., *Будівельні матеріали і вироби*. Київ: МП Леся, 2016.
[18] F. Stazi, *Thermal inertia in energy efficient building envelopes*. Butterwork Heinemann, 2017.
[19] Д. О. Карасев, Н. А. Шипилова, М. С. Арутунян, «Малоэтажное строительство. Виды строительных материалов для возведения зданий», *Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ»*, том 8, № 3, с. 1–8, 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://naukovedenie.ru /PDF/91TVN316.pdf. Дата звернення 23.02.2019.
[20] Малоповерхове будівництво має всі перспективи розвитку в Україні. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.biznews. com.ua/malopoverhove-budivnitstvo-maye-vsi-perspektivi-rozvitku-v-ukrayini/. Дата звернення 20.02.2019.
[21] House of Straw – Straw Bale Construction Comes of Age. [Online]. Available: http://www.eren.doe.gov/buildings/documents/strawbale.html. Дата звернення 23.02.2019.
[22] О. В. Доброноженко, «Перспективы возведения экодомов в Украине как приоритетное направление в энергосбережении», *Вісник Сумського національного аграрного університету*, № 5(16), с. 152-155, 2012.
[23] Экопоселок в Днепропетровске: Хоббитания в Мордоре? [Електронний ресурс]. Режим доступу:
https://mobile.gorod.dp.ua/news/71241. Дата звернення 02.06.2018.

[24] А. Ю. Фирсик, «Устройство и функционирование систем экодома (автономный экодом)», *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*, № 25, с. 376-379, 2010.
[25] *Строится Дом из соломенных панелей 34×19 метра под Харьковом!* [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.biohouse.com.ua/2013/10/3419.html. Дата звернення 02.06.2018.
[26] *Профессиональное строительство домов из соломы.* [Електронний ресурс]. Режим доступу: 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», на *Общегородской науч.-практ. конф. «Волжский: история, культура, образование»*, Волгоград: Волгоградский гос. архитектурностроит. ун-т, 2014, с. 114-117.
[28] L. Brojan, and Peggi L Clouston, "Andvantages and disadvantages of straw-bale building", *Architecture, research*, № 1, pp. 21-26, 2014.
[29] C. Atkinson, *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. [Електронний ресурс]. Режим доступу :http://thewoodlouse.blogspot.cz/2015/09/embodied-and-disembodied-carbon.html. Дата звернення 05.10.2018.
[31] А. Е. Бруй, и И. В. Харламов, «Анализ возможных конструкций стен с использованием соломенных блоков для климатических условий Алтайского края», *Ползуновский вестник*, № 1, с. 39-42, 2014.
[32] М. Мирман, С. Макдонал, *Дом из соломенных блоков*.Solar Energy International. 1996. 60 с.
[33] Strawbale Building in Poland. [Електронний ресурс]. Режим доступу: 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 E04C 2/16. № u20126045 МПК(2012)*, 30.04.2013.
[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] Енергоефективний 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] Енергоефективний 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.* [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://rainbowecosystem.com/ru/products/straw-blocks/. Дата звернення 16.03.2018.
[43] L. Brojan, A. Petric and Peggi L. Clouston, “A comparative study of brick and straw bale wall systems from environmental, economical and energy perspectives”, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 8, no. 11, pp. 920-926, 2013.
[44] І. І. Куліченко 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*, №. 69, с. 257–264, 2013.
[45] В. І. Семко, *Сталеві холоднодеформовані тонкостінні конструкції*. Полтава: АМСГ, 2017.
[46] Ю. С. Бікс і Г. С. Ратушняк, *Термічно неоднорідні енергоощадні огороджувальні конструкції малоповерхових будівель*. Вінниця: ВНТУ, 2019.

[47] Г. С. Ратушняк, Ю. С. Бікс і А. О. Лялюк, «Моделювання теплопередачі через зовнішній багатошаровий солом'яний стіновий блок», *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, № 1, с. 50-55, 2018.
[48] Bläsi W. Bauphysik. *Bibliothek des technischen Wissens. 3 Auflage*. Haan: Verlag Europa Lehrmittel, 2001.
[49] H. Hens, *Building Physics Heat, Air and Moisture: Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises*, 2rd ed. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2012.
[50] В. И. Особов, Г. К. Васильев и А. В. Голяновский, *Машины и оборудование для уплотнения сено-соломистых материалов: основы теории и расчета рабочих органов.* Москва: Машиностроение, 1974.
[51] С. А. Сычев, «Экотехнологии строительства с учетом критериев энергоэффективных зданий», *SCIENCETIME*, № 10, с. 343–349, 2014.
[52] А. В. Лобанова и И. Э. Казимагомедов, «Стеновые изделия из арболита на основе костры льна», *Комунальне господарство міст*, вип. 124, с. 18-20, 2015.
[53] F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, "Earth construction: Lessons from the past for futureeco-efficient construction", *Construction and Building Materials*, vol. 29, p. 512-519, 2012.
[54] Rajesh Kumar Jain, "A study on ecofriendly cost effective earth bag house construction", *Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 200-211, 2013.
[55] Carabaño R. *Life Cycle Assessment (LCA) of building materials for theevaluation of building sustainability: the case of thermal insulation materials*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/316645292_Life_Cycle_Assess-ment_LCA_of_building_materials_for_the_evaluation_of_building_sustainability_the_case_of_thermal_insulation_materials. Last accessed 03.11.2019.
[56] L. Brojan, A. Petric and Peggi L. Clouston, "A comparative study of brick and straw bale wall systems from environmental, economic and energy perspectives", *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 8, no.11, pp. 920-926, 2013.
[57] С. Г. Шеина, Е. Н. Миненко, «Разработка алгоритма выбора энергоэффективных решений в строительстве», *Инженерный вестник Дона*, № 4-1(22), с. 133, 2012.

[58] А. А. Мацура, Б. В. Ермоленко, «Разработка методов оптимального проектирования энергоэффективных домов», *Успехи в химии и химической технологии*, № 8, т. XXIX, с.118-122, 2015.
[59] С. Н. Смирнова, «Принципы формирования архитектурных решений энергоэффективных жилых зданий: дис. канд. арх., Нижний Новгород, 2009.
[60] О. В. Доброноженко, «Перспективы возведения экодомов в Украине как приоритетное направление по энергосбережению», *Вісник Сумського національного аграрного університету*. *Серія «Будівництво»*, № 5 (16), с. 152–156, 2012.
[61] Ю. Б. Дудикевич, *Енергоощадні котеджі: методики проектування будинків без газу*. Львів: Сполом, 2011.
[62] H. Hens, *Building Physics Heat, Air and Moisture: Fundamentals and Engineer- ing Methods with Examples and Exercises*, 2rd ed. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2012.
[63] Т. А. Мусорина, О. С. Гамаюнова и М. Р. Петриченко, «Обоснование конструктивных мероприятий по увеличению энергоэффективности стеновых ограждений», *Вестник МГСУ*, том 12, вып. 11(110), с. 1269-1277, 2017.
[64] Г. С. Ратушняк, О. Г. Ратушняк, *Управління енергозберігаючими проектами термореновацііі будівель.* Вінниця: Універсум-Вінниця, 2009.
[65] *Енергозбереження в будівлях*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.patriot-nrg.ua/ukr/sav-ings/view/24. Дата звернення 06.01.2019 р.
[66] Европейские стандарты энергоэффективности зданий. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5089. Дата звернення 07.01.2019.
[67] Г. В. Шпакова, «Теоретико-методологічні засади формування еколого-економічного механізму розвитку біосферосумісного будівництва в Україні», автореф. дис. д-ра економ. наук. Київ, 2020.
[68] Критерии энергоэффективности в «зеленом» строительстве. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5134. Дата звернення 07.01.2019.
[69] С. П. Шаповал, «Системи теплозабезпечення енергоефективних будівель на основі зовнішніх огороджень-перетворювачів сонячної

енергії у теплову», автореф. дис. д-ра техн. наук. Київ, 2020.
[70] В. М. Желих, «Розробка теплофізичних основ тепло забезпечення виробничих комплексів на базі комбінованих систем опалення із застосуванням інфрачервоного нагріву», автореф. дис. д-ра техн. наук. Київ, 2013.
[71] В. О. Єгорченков, «Наукові основи формування комфортного середовища в будівлях за динамічними параметрами природного освітлення», автореф. дис. д-ра техн. наук. Київ, 2019.
[72] А. О. Чейлитко, «Розвиток теоретичних основ формування теплофізичних властивостей теплоізоляційних матеріалів шляхом управління процесами тепломасообміну в пористих структурах», автореф. дис. д-ра техн. наук. Львів, 2018, 43 с.
[73] Л. В. Накашидзе, «Енергоефективні системи забезпечення кліматичних умов в приміщеннях на основі використання енергії сонця та оточуючого середовища», автореф. дис. д-ра техн. наук. Київ, 2018.
[74] В. Б. Довгалюк, «Розвиток наукових основ створення температурно-вологісних режимів повітряного середовища в музейних приміщеннях», автореф. дис. д-ра техн. наук. Київ, 2020.
[75] О. Т. Возняк, «Енергоощадні технології формування динамічного мікроклімату у стиснених умовах виробничих приміщень», автореф. дис. д-ра техн. наук. Київ, 2018.
[76] О. Возняк, Ю. Юркевич і В. Желих, «Теоретичні передумови оптимізації сукупних терморенновацій при проведенні енергетичного аудиту будинку», *Вісник НУ «Львівська політехніка», Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація.* Вип. 276, 140-145, 2003.
[77] О. Редько, «Централізовані системи теплопостачання на основі удосконалених технологічних методів і способів спалювання альтернативних палив», автореф. дис. д-ра техн. наук. Київ, 2020.
[78] В. О. Мілейковський, «Енергоефективне формування мікроклімату на основі розробленої теорії макроструктури турбулентних течій», автореф. дис. д-ра техн. наук. Київ, 2020, 40 с.
[79] В. В. Ковальов, «Розвиток науково-методичних основ організаційно-технологічного проектування реконструкції промислових будівель зі зміною функціонального призначення» автореф. дис. д-ра техн. наук. Дніпро, 2021.
[80] О. М. Лівінський та ін. *Контроль якості будівельно-монтажних*

робіт. К.: МП Леся, 2018.
[81] Основы моделирования сложных систем И. В. Кузьмин, Ред. Київ: Вища школа, 1981.
[82] Б. І. Басок та ін. «Полівалентна система теплозабезпечення експериментального будинку пасивного типу (площею 300 м^2) на основі використання відновлювальних та альтернативних джерел енергії», *Наука та інновації*, т. 10, № 6, с. 34-52, 2014.
[83] М. М. Климчук, «Науково-прикладні засади управління енергозбереженням на будівельних підприємствах», автореф. дис. д-ра економ. наук. Київ, 2020.
[84] М. А. Максименко, «Теплоізоляційні вироби з невентильованими повітряними прошарками, екранованими тепловідбиваючим матеріалом», автореф. дис. к. т. н. Вінниця, 2021.
[85] Г. С. Ратушняк і С. Й. Шаманський, *Критеріальний метод оцінювання засобів обміну в системах водопостачання*. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003.
[86] Ю. А. Табунщиков и М. М. Бродач, *Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий*. М.: АВОК-ПРЕСС, 2002.
[87] В. И. Немченко и М. В. Посашков, «Многокритериальное оценивание и анализ системной энергоэффективности малоэтажной жилой застройки», *Вестник Самаренко государственного технического университета. Серия «Технические науки»*, вып. № 1 (22). с. 182-188, 2010.
[88] В. К. Савин, «Новые подходы к оценке энергосбережения и энергетической эффективности в строительной отрасли», *Строительные науки*, № 3, с. 241-245, 2010.
[89] В. К. Савин, Н. В. Савина, «Энергетическая эффективность и формообразование зданий», *Вестник МГСУ*, № 3, с. 152-157, 2011.
[90] В. К. Савин, *Строительная теплофизика. Энергосбережение. Образ и число.* М.: Лазурь, 2018.
[91] *Утилізація відходів у різноманітних галузях народного господарства.* [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://pidruchniki.com/. Дата звернення 10.09.2019.
[92] Н. В. Пахомова, А. Эндрес и К. Рихтер, *Экологический менеджмент*. СПб.: Питер, 2004.

[93] *Системи екологічного керування*. ДСТУ ISO 14001: 2006, 2006.
[94] *Настанови щодо здійснення екологічного аудиту*. ДСТУ ISO 14010-97, 1998.
[95] О. Г. Лялюк і О. Г. Чухряєва, «Модель інтегрованого еколого-економічного управління інвестиційним процесом будівництва», *Вісник ВПІ*, № 6, с. 60-66, 2014.
[96] О. Г. Лялюк і О. Г. Ратушняк, «Моделювання процесів створення екологізованого будівельного виробництва», *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*, № 1(42), частина 1, с. 137-139, 2007.
[97] *Строительные отходы*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://atagos.com.ua/. Дата звернення 10.09.2016.
[98] О. Г. Лялюк і О. Г. Ратушняк, «Оцінка екологічного життєвого циклу будівельної продукції», в *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Вінниця: Універсум-Вінниця, № 1, с. 136-140, 2014.
[99] *Утилізація відходів у різноманітних галузях народного господарства.* [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://pidruchniki.com/. Дата звернення 10.09.2016.
[100] Утилізація відходів у різноманітних галузях народного господарства. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://pidruchniki.com/. Дата звернення 10.09.2016.
[101] A. Katz and H. Baum, «A novel methodology to estimate the evolution of construction waste in construction sites», *Journal of Waste Management*, vol. 31, pp. 353-358, 2011.
[102] Б. А. Горлицкий, «Проблеми поводження з відходами як з вторинною сировиною та шляхи їх вирішення», Экология и промышленность, № 1, с. 20-27, 2016.
[103] О. Г. Лялюк, А. О. Лялюк, «Оцінка ризиків енергозберігаючого проекту», на *Міжнародній науково-технічній конференції. Інноваційні технології в будівництві*, Вінниця, 2018, с. 135-137.

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 О. І.Філоненко, О. І. Юрін [1] викладено дані про теплофізичні властивості будівельних матеріалів огороджувальних конструкцій. Охарактеризовано залежність коефіцієнта теплопровідності від густини органічних матеріалів, значення якого складає 0,29-0,41 Вт/м·К. Вказується суттєвий вплив вологості матеріалу на його теплопровідність. Це обумовлено тим, що теплопровідність води становить 0,55 Вт/м·К, тобто в 20 разів більша, ніж коефіцієнт теплопровідності повітря в порах середнього розміру матеріалів рослинного походження. Для анізотропних матеріалів рослинного походження спостерігається залежність коефіцієнта теплопровідності від напрямку теплового потоку. Для сосни і ялини густиною 500 кг/м^3 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, що є в матеріалах рослинного походження.

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, їхньою пористістю та характером пор, що є визначальними чинниками впливу на щільність матеріалу. На величину теплопровідності органічних теплоізоляцій-

них 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 при тепловому потоці перпендикулярному 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/м^3, а інша з щільністю 90 кг/м^3. 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/м^3, 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 соломи 75 кг/м^3 при напрямку теплового потоку перпендикулярно до волокон виявлено збільшення теплопровідності на 0,004 Вт/мК порівняно з паралельним розміщенням волокон [3]. Для щільності 90 кг/м^3 при перпендикулярному та паралельному розміщенні спостерігається однакова величини коефіцієнта теплопровідності [3, 4].

Shea [4] вивчав теплопровідність на різних зразках великого діапазону щільностей соломи стиснутих до товщини 0,25 м. При виконанні експериментів [4] солом'яні волокна в зразках не мали певної орієнтації в розташуванні відносно напрямку теплового потоку. Виміряні величини теплопровідності зразків соломи коливаються від 0,059 Вт/мК для щільності 63 кг/м^3 до 0,064 Вт/мК при щільності 123 кг/м^3. Shea запропонував еталонну величину теплопровідності для соломи без певної орієнтації розташування волокон 0,065 Вт/мК.

Німецька асоціація зі спорудження будівель з солом’яних тюків виконала численні дослідження на солом'яних тюках FASBA [5]. За

результатами досліджень отримано теплопровідність солом’яних тюків близько 0,045 Вт/мК коли тепловий потік був перпендикулярний до волокон [5]. Затверджена німецьким центром компетенції для будівництва (DIB) [6] теплопровідність вважається 0,052 Вт/мК коли тепловий потік перпендикулярний до волокна соломи та 0,080 Вт/мК коли він паралельний.

Достовірні результати вимірювання теплопровідності, як правило, отримуються з використанням методів стаціонарного стану теплового потоку, таких як метод «охоронної гарячої пластини». Більшу частину результатів визначення теплопровідності отримано Dubois [7] при перехідних або стійких методах з різною товщиною солом’яних тюків.

В роботі Douzane [8] наведено результати визначення тепловопровідності тюків соломи, що отримано методом стаціонарного режиму. Охолоджена гаряча плита-апарат була використана для оцінювання теплопровідності солом'яних тюків. Досліджено теплопровідність двох видів проб зразків соломи товщиною 0,1 м щодо орієнтації волокон. Середні значення теплопровідності при +10 °C були відповідно 0,072 Вт/мК при паралельній та 0,051 Вт/мК при перпендикулярній орієнтації волокон соломи відносно напрямку теплового потоку.

Conti [9] розробив систему вимірювання теплопровідності для солом'яних тюків, яка базувалася на стаціонарному режимі теплового потоку. Експериментальна установка складається з вимірювальної камери та нагрівача всередині кліматичної камери. Автори визначили що теплопровідність становить близько 0,066 Вт/мК у випадку коли тепловий потік направлений паралельно волокнам соломи.

Ефект впливу відносної вологості на теплопровідність матеріалів рослинного походження визнаний багатьма авторами. Теплопровідність соломи збільшується з вмістом вологи через пористу структуру волокнистих ізоляційних матеріалів. Відзначається збільшення теплопровідності рисової соломки, коли вміст вологи 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 від 50 до 130 кг/м^3. 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 %.

О. В. Семком та ін. [14] виконано експериментальне дослідження температурного режиму солом'яних блоків при стаціонарному тепловому режимі в температурній камері. Зразки виготовлено із пресованої соломи із щільністю 130 кг/м^3. Зразки опоряджено глиняним розчином товщиною 0,01 м. Загальний розмір зразка 0,9×0,09×0,5 м без конкретного напрямку волокон відносно напрямку теплового потоку зі щільністю 25,2 Вт/м. За результатами натурних досліджень встановлено, що при стаціонарному тепловому режимі 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.

Дані табл. 2.1 та рис. 2.1 і 2.2 свідчать, що існують певні залежності теплопровідності від напрямку теплового потоку відносно напрямку волокон соломи (паралельно чи перпендикулярно). Причому зв'язок між щільністю солом'яного блока та його теплопровідністю більш явно виражений при розташуванні волокон соломи перпендикулярно до теплового потоку (див. рис. 2.2).

Таблиця 2.1 – Результати досліджень теплопровідності солом'яних блоків

Автори досліджень	Щільність соломи, кг/м^3	Напрям 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 напряму	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
О. В. Семко та ін., 2013 [14]	130	немає конкретного напряму	0,299

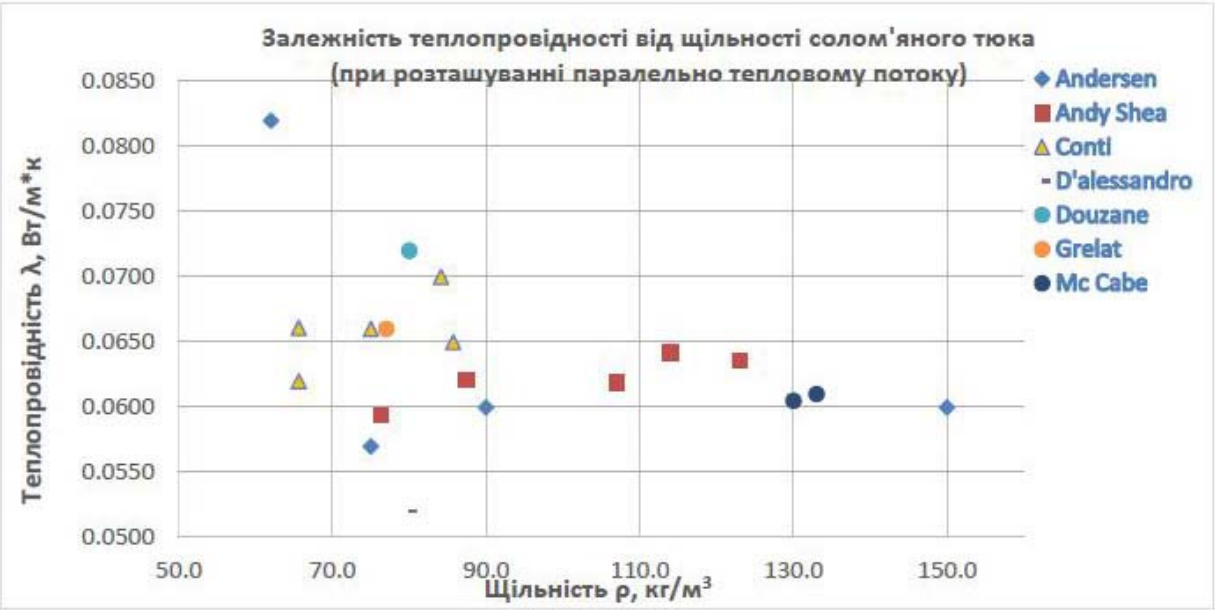


Рисунок 2.1 – Зв’язок між щільністю солом’яного блока
та його теплопровідністю при розташуванні зразків паралельно тепловому потоку
за експериментальними даними [2, 3, 4, 8, 9, 11, 13]

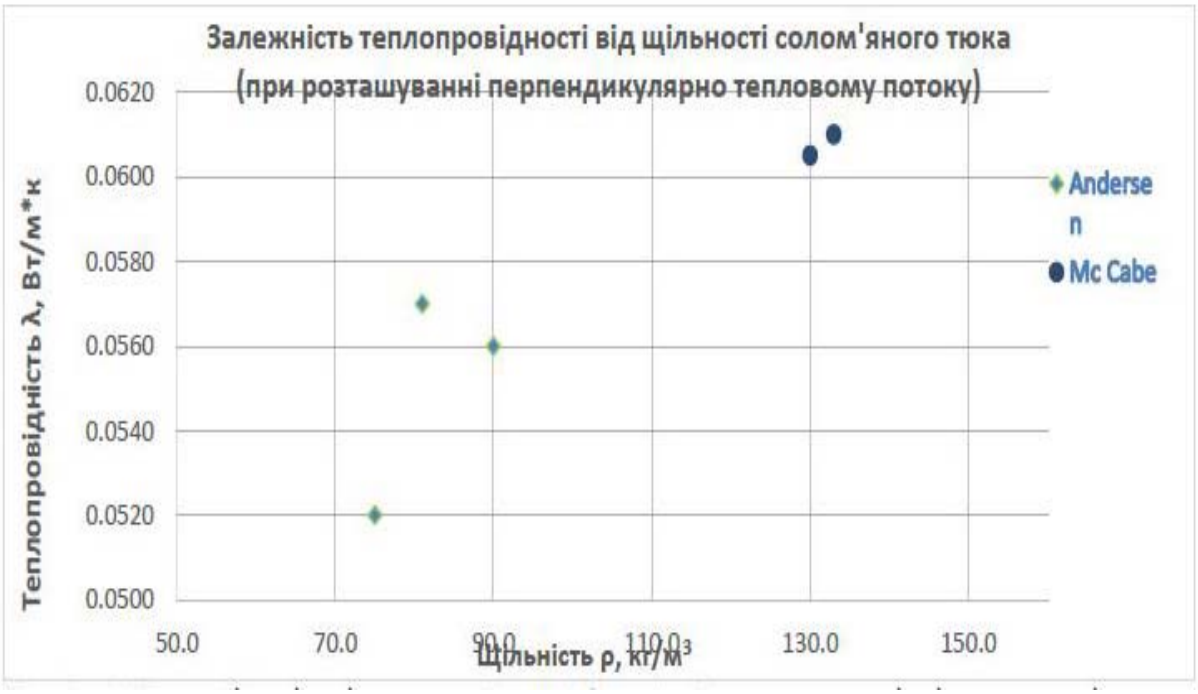


Рисунок 2.2 – Зв’язок між щільністю солом’яного блока та його теплопровідністю
при розташуванні зразків перпендикулярно до теплового потоку за
експериментальними даними [2, 3]

Наведений аналіз результатів вітчизняних та зарубіжних досліджень свідчить про існування проблеми визначення факторів впливу на теплотехнічні властивості теплоізоляційних матеріалів рослинного походження.

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 [16–19]

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

де Q – кількість переданого тепла, Вт; S – площа поперечного перерізу, м^2; ΔT – зміна температури тіла, К; ΔL – зміна довжини тіла, м; Q/S – тепловий потік.

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

Відповідно до ДСТУ Б.В. 2.6-101-2010 [20] теплові випробування теплоізоляційних властивостей огороджувальних 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 термопарами. Опір теплопередачі зразків теплоізоляційних матеріалів обчислюють за відомою формулою.

В роботі Г. Г. Фаренюка [21] розглянуто метод лабораторних випробувань теплоізоляційних матеріалів, які широко використовуються при влаштуванні огороджувальних конструкцій будівель. Метод ґрун-

тується на випробовуваннях матеріалу, який піддають циклічним кліматичним впливам, що імітують умови експлуатації матеріалу в огороджувальних конструкціях. За результатами вимірювань теплофізичних характеристик матеріалів з врахуванням конструктивного вирішення теплоізоляції за зміною теплопровідності огороджувальних конструкцій оцінюють термін ефективної експлуатації матеріалу в будівельній галузі.

Л. І. Дворкіним та ін. [22] запропоновано експериментально-теоретичний спосіб визначення коефіцієнта теплопровідності для пінополістиролу, який використовується як теплоізоляційний матеріал огороджувальних 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.

С. В. Риндюк [23] запропонувано метод визначення теплопровідності багатошарових будівельних виробів за результатами моделювання шляхом розв'язання задачі нестаціонарної теплопровідності. Для визначення температури в кожному шарі будівельного виробу використано рекурентні формули для коефіцієнтів наближеного розв'язання системи рівнянь нестаціонарної теплопровідності матеріалів, які можуть бути використані при влаштуванні огороджувальних конструкцій.

Основними впливовими чинниками, від яких залежить теплопровідність, є щільність та вологість матеріалу, температура навколишнього середовища та напрямок теплового потоку відносно волокон [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 на-

грівається, а інша охолоджується або нагрівається в меншій мірі. Температуру обох пластин вимірюють за допомогою термопари, 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.

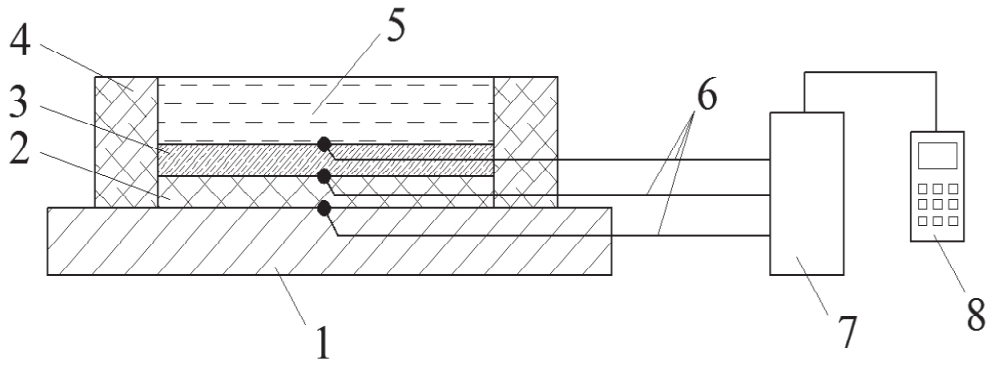


Рисунок 2.3 – Принципова схема вимірювального комплексу з гарячою пластиною [21]: 1 – джерело стаціонарного теплового потоку; 2 – шар матеріалу з відомою товщиною і коефіцієнтом теплопровідності (оргскло); 3 – шар теплоізолюючої фарби; 4 – теплоізолятор (пінопласт); 5 – «холодильник» (ємність з водою);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

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

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

де Q – об'єм 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

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

де Q – швидкість теплового потоку, мВт; A_1A_2 – відповідно площа поверхні зовнішньої та внутрішньої сфери, м^2; T_1, T_2 – температура; R_1, R_2 – відповідно радіус зовнішньої та внутрішньої сфери, м.

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

$$\lambda = \alpha \rho °\text{C}, \tag{2.4}$$

де α – термічна дифузія матеріалу; ρ – щільність матеріалу, кг/м^3; $°C$ – 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 матеріалів наведено на рис. 2.4.

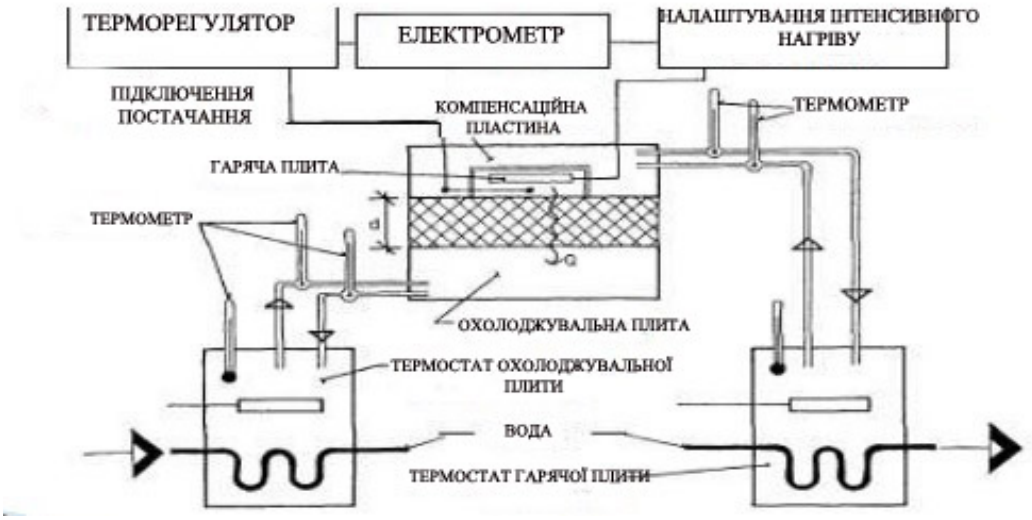


Рисунок 2.4 – Принципова схема вимірювального комплексу визначення теплопровідності матеріалів методом термічної дифузії

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

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

де Q – теплова величина гарячої пластини, Вт; d – середня товщина зразка, м; S – площа гарячої пластини, м^2; Δt – тепловий градієнт між гарячою і холодною пластиною, К; o – корекція теплового градієнта втрат тепла в апараті.

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

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

Техніка джерела перехідної площини зазвичай використовує дві половини зразків матеріалу, 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 сенсорами. 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 установки для визначення коефіцієнта теплопровідності матеріалу даним способом. Теплопровідність матеріалу визначають за формулою (2.1). Метод придатний для визначення коефіцієнта теплопровідності в різних матеріалах в широкому діапазоні температур (від –120 ^{o}C до 2800 ^{o}C).

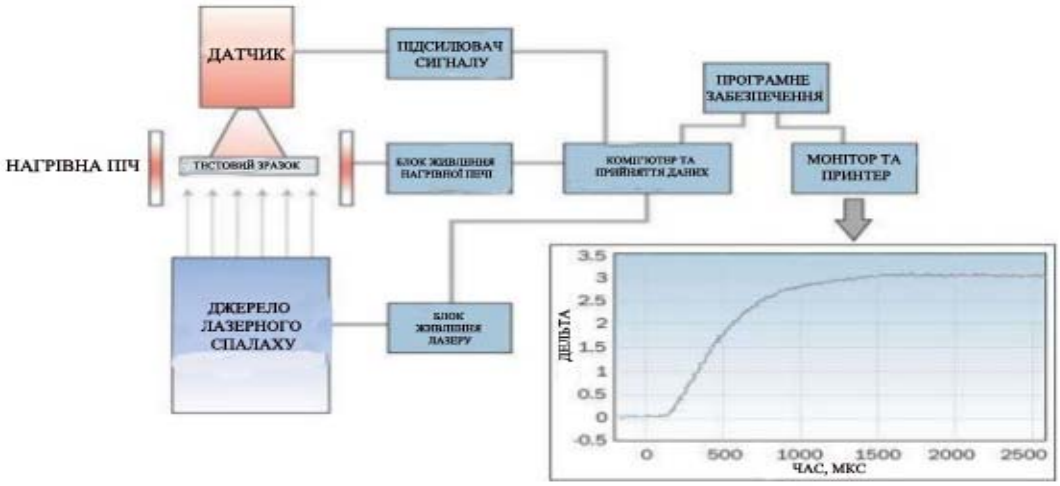


Рисунок 2.5 – Принципова схема установки
для вимірювання теплопровідності методом лазерного спалаху

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

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 порівняно 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.

Аналіз існуючих методів визначення теплопровідності матеріалів при різних теплових режимах свідчить про їхні позитивні та негативні характеристики, що не дозволяє використовувати їх для визначення достовірної теплопровідності матеріалів рослинного походження, які мають перспективу використання при біосферосумісному будівництві.

2.3 Установка для дослідження теплопровідності теплоізоляційних матеріалів рослинного походження

Аналіз відомих методів дослідження теплопровідності матеріалів в стаціонарному та нестаціонарному режимах, конструктивних рішень та відповідного обладнання [16–23] свідчить про необхідність удосконалення установки для дослідження теплопровідності теплоізоляційних матеріалів рослинного походження, які мають перспективу для широкого використання при біосферосумісному будівництві.

Авторами запропоновано принципову конструкцію установки для визначення теплопровідності теплоізоляційних матеріалів [24–27]. Конструктивну схему установки та її окремих елементів наведено на рис. 2.6, 2.7 та 2.8.

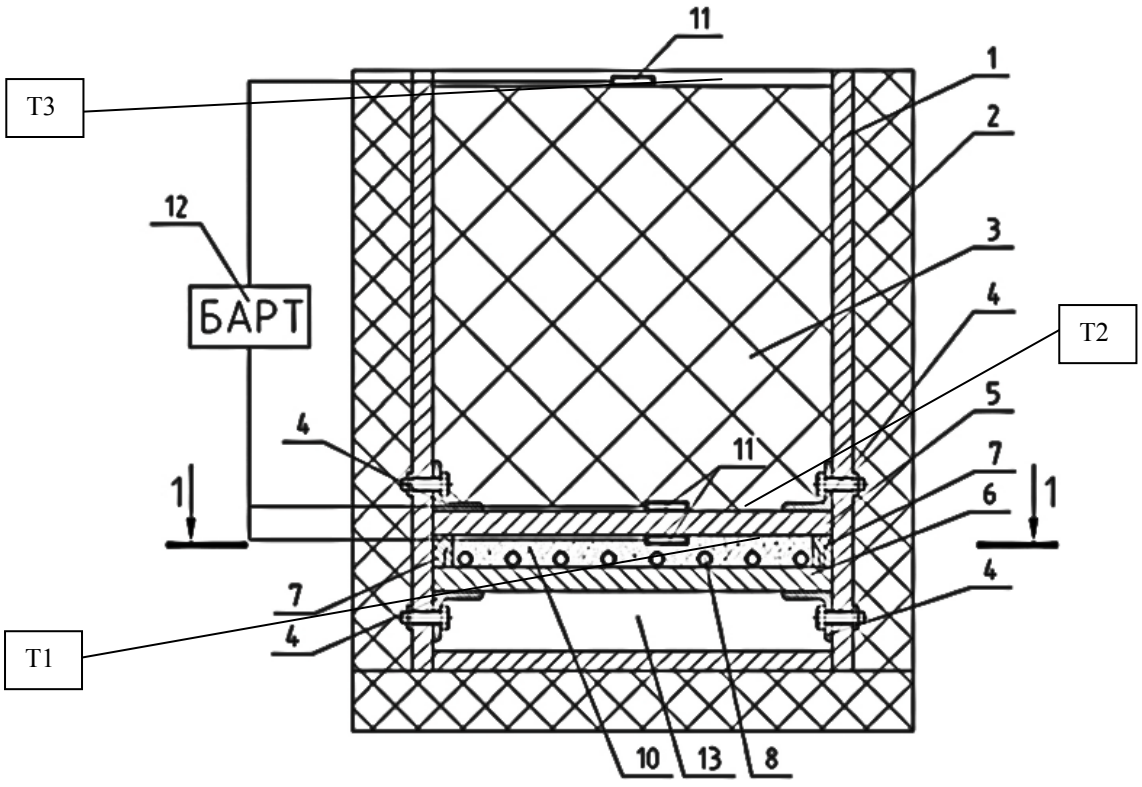


Рисунок 2.6 – Конструктивна схема установки для визначення теплопровідності теплоізоляційних матеріалів рослинного походження

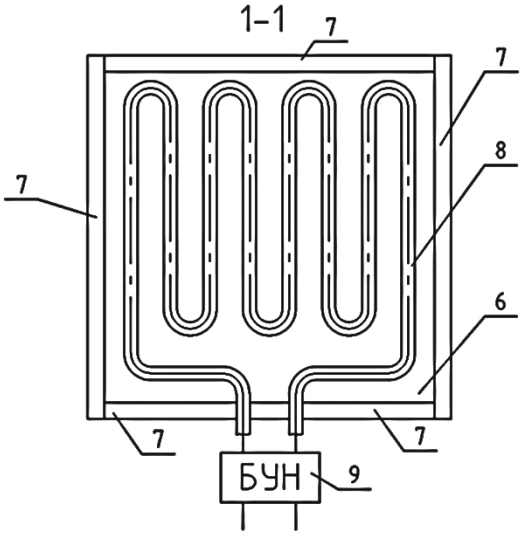


Рисунок 2.7 – Конструктивне виконання нагрівного елемента створення теплового потоку

Установка для визначення теплопровідності теплоізоляційних матеріалів (рис. 2.6) складається з корпусу 1, з теплоізольованими стінками 2. Внутрішній об’єм корпусу 1 утворює пустотілу камеру для розміщення досліджуваного зразка матеріалу 3. Тепловий потік до матеріалу створюється нагрівним елементом, який прикріплено до стінок корпусу 1 фіксуючими елементами кріплення 4. Нагрівний елемент складається з верхньої 5 та нижньої 6 металевої пластини заданої товщини з відомим коефіцієнтом теплопровідності. Пластини закріплено фіксуючими брусками 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.

Рисунок 2.8 – Світлина реального виконання нагрівного елемента створення теплового потоку

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. 2.9, 2.10)

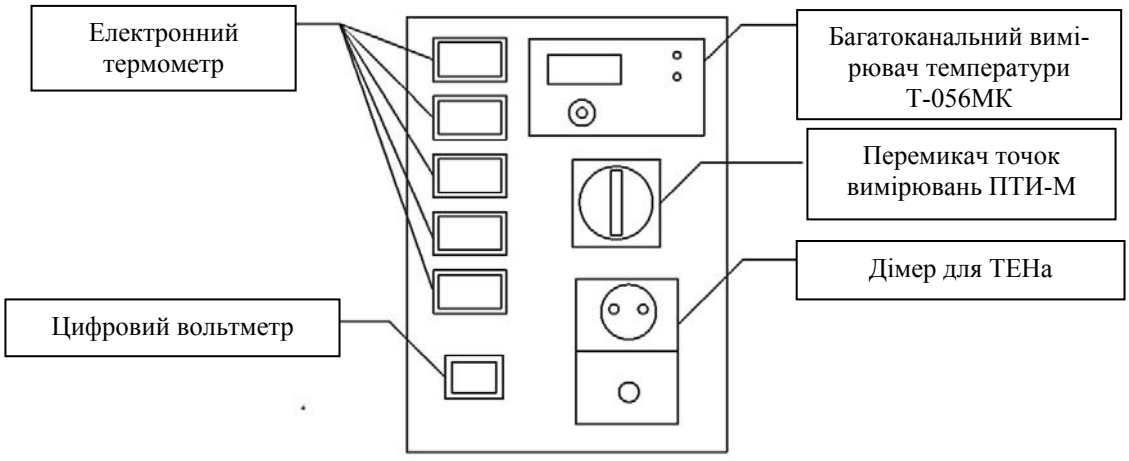


Рисунок 2.9 – Блок автоматичної реєстрації температури (БАРТ)

Рисунок 2.10 – Світлина реалізації блока автоматичної реєстрації температури: БАРТ(зліва) та дослідний зразок спресованої соломи, що розміщений в корпусі установки (справа)

Блок автоматичної реєстрації температури (БАРТ) (рис. 2.11 та 2.12) містить корпус розмірами 300×259×80 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.

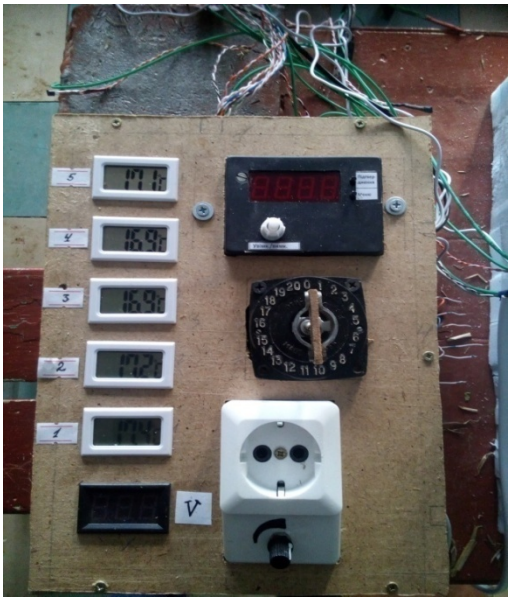


Рисунок 2.11 – Світлина загального фронтального вигляду блока БАРТ

Рисунок 2.12 – Світлина загального вигляду блока БАРТ
з комунікаціями до термопар

Багатоканальний вимірювач температури Т-056МК (рис. 2.13), 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 є; довжина проводів, що з'єднують прилад з датчиком в базовому варіанті 1,4 м; габаритні розміри приладу (Д×Ш×В): 78×21×13 мм; висота цифр індикатора приладу 14 мм.

Рисунок 2.13 – Світлина багатоканального вимірювача температури Т-056МК

Вольтметр V27D 2,5-30 В (рис. 2.14) 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.

Рисунок 2.14 – Світлина вольтметра V27D для контролю напруги

Електронний термометр ТРМ-10 (рис. 2.15) 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.

Рисунок 2.15 – Світлина електронного термометра ТРМ-10 для вимірювання температури

Перемикач точок вимірювання ПТІ-М (рис. 2.16) 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 напругою 24 В при силі струму в кожному ланцюзі до 0,1 А і активному навантаженні.

Рисунок 2.16 – Світлина перемикача точок вимірювання ПТІ-М

Димер призначений для регулювання потужності активного і індуктивного навантаження ТЕНу (рис. 2.17).

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

Рисунок 2.17 – Світлина димера для регулювання навантаження ТЕНа

Установка працює таким чином. В пустотілій камері корпусу 1 розміщують досліджуваний 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 металевим пластинам 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 величину теплового потоку, що надходить від теплої до холодної сторони досліджуваного зразка теплоізоляційного матеріалу 3. Визначення коефіцієнта 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 градуювання (рис. 2.18).

Рисунок 2.18 – Світлина хромель-копелевої термопари
для вимірювання температури (крупним планом)

Оскільки діапазон вимірювання температури знаходиться в межах 0–110°С, термопари градуюються за методом реперних точок з екстраполяцією. Причому за реперні точки приймається потрійна 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 градуюванні застосовується тер-

мопари ТПП типу S другого розряду.

В якості вимірювального приладу використовується комбінований цифровий прилад Щ300 на межі вимірювання 10 мВ, з вхідним опором R>10 МОм (рис. 2.19).

Рисунок 2.19 – Світлина цифрового комбінованого приладу Щ300

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. 2.20, 2.21 та 2.22. Корпус установки являє собою короб, який виготовлено з вологостійкої ламінованої фанери

товщиною 12 мм, з розмірами 282×282×800 мм (рис. 2.20). Ребра сторін короба укріплені металевими кутиками. Для того, щоб дістати солом'яний блок, збоку корпусу короба зроблено дверцята з металевим засувом. Для обв'язки тюка зроблено вертикальні прорізи в бокових стінках корпусу.

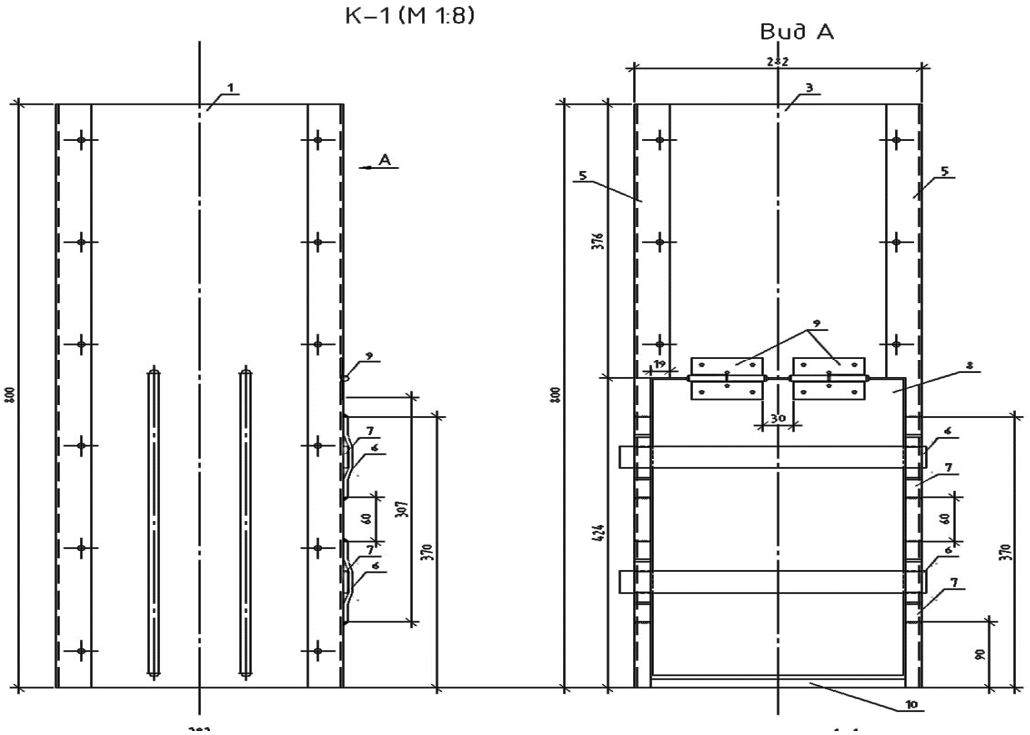


Рисунок 2.20 – Креслення установки для пресування соломи

Пресувальний шток висотою 950 мм складається з чотирьох стінок, кришки, чотирьох ребер жорсткості та подвійного днища (рис. 2.21). В днищі є прорізи для протягування через них мотузки для обв'язування солом'яних блоків.

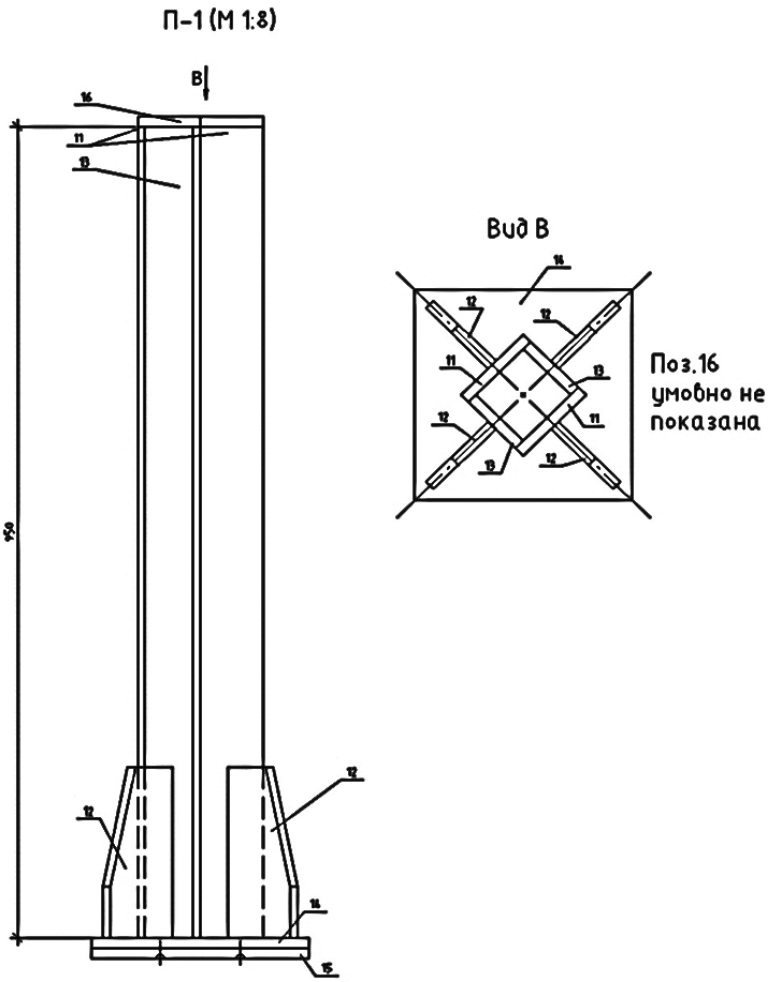


Рисунок 2.21 – Креслення штоку пресувальної установки

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

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

$$m_3 = \rho_3 V_3, \tag{2.6}$$

де ρ_3 – задана щільність зразка соломи, кг/м^3; m_3 – маса зразка соломи, кг; V_3 – об’єм зразка соломи, який визначено через об’єм необхідної висоти паралелепіпеда при пресуванні солом’яного блока, м^3.

Рисунок 2.22 – Світлина установки 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 м^3 змінюється від 0,187 кг для щільності 60 кг/м^3 до 0,50 кг для щільності 160 кг/м^3.

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/м^3 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 наведена на рис. 2.23.

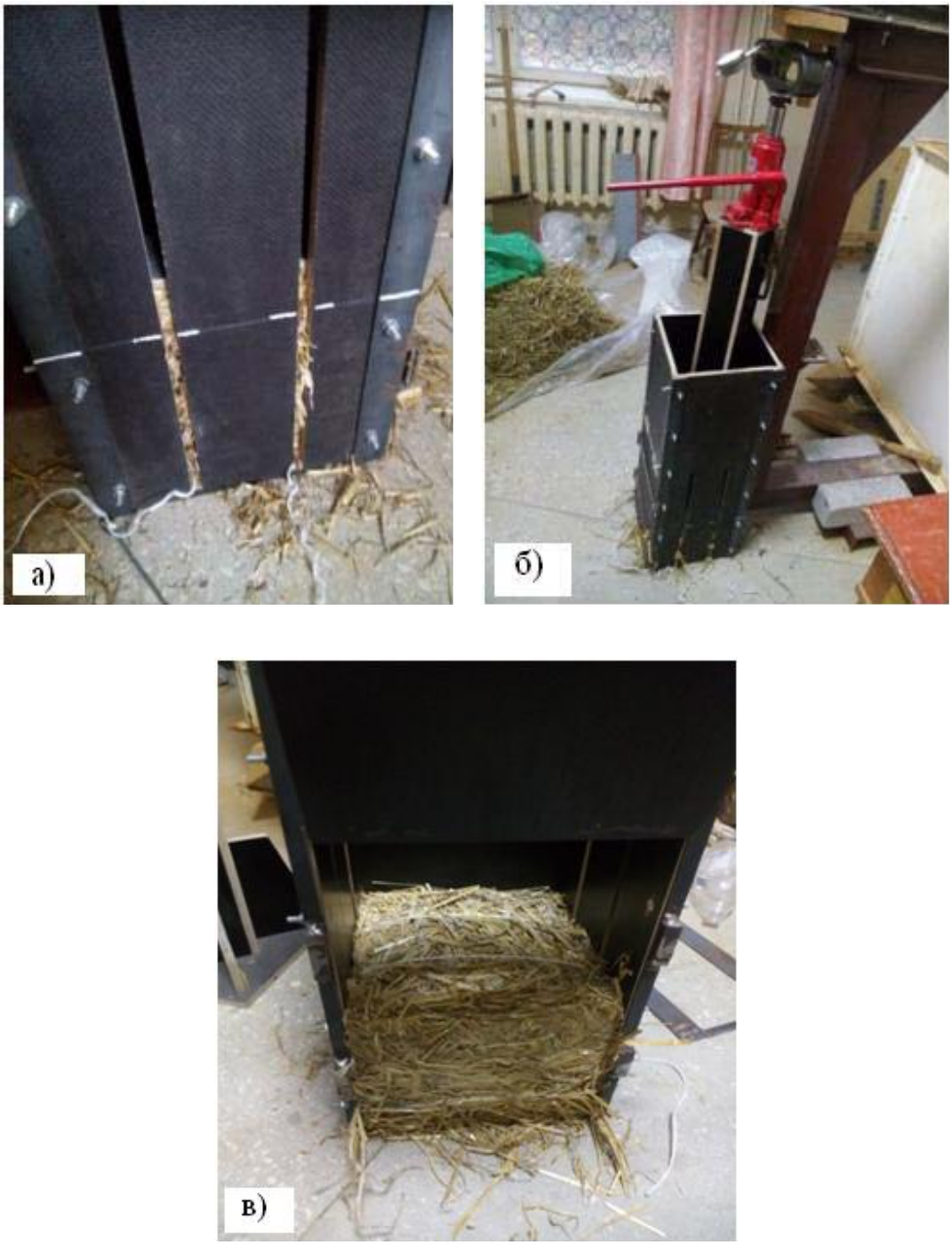


Рисунок 2.23 – Світлина процесу пресування солом’яних тюків:
а) відмітка потрібної висоти тюка на корпусі установки;
б) пресування з передачею зусилля через домкрат та опорну балку;
в) виймання готового зразка тюка після завершення пресування

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

$$m_2 = \frac{W}{100} \cdot m_1 + m_1, \tag{2.7}$$

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

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

Таблиця 2.3 – Фактична маса зразків для проведення експериментальних досліджень

Щільність, кг/м^3	Маса зразків, кг		
	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 таким чином (рис. 2.22 та 2.23):

- 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 солому пресувальним штоком за допомогою домкрату, що передає зусилля через опорну частину консольної балки (рис. 2.23а та 2.23б);

- 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. 2.23в);

- 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 блока завершується (рис. 2.24).

Рисунок 2.24 – Світлина експериментального солом'яного блока щільністю 160 кг/м^3

Експериментальне визначення коефіцієнта теплопровідності солом'яних блоків заданого діапазону щільностей починається зі створення гомогенного теплового потоку в установці за допомогою ТЕН та доведення температури верхньої та нижньої частини пластини до сталого значення (див. рис. 2.6). Для визначення температури солом'яного зразка використовуються три канали 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 зразка солом'яного блока, розміщеного в пустотілій камері установки (див. рис. 2.6), триває від 5 до 6 годин.

Коефіцієнт теплопровідності експериментальних зразків солом'яних блоків обчислюється за формулою Фур'є:

$$Q = \frac{\Delta t \cdot S}{\frac{\delta}{\lambda}}, \tag{2.3}$$

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), м^2; 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 м^2, використовується усереднений коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{\text{Ст3}} = 47$ *(Вт/м · К)* [15].

Зразки солом'яних блоків мають поперечний переріз 0,25×0,25 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 коефіцієнта теплопровідності за формулою (2.3) 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 солом'яного блока δ, м	Температура гарячої сторони металевої пластини Т1, °С	Температура гарячої сторони металевої пластини Т2, °С	Температура холодної сторони зразка соломи Т3, °С	Вологість зразка W, %	Коефіцієнт теплопровідності 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 (зволоження 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. 2.25.

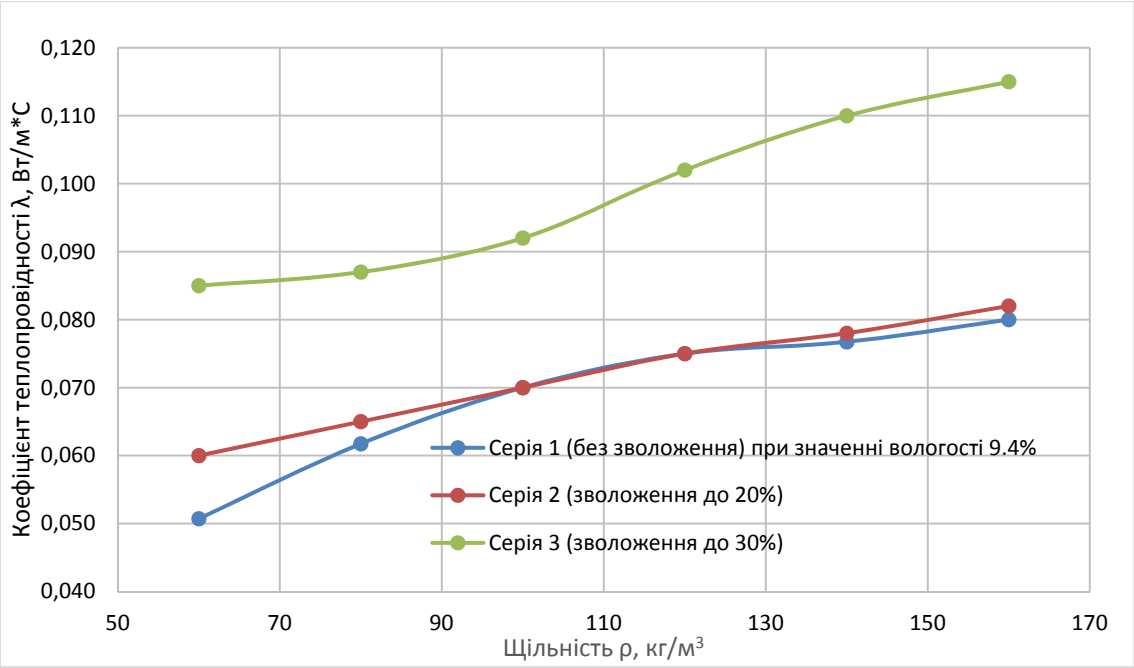


Рисунок 2.25 – Залежність теплопровідності спресованої соломи від щільності та вологості

Аналіз отриманих експериментальних даних (рис. 2.24) 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 вологи, 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 коефіцієнта теплопровідності соломи буде 0,115 Вт/м·К. Це на 30 % більше від значення коефіцієнта теплопровідності в серії 1 (із усередненим значенням вологості 9,4 %). Збільшення теплопровідності зволоженої соломи обумовлено тим, що теплопровідність води значно більша 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. 2.26.

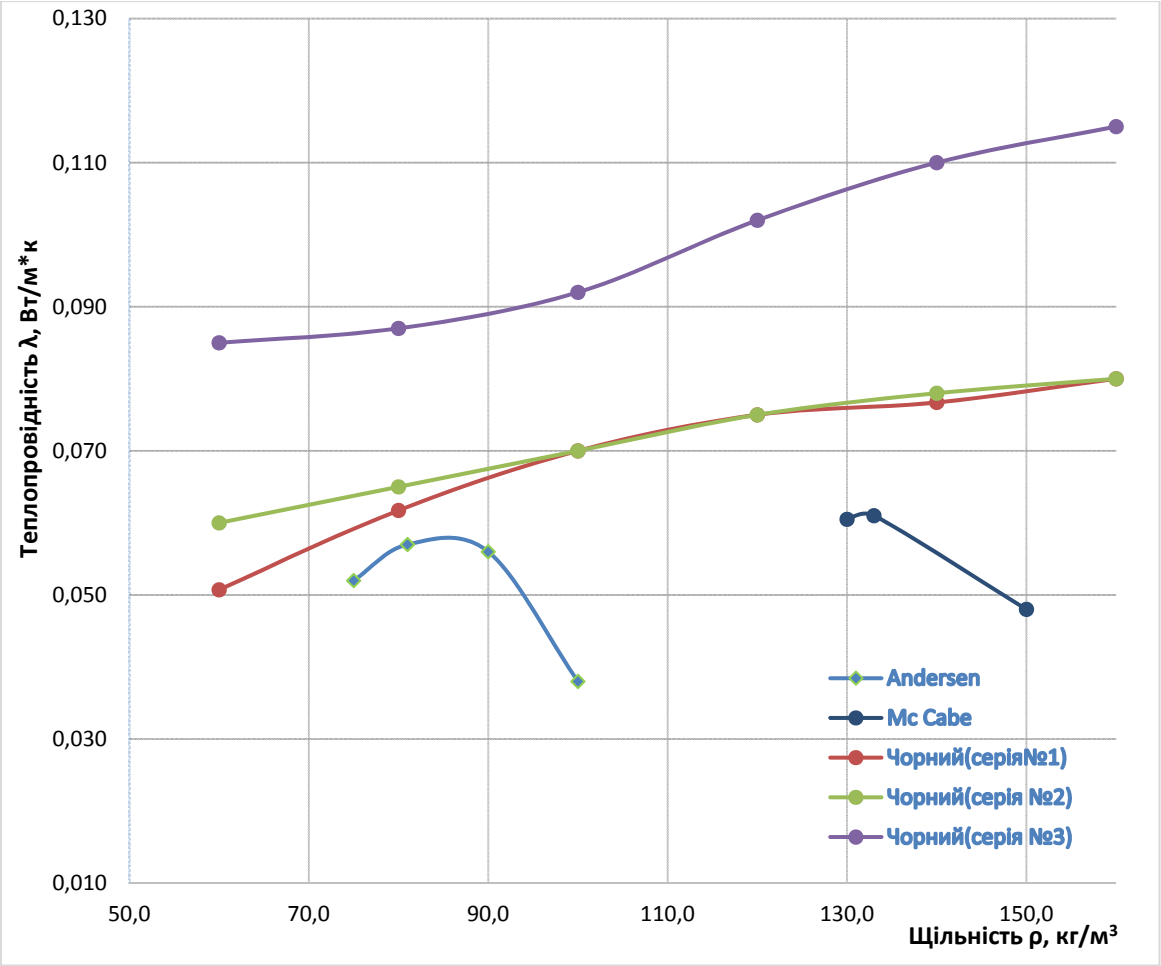


Рисунок 2.26 – Зв'язок між теплопровідністю та щільністю солом'яного блока за дослідними даними та даними інших авторів при розташуванні зразків стебел соломи перпендикулярно до теплового потоку

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] О. І. Філоненко і О. І. Юрін, *Будівельна теплофізика огороджувальних конструкцій будівель*. Полтава: ПНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2015.

[2] McCabe, J. Thermal Resistivity of Straw Bales for Construction. Master's Thesis, University of Arizona, Tucson, AZ, USA, 1993.

[3] Andersen, B.M. and Munch-Andersen, J. *Halmballer og Muslinger som Isoleringsmaterialer; Report 2001-06–21*; Statens Byggeforsknings-institut: 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,* vol. 34, no. 4, pp. 369-380.

[5] *Prüfbericht. Wärmeleitfähigkeit nach EN 12667*. München, Germany: Forchungsinstitut für Wärmeschutz e.V., 2010.

[6] Deutsches Institut für Bautechnik (DIB). [Online]. Available: 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*, no. 48, pp. 407-421, 2015.

[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.*, no. 8, pp. 91–98, 2016.

[9] L. Conti, M. Barbari, M. Monti, "Steady-State Thermal Properties of Rectangular Straw-Bales (RSB) for Building", *Buildings*, no. 6, pp. 44, 2016.

[10] K. Wei, C. Lv, M. Chen, X. Zhou, Z. Dai, D. Shen, "Development and performance evaluation of a new thermal insulation material from rice straw using high frequency hot-pressing", *Energy Build*, no. 87, pp. 116-122, 2015.

[11] A. Grelat, *Using Sustainable Materials as Walling for Individual Housing With Wood Structure; Final report.* Saint-Remy-Les-Chevreuse, France: Centre D'expertise du Batiment et des Travaux Public, 2004.

[12] Vincas Gurskis, Rytis Skominas, *Investigation of physical and mechanical properties of straw as a building material*. Latvia, 2014.

[13] M. Palumbo, A.M. Lacasta, N. Holcroft, A. Shea, P. Walker, “Determination of hygrothermal parameters of experimental and commercial bio-based insulation materials”, *Constr. Build. Mater*, no. 124, pp. 269-275, 2016.
[14] О. В. Семко, О. І. Філоненко, С. П. Панченко, С. І. Мякий, «Спорудження малоповерхових житлових будинків із солом’яних блоків та визначення їх теплотехнічних характеристик», *Вісник Придніпр. держ. академ. буд. та арх.*, № 8, с. 47-52, 2013.
[15] F. D’alessandro, F. Bianchi, G. Baldinelli, A. Rotili, SSchiavoni: Journal of Building Engineering: Italy, no. 2-3, p. 26, 2017.
[16] *Будівельна теплофізика. Курс лекцій для студентів усіх форм навчання будівельних спеціальностей*, укл. В. А. Маляренко, О. М. Герасимова, О. І. Малєєв. Харків: ХНАМГ, 2007.
[17] В. А. Маляренко, *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. [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL:http://fs.onu.edu.ua/clients/client11/web11/metod/fiz/teproprov.pdf. Дата звернення: 20.02.2021.
[19] Теоретические основы теплофизики. Теплотехнический эксперимент, у *Теплоэнергетика и теплотехника Справочник*, В. Л. Григорьева, В. М. Зорина. Ред. М.: Энергоатомиздат, 1988. 560 с.
[20] ДСТУ Б В.2.6-101.2010. «Конструкції будинків і споруд. Метод визначення опору теплопередачі огороджувальних конструкцій». Київ: Мінрегіонбуд України, 2010.
[21] Г. Г. Фаренюк, «Методи експериментального визначення показників теплової надійності конструкцій фасадної ізоляції», *Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка*, вип. 36, с. 76-83, 2010.
[22] Спосіб визначення коефіцієнта теплопровідності для піностиролу: пат. 28093 Україна: МПКGOIN 25/18. №u200707850; заявл. 12.07.2007; опубл. 26.11.2007, Бюл. № 11, 3 с.
[23] С. В. Риндюк, «Метод визначення теплопровідності будівельних матеріалів та виробів», автореф. дис. канд. техн. наук. Вінниця, 2018.

[24] Ю. С. Бікс, П. П. Чорний, «Лабораторна установка для дослідження впливу щільності солом'яного блока на його теплотехнічні характеристики» на *Міжнар. наук.-техн. конф. Інноваційні технології в будівництві*. Вінниця, 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 [Електронний ресурс]. Режим доступу: 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 [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://prom.ua/p265239000-izmeritel-teploprovodnosti-its.html. Дата звернення 12.10.2018.

РОЗДІЛ 3 БАГАТОФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ 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 сьогодення відсутня методологія оцінювання надійності забезпечення енергоефективності будівельних виробів із соломи при влаштуванні теплоізоляційної оболонки. Тому розроблення математичної моделі з оцінювання 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 огороджувальних конструкцій будівель.

При оцінюванні надійності багатофакторних систем використовують структурно-імовірнісні моделі. Ці моделі вимагають наявність 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 моделю-

вання тощо [2].

Методи оцінки надійності конструктивних елементів будівель вибирають за такими ознаками: залежно від життєвого циклу об'єкта 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 їхніх комплексних параметрів із забезпечення нормативного мікроклімату в приміщеннях протягом життєвого циклу проекту [4, 7]

$$R(t) = 1 - F(t) = P(t \leq T), \tag{3.1}$$

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 їхні значення та не завжди є достовірними.

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, значенням якої є слово. Терм-множиною є множина цих можливих значень лінгвістичних значень змінної. Нечітким висновком називається апроксимація залежності $y=f(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ за допомогою нечітких правил «ЯКЩО-ТО» та нечітких логічних операцій.

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

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

де (u_1, u_2,…, u_n) – універсальна множина U, на якій задається нечітка множина $F \in U$; $\mu_F(n_1)$ – ступінь належності елемента $u_1 \in U$ до нечіткої множини F.

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

$$\mu_c(u) = \mu_A(u) \wedge \beta_B(u), \quad (3.3)$$

до операції max

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

Нечіткі логічні операції ТА(∧), АВО(∨) 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 ($\mu_1+\mu_2+\ldots\mu_n$)=1 задається у вигляді співвідношення

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

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 Є(U) до нечіткого терму визначають за відносними оцінками рангів $r_1/r_{ij}=a_{ij}$, $I_1I = 1, n$, що створюють матрицю

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

За відомими елементами рядки матриці (3.8) обчислюють елемен-

ти всіх інших рядків. Для експертної оцінки елементів матриці (3.8) використовують дев'ятибальну шкалу Сааті [12].

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 огороджувальних стінових конструкцій. З врахуванням результатів досліджень [8] структурну модель ієрархічних співвідношень між лінгвістичними змінними, що описують відповідно теплофізичні, фізико-механічні та показники довговічності як фактори впливу на надійність забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів із соломи, представлено у вигляді дерева логічного висновку (рис. 3.1). Корінь дерева логічного висновку відповідає показнику надійності забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів із застосуванням соломи, а висячі 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, описують 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 створюються експертні нечіткі бази знань,

які характеризують зв’язки між вхідними та вихідними змінними, що визначають надійність ефективності теплоізоляційних будівельних виробів із соломи.

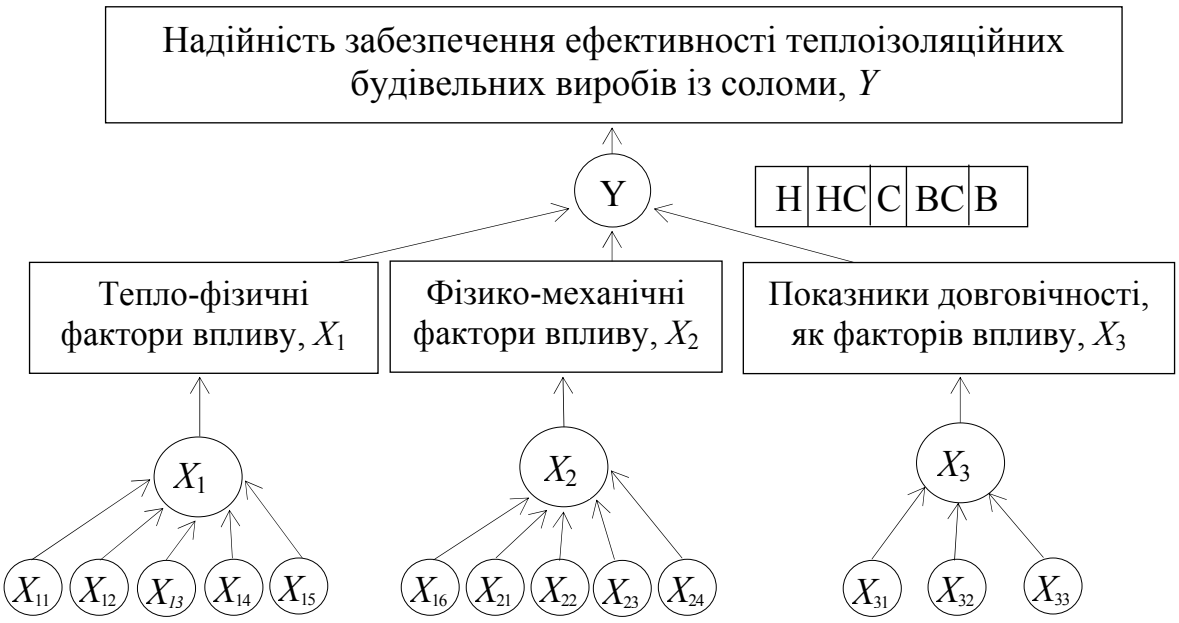


Рисунок 3.1 – Дерево логічного висновку ієрархічних зв’язків факторів, що визначають надійність забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів із соломи

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

$$Y = f(X_1, X_2, X_3), \tag{3.9}$$

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)–(3.12).

Лінгвістична змінна, 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, що 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/м^{2}К. Лінгвістична змінна цього фактора задається терм-множиною $T(X_{12})$=<низька, нижче середньої, середня, вище середньої, висока>; X_{13} – коефіцієнт теплозасвоєння теплоізоляційного матеріалу будівельного виробу визначено на універсальній множині $U(X_{13})$=(1,5; 2,0; 2,5) Вт/м^{2}К. 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) м^2/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/м^{3}год. 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 $T(X_{16})$=<низька, середня, висока>.

Лінгвістична змінна, 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} – густину теплоізоляційного будівельного виробу визначено на універсальній множині $U(X_{21})$=(100; 150; 200; 250) кг/м^3. Лінгвістичні значення цього фактора задаються терм-множиною $T(X_{11})$=<низька,

нижче середньої, середня, висока>; 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 $T(X_{22})$=<низька, середня, висока>; 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 $T(X_{23})$=<низька, середня, висока>; 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 $T(X_{24})$=<низька, середня, висока>; 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 $T(X_{25})$=<низька, середня, висока>.

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 огороджувальних 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 НС	Н НС Н	Н Н Н	Н
Н НС НС НС	НС НС Н НС	НС Н НС НС	НС
С НС С	С С НС	С С С	С
ВС ВС ВС С	ВС С ВС ВС	ВС ВС С ВС	ВС
ВС В В В	В В В ВС	В В ВС В	В

Лінгвістичним висловлюванням, що наведені 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 огороджувальних конструкцій із солом’яних виробів відповідним якісним термом:

$$\mu_H(Y) = \mu_H(X_1) \wedge \mu_H(X_2) \wedge \mu_H(X_3) \vee \mu_{HC}(X_1) \wedge \mu_H(X_2) \wedge \mu_H(X_3) \vee$$
$$\vee \mu_H(X_1) \wedge \mu_{HC}(X_2) \wedge \mu_H(X_3) \vee \mu_H(X_1) \wedge \mu_H(X_2) \wedge \mu_{HC}(X_3), \qquad (3.13)$$

$$\mu_{НС}(Y) = \mu_{Н}(X_1) \wedge \mu_{НС}(X_2) \wedge \mu_{НС}(X_3) \vee \mu_{НС}(X_1) \wedge \mu_{НС}(X_2) \wedge \mu_{НС}(X_3) \vee$$
$$\vee \mu_{НС}(X_1) \wedge \mu_{НС}(X_2) \wedge \mu_{Н}(X_3) \vee \mu_{НС}(X_1) \wedge \mu_{Н}(X_2) \wedge \mu_{НС}(X_3), \quad (3.14)$$

$$\mu_{С}(Y) = \mu_{С}(X_1) \wedge \mu_{НС}(X_2) \wedge \mu_{С}(X_3) \vee \mu_{НС}(X_1) \wedge \mu_{С}(X_2) \wedge \mu_{С}(X_3) \vee$$
$$\vee \mu_{С}(X_1) \wedge \mu_{С}(X_2) \wedge \mu_{НС}(X_3) \vee \mu_{С}(X_1) \wedge \mu_{С}(X_2) \wedge \mu_{С}(X_3), \quad (3.15)$$

$$\mu_{ВС}(Y) = \mu_{ВС}(X_1) \wedge \mu_{ВС}(X_2) \wedge \mu_{ВС}(X_3) \vee \mu_{ВС}(X_1) \wedge \mu_{ВС}(X_2) \wedge \mu_{С}(X_3) \vee$$
$$\vee \mu_{ВС}(X_1) \wedge \mu_{С}(X_2) \wedge \mu_{ВС}(X_3) \vee \mu_{С}(X_1) \wedge \mu_{ВС}(X_2) \wedge \mu_{ВС}(X_3), \quad (3.16)$$

$$\mu_{В}(Y) = \mu_{ВС}(X_1) \wedge \mu_{В}(X_2) \wedge \mu_{В}(X_3) \vee \mu_{В}(X_1) \wedge \mu_{В}(X_2) \wedge \mu_{В}(X_3) \vee$$
$$\vee \mu_{В}(X_1) \wedge \mu_{В}(X_2) \wedge \mu_{ВС}(X_3) \vee \mu_{В}(X_1) \wedge \mu_{ВС}(X_2) \wedge \mu_{ВС}(X_3). \quad (3.17)$$

Відповідно до математичного апарату нечіткої логіки [11] 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 їхніх 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)/кг/м^3.

При лінгвістичній оцінці використано терм-множини $T(X_{21})$=<низька, меньша середньої, середня, більша середньої, висока>. Матриця, яка характеризує парні порівняння різних величин густини теплоізоляційного матеріалу з точки зору їхньої близькості до терму «низька», має вигляд

$$A_{\text{низька}}(\text{X}_{21}) = \begin{array}{c|ccccc} & U_1 & U_2 & U_3 & U_4 & U_5 \\ U_1 & 1 & 6/8 & 4/8 & 2/8 & 1/8 \\ U_2 & 8/6 & 1 & 4/6 & 2/6 & 1/6 \\ U_3 & 8/4 & 6/4 & 1 & 2/4 & 1/4 \\ U_4 & 8/2 & 6/2 & 4/2 & 1 & 1/2 \\ U_5 & 8 & 6 & 2 & 2 & 1 \end{array} \qquad (3.18)$$

З врахуванням матриці (3.18) обчислюють окремі належності U_1, U_2, U_3, U_4 до терму «низька»

$$\mu_L(U_1) = 1 \Big/ (1 + {}^{6}/_{8} + {}^{4}/_{8} + {}^{2}/_{8} + {}^{1}/_{8}) = 0{,}38;$$

$$\mu_L(U_2) = 1 \Big/ ({}^{8}/_{6} + 1 + {}^{4}/_{6} + {}^{2}/_{6} + {}^{1}/_{6}) = 0{,}29;$$

$$\mu_L(U_3) = 1 \Big/ ({}^{8}/_{4} + {}^{6}/_{4} + 1 + {}^{2}/_{4} + {}^{1}/_{4}) = 0{,}19;$$

$$\mu_L(U_4) = 1 \Big/ ({}^{8}/_{2} + {}^{6}/_{2} + {}^{4}/_{2} + 1 + {}^{1}/_{2}) = 0{,}10;$$

$$\mu_L(U_5) = {}^{1}/_{(8 + 6 + 4 + 2 + 1)} = 0{,}05.$$

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

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

«менша середньої» $= \left\{ \frac{0,78}{25}; \frac{1}{50}; \frac{0,56}{75}; \frac{0,33}{100}; \frac{0,11}{125} \right\}$,

«середня» $= \left\{ \frac{0,5}{25}; \frac{0,75}{50}; \frac{1}{75}; \frac{0,75}{100}; \frac{0,5}{125} \right\}$,

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

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

Графічна інтерпретація нечітких множин для однієї із лінгвістичних змінних (функції належності), як фактора впливу на цільову функцію зображено на рис. 3.2. Слід зазначити, що метод побудови цих функцій належності засновано на парних порівняннях згідно з дослідженнями.

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

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що встановлюють зв'язок між факторами впливу на системному рівні на надійність забезпечення енергоефективності багатошарових теплоізоляційних огороджувальних конструкцій, виконується у вигляді нечіткої матриці знань за відповідними термами.

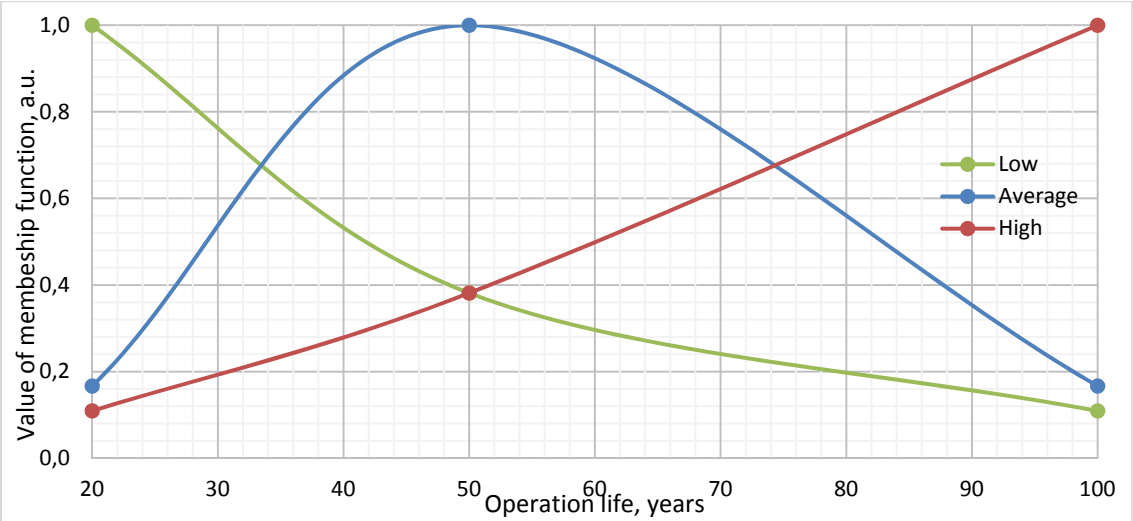


Рисунок 3.2 – Функції належності для лінгвістичної змінної «густина теплоізоляційного матеріалу»

Отримана система нечітких логічних рівнянь до лінгвістичних висловлювань, які характеризують поверхню належності змінних за відповідними термами, що дозволить з врахуванням запропонованої ма-

тематичної моделі здійснювати інтелектуальну підтримку прийняття рішень щодо підвищення надійності забезпечення енергоефективності багатошарових теплоізоляційних огороджувальних конструкцій.

3.2 Багатокритеріальна оцінка потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій будівель

3.2.1 Теоретичні засади багатокритеріальної оцінки потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій будівель

Глобальна тенденція енергозбереження та концепція сталого розвитку дедалі більше стимулюють використання багатокритеріальних методів аналізу факторів впливу (MCDA) при прийнятті рішень. Як зазначено в [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 збільшує моральну відповідальності перед наступними поколіннями. Вибір огороджувальних конструкції елементів стелі / покриття вимагає одночасного аналізу низки впливових факторів [13–19]. 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, їхня товщини та типа для сучасного будівництва за умов біосферосумісності, який є водночас енергоефективним, дешевим та екологічним, все ще залишається невирішеною проблемою [20]. Аналогічна думка висловлена в [15] «... ідентифікація найкращих рішень залишається відкритою проблемою». Вибір доцільного методу (методів) для об’єктивної оцінки різних будівельних конструкцій з точки зору сталого розвитку розглядається в дослідженнях [16, 19, 21, 22] та ін.

Методологія дослідження методом аналізу ієрархій (AHP)

Використання методу аналізу ієрархії AHP для багатовимірного аналізу досліджуваних типів огороджувальних 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 нестаціонарного стану теплових характеристик – внутрішня поверхнева теплоємність (*the internal areal heat capacity*) кДж/м^{2}К; характеристика стаціонарного теплового процесу (час теплової інерції τ [24], годин; безрозмірний показник теплової інерції оболонки *D;* загальний термічний опір оболонки R_{tot}, м^{2}К/Вт) [25]; маса стіни, кг/м^2 та вартість стінових матеріалів, €/м^2.

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

Етапи дослідження методом аналізу ієрархії AHP при визначенні узагальненого індексу потенціалу енергоефективності огороджувальної конструкції такі.

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

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

де r_1, r_2, r_3, r_n – відповідні значення пріоритетів оцінюваних параметрів матриці, що характеризують значення шести включених параметрів (внутрішня поверхнева теплоємність, час теплової інерції τ, показник теплової інерції оболонки *D*, загальний термічний опір огороджувальної конструкції R_{tot}, маса стіни та витрати коштів на матеріали стіни).

За відомими елементами рядка матриці (3.19) обчислюються еле-

менти всіх інших рядків. Довільний елемент $a_{ij} = r_{\text{i}} / r_{\text{j}}$ з відомими елементами $a_{kj} = r_k / r_j,\ k,i = 1,...,n.$ певного n-го рядка обчислюється як $a_{ji} = a_{kj} / a_{ki},\ j,k = 1,...,n.$

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

$$\sqrt[n]{1 \times \frac{r_1}{r_2} \times \frac{r_1}{r_3} \times ... \times \frac{r_1}{r_n}} = m_1. \tag{3.20}$$

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

$$\frac{m_1}{m_1 + m_2 + ... + m_n} = x_1, \tag{3.21}$$

де x_1, x_2, ... 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 (3.19) (*consistency index,CI*) обчислюється як [26]

$$CI = \left(\eta_{\max} - n\right) / n - 1, \tag{3.22}$$

де n – ранг матриці.

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

$$CR = CI \ / \ MRCI, \tag{3.23}$$

де *MRCI* – середній індекс випадкової узгодженості є середнім 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*-го стінового огородження у вигляді адитивної нормалізованої композиції [25] обчислюється таким чином:

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

де *i* – *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 цим методом такі [19].

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

Крок 2. Отриману 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 з відповідною важливістю критерію для даної серії («Чим більше – тим краще», «Чим менше – тим краще»).

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

$$\hat{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}, \tag{3.25}$$

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

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

$$\hat{x}_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}. \tag{3.26}$$

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

$$ds_{ij} = \hat{x}_{ij} - \max \hat{x}_{ij}. \tag{3.27}$$

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

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

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

Крок 5. У зв'язку з відсутністю іншого параметра цільової функції на результати узагальненого індексу, обчислюється нормоване значення сірого відносного ступеня [29]

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

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 огороджувальної конструкції накопичувати тепло або проміжок часу, протягом якого відбувається стабілізація температури між зовнішньою та внутрішньою поверхнями. Як зазначено в [23] для огороджувальних конструкцій, які в основному завжди є багатошаровими, «… неможливо використовувати залежність тривалості квазістаціонарного теплового процесу (час теплової інерції) в простому вигляді для однорідної стіни» за формулою

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

де c – питома теплоємність матеріалу стіни, кДж / кг·м; ρ – щільність матеріалу шарів огороджувальних конструкцій стін, кг / м^3; $R = \frac{\delta}{\lambda}$ – термічний опір стіни, м^2·К / Вт; δ – товщина шару огороджувальної конструкції стіни, м; λ – теплопровідність матеріалу оболонки, Вт / м · К.

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

$$\tau_u = \tau_u^{'} L_n, \tag{3.31}$$

де $\tau_u^{'}$ – час теплової інерції однорідної стінової конструкції товщиною δ з параметрами першого шару, що визначається залежністю [23]

$$\tau_u^{'} = c_i \rho_i \delta^2 \,/\, \pi^2 \lambda_i, \tag{3.32}$$

L_n – коефіцієнт шаруватості огороджувальної конструкції, який розраховується як [23]

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

де δ_{tot} – загальна товщина багатошарової огороджувальної конструкції, м; δ_1 – товщина першого шару багатошарової огороджувальної конструкції, м; $\Delta\delta_i = \sum_{j=i+1}^{n} \delta_j$ – товщина багатошарової огороджувальної конструкції, починаючи з другого шару $i = 2$, м.

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

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

де $S_i = \sqrt{\frac{2\pi\lambda_i c_i \rho_i}{T}}$ коефіцієнт теплопоглинання Вт / м^2·К, i-го шару огороджувальної конструкції [32]; Т – період теплових коливань, с.

Для визначення коефіцієнта теплопоглинання прийнято двадцятичотиригодинний, тобто добовий період теплових коливань, а в секундах це Т=24·3600=86400 с.

3.2.2 Чисельний аналіз моделювання оцінки потенціалу енергоефективності огороджувальних 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 землебиту (тип «D»), стіна з чурбакобетону (тип «Е»), SIP стіна (фанера + екофібра) (тип «F»), комбінована стіна з арболіту+соломи (тип «G») та стіна з енергоефективного теплоблоку (тип «Н») [19,34]. Ширина всіх досліджуваних типів стін становить 500 мм. Схеми перерізу типів стін наведено на рис. 3.3.

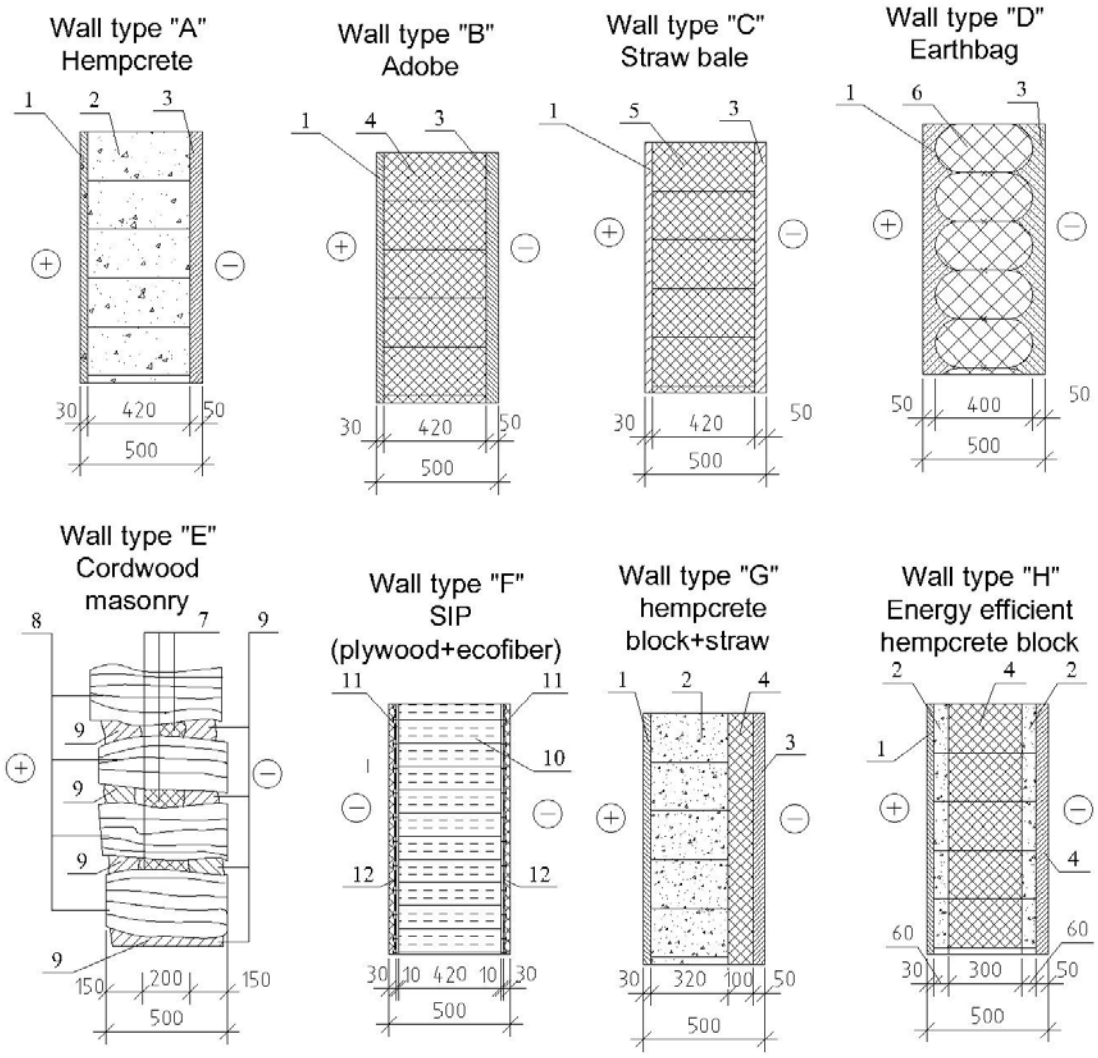


Рисунок 3.3 – Схема поперечного перерізу розглянутих типів стін:
1 – внутрішня вапняно-піщана штукатурка, 2 – арболіт, 3 – зовнішня вапняно-піщана штукатурка, 4 – саман, 5 – солом’яна панель, 6 – землебит, 7 – посічена солома, як утеплювач, 8 – чурбакобетон, 9 – вапняно-піщаний розчин, 10 – екофібра, 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] (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Теплофізичні, фізичні та економічні характеристики матеріалу огороджувальної конструкції

Будівельні матеріали	Питома теплоємність ci, Дж/кг*К	Теплопровідність λi, Вт/м*К	Густина ρi, 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
Чурбакобетон*	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 огороджувальної конструкції R_{tot}, м^{2}К/Вт розраховується, приймаючи значення внутрішнього $R_{si} = 8{,}7$ м^{2}К/Вт, а також зовнішнього опору теплопередачі $R_{se} = 23.0$ м^{2}К / Вт, згідно з Додатком В 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 стінових матеріалів, €/m^2
Стіна «A» (Арболіте)	58,39	12,16	7,14	37,57	300	33,59
Стіна «B» (Саман)	18,77	7,08	1,28	62,76	720	11,10
Стіна «C» (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 «E» (Чурбакобетон)*	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 теплоблок)	21,17	7,51	6,39	46,45	194	34,55

1. Співвідношення обсягів глини $V_г$ та деревини $V_д$ зовнішнього та внутрішнього шару становить від 1/3 до 2/3.

2. Дерев'яні чурбаки із сосни (волокна паралельні тепловому потоку), глиняно-піщаний розчин.

3. Питома теплоємність c_i конструкції змішаного шару визначається як $(c_д \times V_д + c_г \times V_г) / (V_д + V_г)$.

4. Інші параметри, а саме щільність і середня теплопровідність знаходяться за подібними залежностями.

Графічне порівняння отриманих значень (див. табл. 3.3) для різних типів огороджувальних конструкцій представлено на рис. 3.4–3.9.

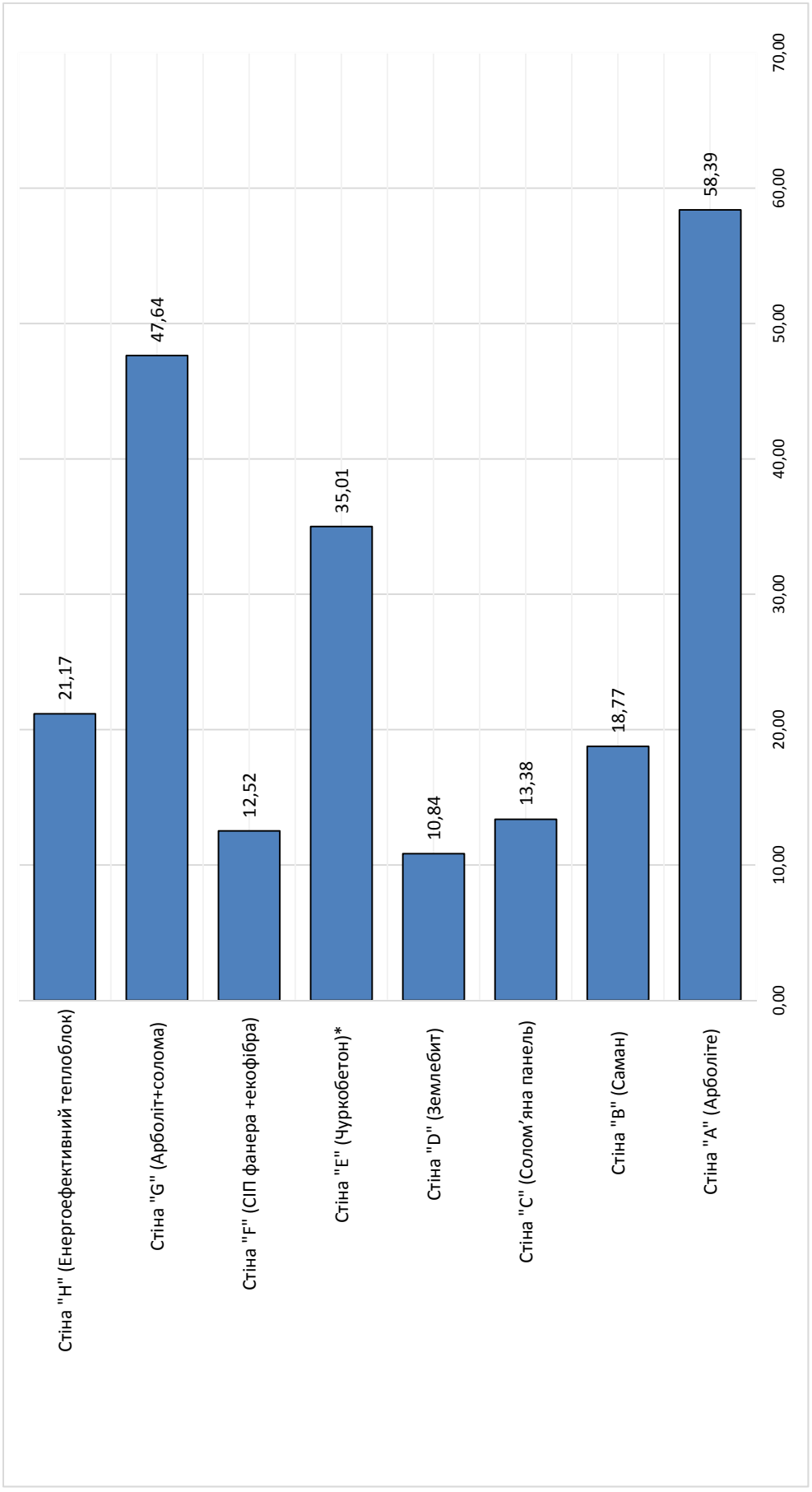


Рисунок 3.4 – Загальний час сумарної теплової інерції τ, год

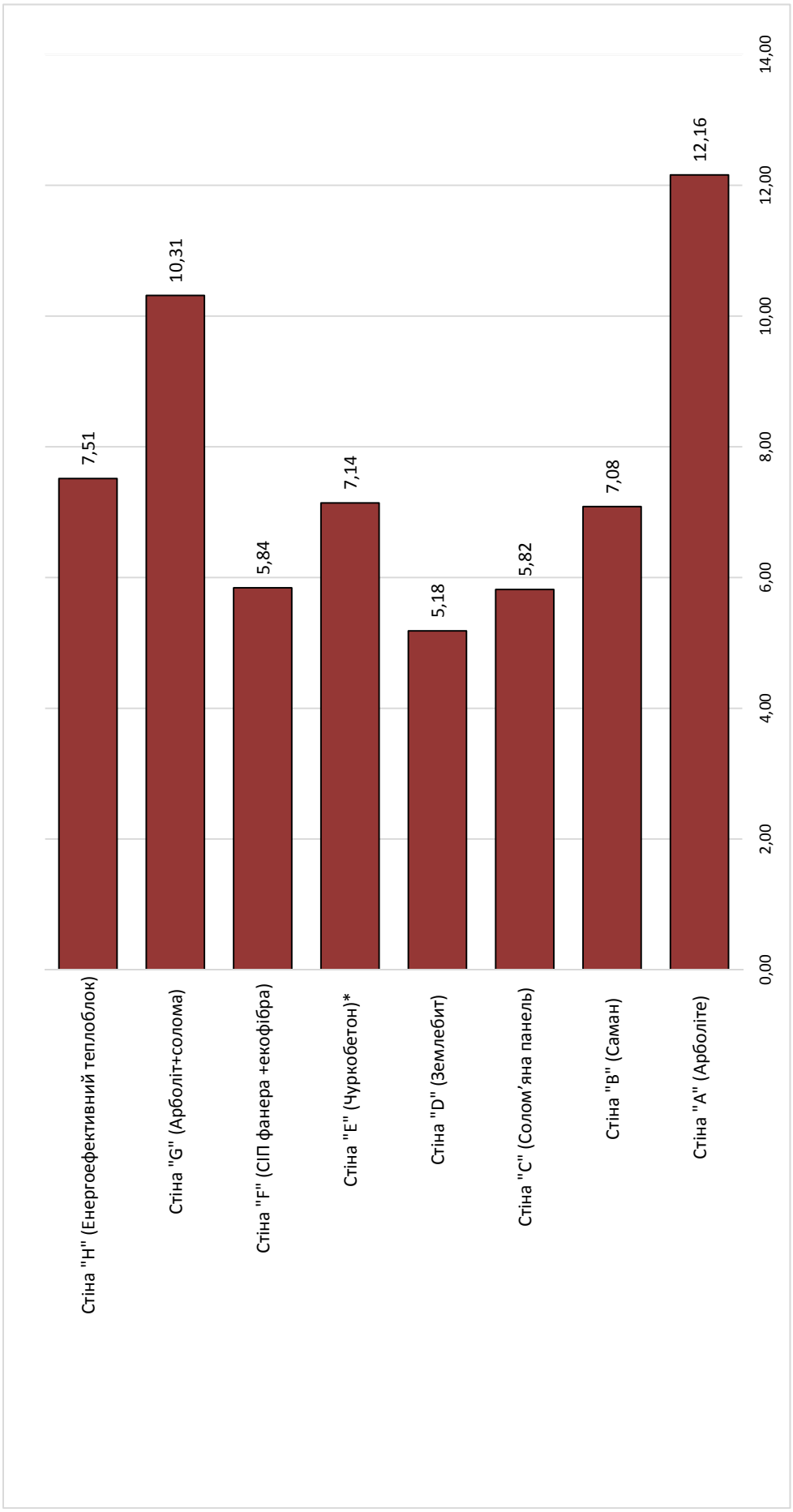


Рисунок 3.5 – Показник теплової інерції стін, D

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 один параметр, наприклад час теплової інерції τ, через інший, безрозмірний показник теплової інерції D.

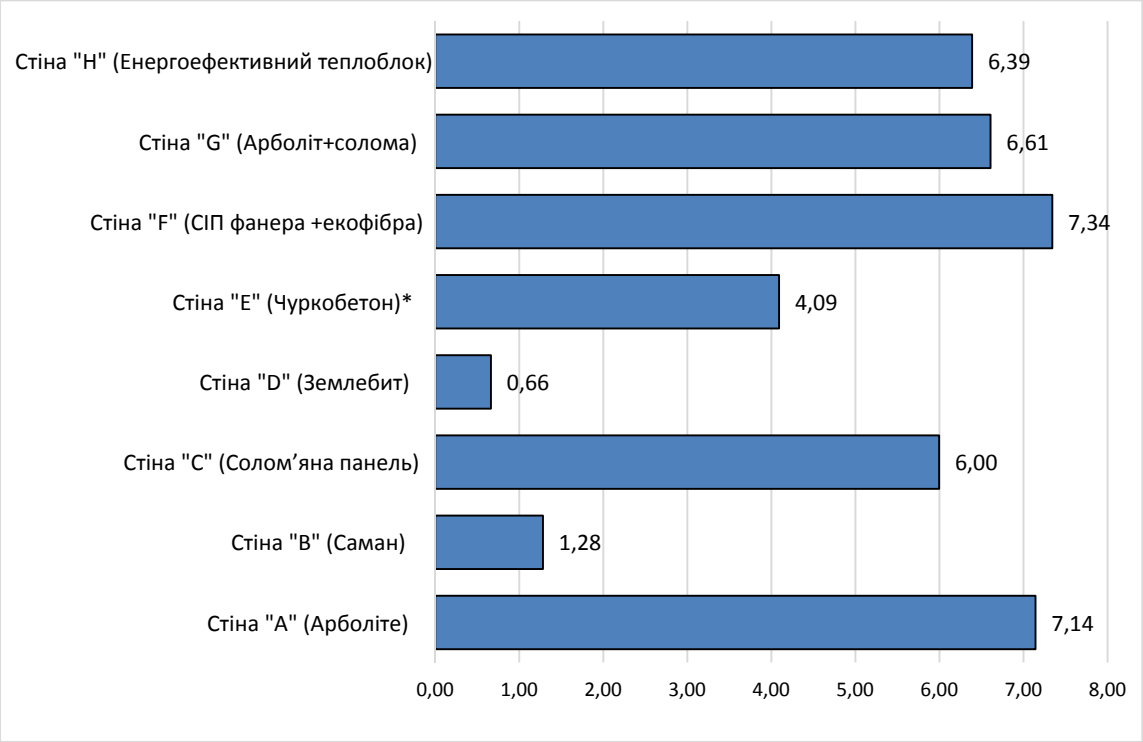


Рисунок 3.6 – Загальний термічний опір стін R, м^{2}К / Вт

Аналіз діаграми на рис. 3.6 показав, що такі стіни, як тип «D» і тип «B», не можуть бути застосовані для нового будівництва через їх низьке і неприйнятне значення термічного опору, як слід (Rq, min = 3,3 м2К / Вт для першої температурної зони, згідно з ДБН В. 2.6-31: 2016) [24]. Інші типи стін можуть застосовуватись як огороджувальні 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.

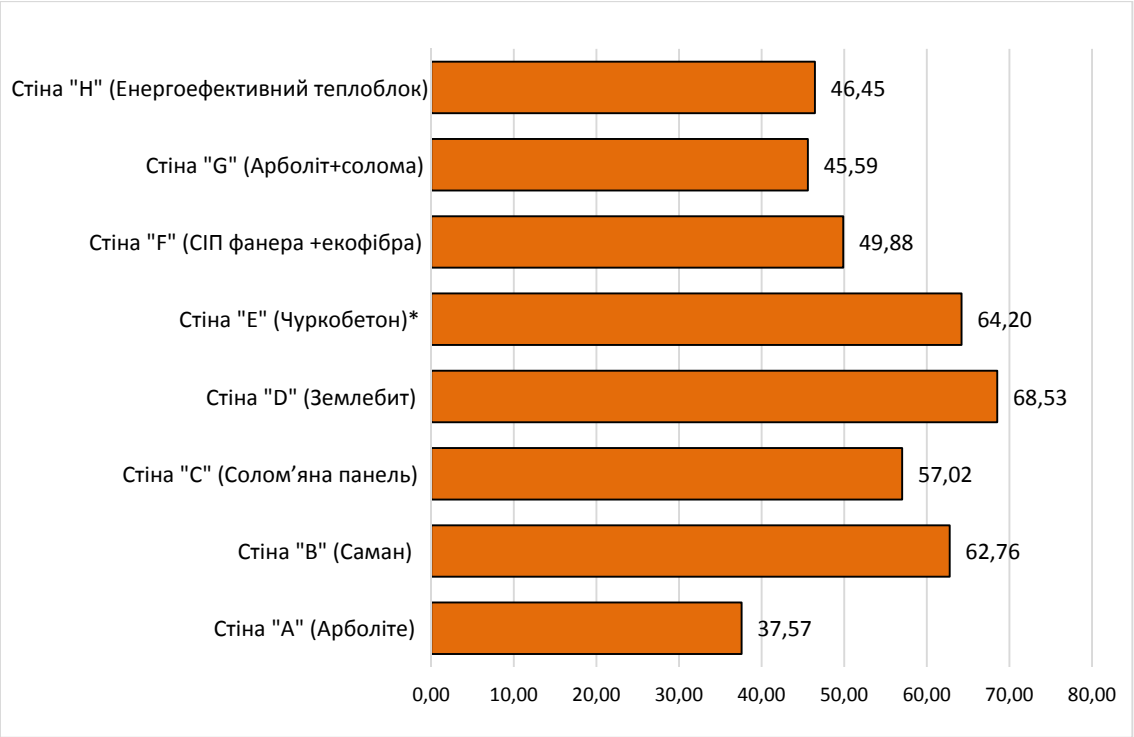


Рисунок 3.7 – Внутрішня поверхнева теплоємність огороджувальних конструкцій кДж/м^{2}К, за ISO 13786: 2017 [23]

Значення внутрішньої поверхневої теплоємності характеризує кількість тепла, яке може бути закумульоване одним квадратним метром поверхні огороджувальних 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 з рис. 3.7, найкращим типом огороджувальної 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.

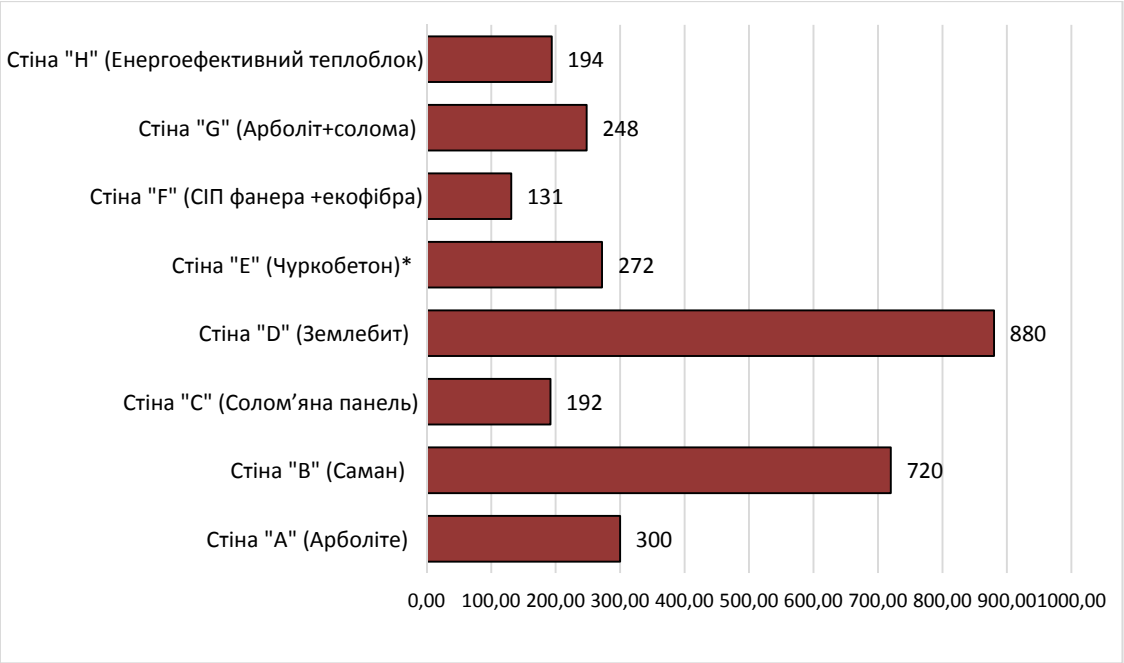


Рисунок 3.8 – Маса стінового огородження, кг / м^2

Вважається, що більша маса стіни огороджувальних конструкцій вимагає більших капітальних витрат на облаштування фундаменту. Таким чином, з цієї точки зору стіна типу «D» з масою 880 кг/м^2 є найдорожчою, порівняно зі стіновою конструкцією типу «F» з мінімальною масою стіни – 131 кг/м^2. 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.

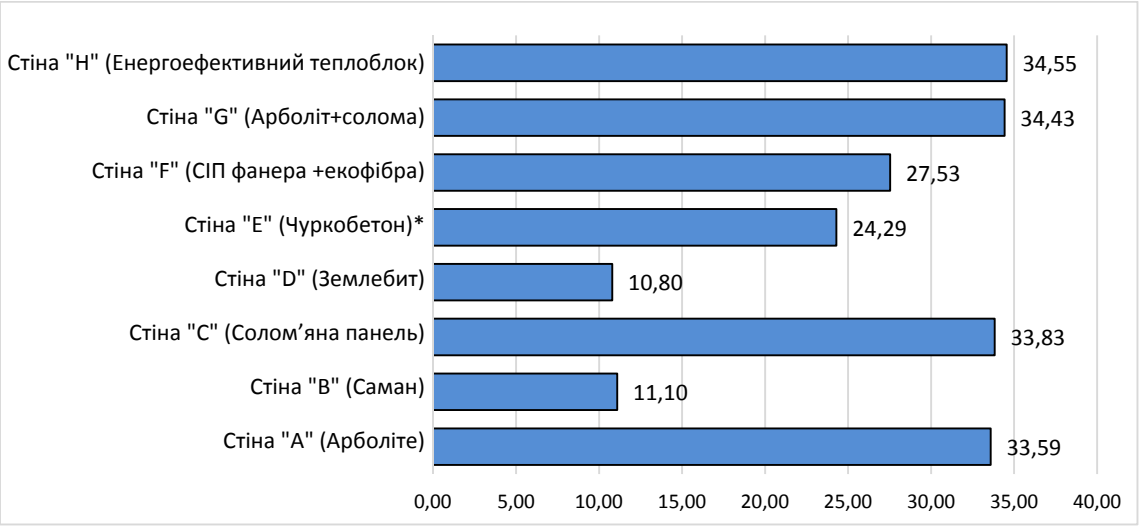


Рисунок 3.9 – Вартість стінових матеріалів, € / м^2

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 «B» та «D» (рис. 3.9). Беручи до уваги інші параметри, особливо теплофізичні характеристики стін огороджувальних 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 огороджувальних конструкцій. Трирівнева ієрархічна модель, згідно з AHP [25], може бути побудована для визначення безрозмірного узагальненого індексу потенціалу енергоефективності огороджувальної конструкції (рис. 3.10).

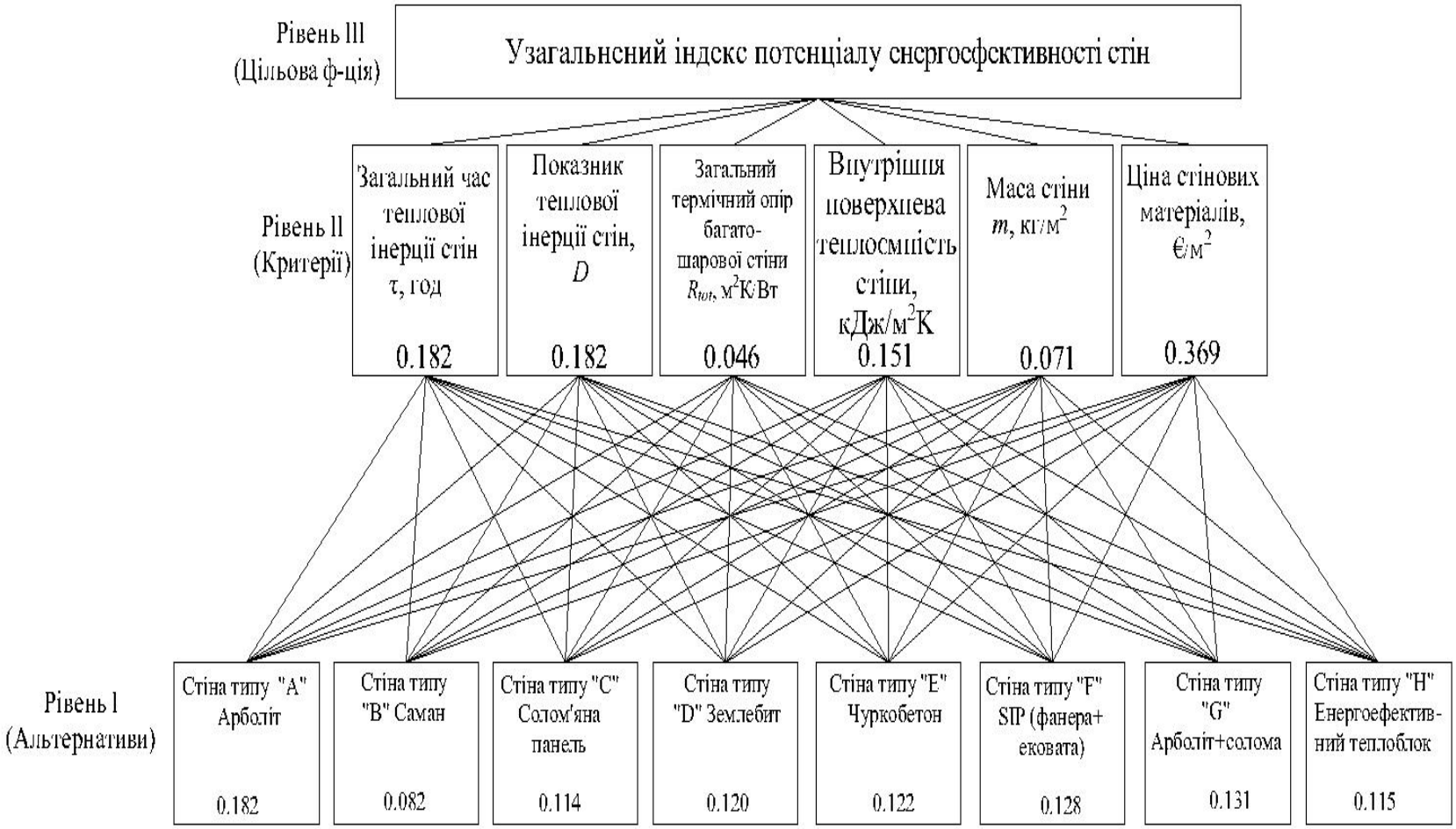


Рисунок 3.10 – Ієрархічна модель узагальненого індексу потенціалу енергоефективності огороджувальної конструкції

Згідно з зазначеним вище поетапним розрахунком методології багатокритеріальної оцінки AHP, числа в прямокутниках рівня I ієрархічної моделі альтернативного стінового огородження 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 рівняннями (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 (див. рис. 3.10).

Таблиця 3.4 – Матриця попарного порівняння для «Критеріїв» (рівень II на рис. 3.~~3~~10)

Критерії	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, €/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}, м^{2}К/Вт	1/4	1/4	1	1/3	1/2	1/7	0,338	0,046
Внутрішня теплоємність стіни, кДж/м^{2}К	1	1	3	1	2	1/3	1,122	0,151
Маса стіни m, кг/м^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 λ_{max}= 6,039		Індекс узгодженості CI=0,196			Коефіцієнт узгодженості CR=0,158			

У матриці (див. табл. 3.4) у кожній клітині експертні оцінки переваг факторів впливу проранжовано за популярною 9-бальною шкалою Сааті [35]. Крім того, заповнення матриці в табл. 3.4 здійснюється за правилом: число більше одиниці розміщується в клітинку, якщо оцінений критерій ліворуч має перевагу над критерієм над ним за шуканим параметром. Числа менші одиниці розміщуються у відповідних комірках, якщо оцінюваний параметр ліворуч має нижчу перевагу над оціночним критерієм вище розташованого параметра. Для визначення узагальненого індексу потенціалу енергоефективності варіанта стінового огородження (рівень III на рис. 3.10) для конкретної альтернативи стіни отримане значення кожного локального вектора нормованої ваги критерію (див. останній стовпець у табл. 3.4) кожного з факторів, що мають вплив (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.

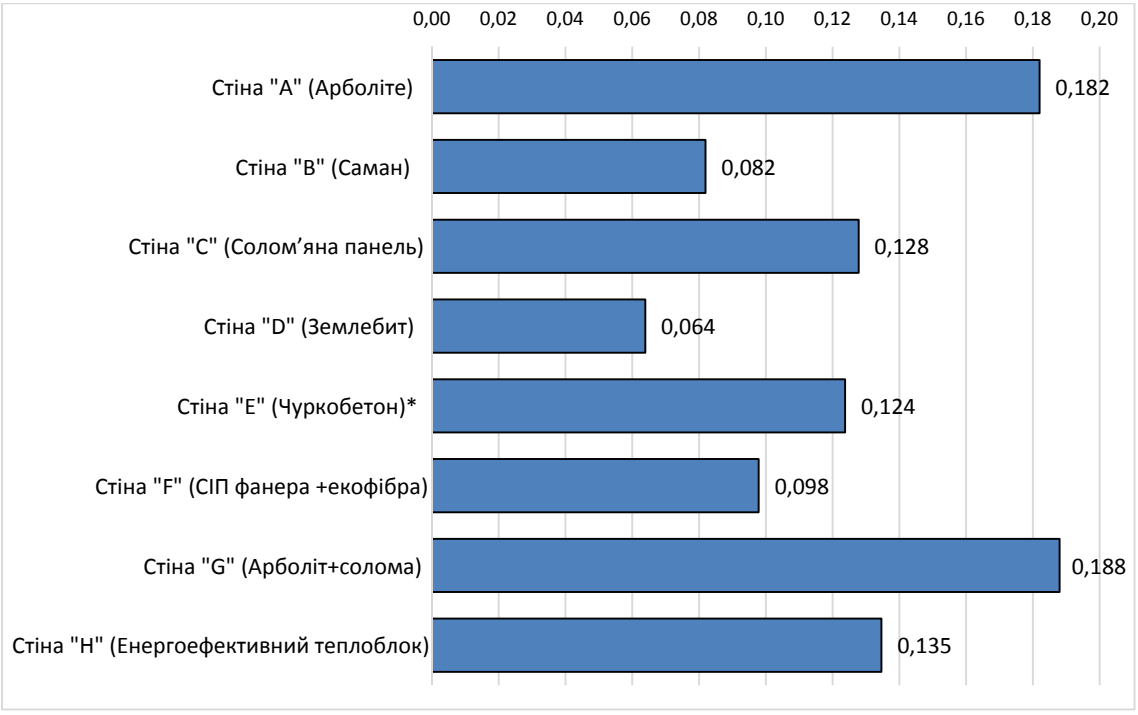


Рисунок 3.11 – Узагальнений показник потенціалу енергоефективності огороджувальної конструкції (за АНР)

Аналіз показника потенціалу енергоефективності стінових огороджувальних 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 менший, 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 рівнянням (3.25) та (3.26) значення досліджуваних параметрів, що характеризують особливості стінових огороджувальних конструкцій (див. табл. 3.3).

Таблиця 3.5 – Нормалізовані характеристики стінових огороджувальних 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» (Чурбако-бетон)	0,508	0,281	0,513	0,860	0,812	0,432
Стіна «F» (СІП фанера +екофібра)	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» (Енергоефективний 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 огороджувальних конструкцій, що представлені у табл. 3.5, від максимального значення.

Таблиця 3.6 – Відхилення від максимального значення нормалізованих характеристик для розглядуваних стінових огороджувальних 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 «A» (Арболіт)	0,000	0,000	0,030	1,000	0,226	0,960
Стіна «B» (Саман)	0,833	0,728	0,907	0,186	0,786	0,013
Стіна «C» (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 «E» (Чурбакобетон)	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

В табл. 3.7 наведено коефіцієнти, що визначені методом сірого реляційного аналізу (GRA) та ранжування альтернатив згідно з формулами (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 «A» (Арболіт)	1,000	1,000	0,943	0,333	0,689	0,343	0,718	0,155
Стіна «B» (Саман)	0,375	0,407	0,355	0,729	0,389	0,975	0,538	0,116
Стіна «C» (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 «E» (Чурбако-бетон)	0,504	0,410	0,507	0,782	0,727	0,468	0,566	0,122
Стіна «F» (СІП 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.

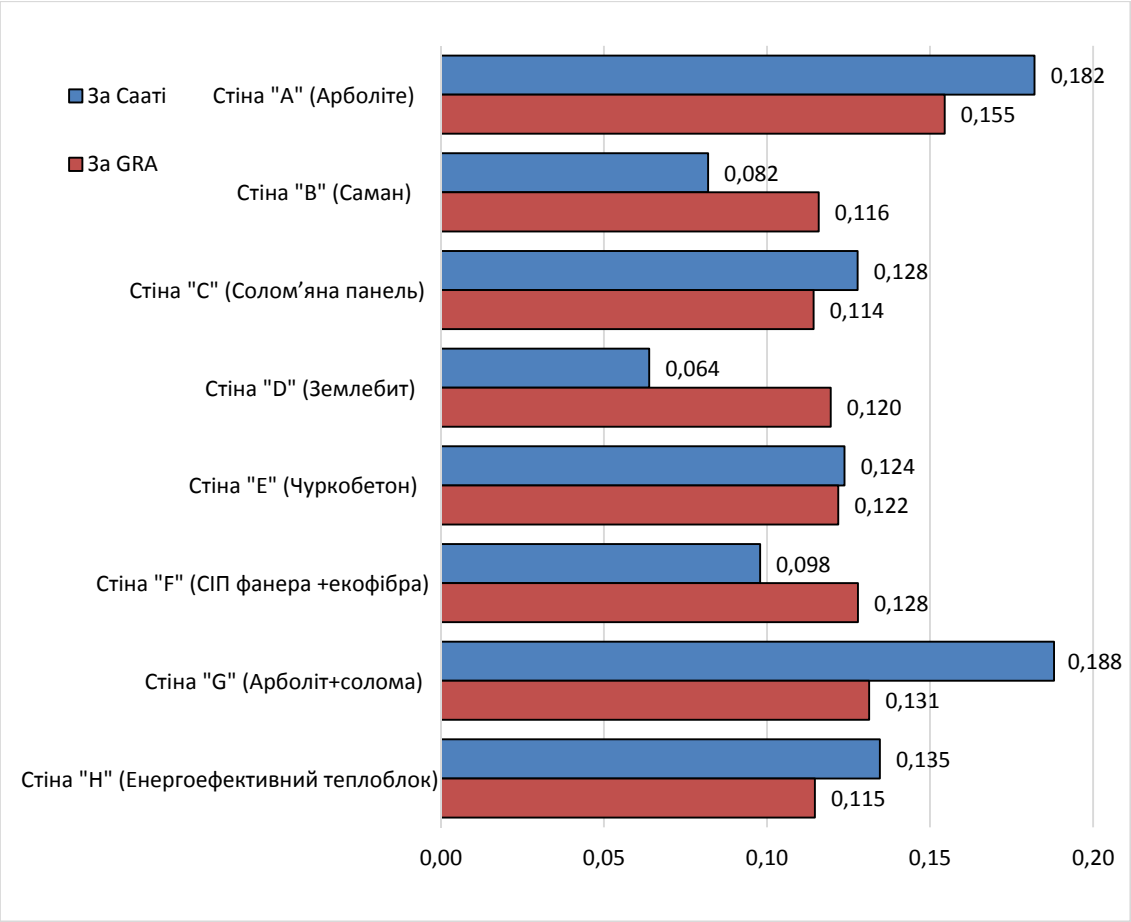


Рисунок 3.12 – Узагальнений індекс потенціалу енергоефективності огороджувальної конструкції за методами AHP та GRA

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

Аналіз результатів на рис. 3.12 виявив, що лише стіна типу «E» (чурбакобетон) 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 AHP. 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 «A» 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 огороджувальних конструкцій будівель.

Оцінка огороджувальної 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 огороджувальних 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 проектантам 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 огороджувальної конструкції може бути одним із інструментів при обґрунтуванні типу огороджувальних конструкцій. Проведені дослідження показали, що найкращим типом стін з точки зору узагальненого індексу потенціалу енергоефективності є стіна з арболіту та стіна арболіт + солома, майже втричі менше значення індексу виявлено у стіни із землебиту. Стіни з саману, чурбакобетону та солом'яних панелей мають практично однакове значення узагальненого індексу потенціалу енергоефективності. При аналізі результатів виявлено, що метод аналізу ієрархії (AHP) показав більшу неоднорідність результатів, ніж метод сірого реляційного аналізу (GRA). Можливою причиною цього є різниця в техніках оцінювання. AHP 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, №3, с. 5, 2017.

[2] Г. С. Ратушняк, О. Г. Ратушняк, *Управління проектами енергозбереження шляхом термореновації будівель*. Вінниця: Універсум-Вінниця, 2006. 120 с.

[3] ДБН В.6-31:2016. *Теплова ізоляція будівель*.[Чинний від 2017-05-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2017, 33 с.

[4] О. В. Семко, О. І. Філоненко, С. П. Панченко, Мякий, «Спорудження малоповерхових житлових будинків із солом'яних блоків та визначення їх теплотехнічних характеристик», *Вісник Придніпр. держ. академ. буд. та арх*., №8, с. 47-52, 2013.

[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] L. Brojan, A. Petric, Peggi L. Clouston, "A comparative study of brick and straw bale wall systems from environmental, economical and energy perspectives", *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 8, no. 11, pp. 920-926, 2013.

[7] Г. П. Фаренюк, *Основи забезпечення енергоефективності будинків та теплової надійності огороджувальних конструкцій*. Київ: Гамма-Принт, 2009.

[8] Г. С. Ратушняк, «Фактори надійності забезпечення енергоефективності багатошарових теплоізоляційних будівельних виробів із застосуванням соломи», *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, № 2, с. 25-30, 2018.

[9] Vytautas Stankevicius, Liutauras Kairys, "The Effect of stochastically dependent physical parameters on the materials thermal receptivity coefficient", *Materials Science (Medziagton)*, vol. 11, № 2, pp. 188-192, 2005.

[10] F. Domingues-Munoz, B. Anderson, I. M. Cejudo-Lopez, A. Carrillo-Andres, "Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials", in *Eleventh International IBPSA Conference*. Glasgow. Scotland, 2009, pp. 1008-1013.

[11] Ю. И. Матюшкин, Б. И. Мокин, А. Л. Ротштейн, «Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний».

Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002.
[12] Т. Саати, *Аналитическое планирование. Организация системы пер. сант*. М.: Радио и связь, 1991.
[13] J. J. Wang, Y. Y. Jing, C. F. Zhang, J. H. Zhao, "Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making", *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 13, № 9, pp. 2263-2278, 2009. Doi:10.1016/j.rser.2009.06.021.
[14] W. Bläsi, *Bauphysik. Bibliothek des technischen* Wissens, 3 Auflage. Haan: Verlag Europa Lehrmittel, 2001.
[15] F. Stazi, Thermal Inertia in Energy Efficient Building Envelopes. Butterworth-Heinemann, 2017. [Online]. Available: 10.1016/B978-0-12-813970-7.00001-7.
[16] B. A. Shimray, K. M. Singh, R. K. Mehta, "A survey of multi-criteria decision making technique used in renewable energy planning", *International Journal of Computer, v*ol. 4523, pp. 124-140, 2017.
[17] Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач, *Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий*. Москва: АВОК, 2012.
[18] Г. П. Фаренюк, *Основи забезпечення енергоефективності будинків та теплової надійності огороджувальних конструкцій*. Київ: Гамма-Принт, 2009.
[19] J. J. Wang, Y. Y. Jing, C. F. Zhang, X. T. Zhang, G. H. Shi, "Integrated evaluation of distributed triple-generation systems using improved grey incidence approach", *Energy*, vol. 33, no 9, pp. 1427-1437, 2008. doi: 10.1016/j.energy.2008.04.008.
[20] Y. Biks, G. Ratushnyak, O. Ratushnyak, "Energy performance assessment of envelopes from organic materials", *Architecture Civil Engineering Environment*, № 3, pp. 55-67, 2019. doi: 0.21307/ACEE-2019-036.
[21] C. J. Hopfe, G. L. Augenbroe, J. L. Hensen, "Multi-criteria decision making under uncertainty in building performance assessment", *Building and environment*, no. 69, pp. 81-90, 2013. Doi: 10.1016/j.buildenv.2013.07.019.
[22] F. Kheiri, "A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, pp. 897-920, 2018. Doi: 10.1016/j.rser.2018.04.080.

[23] О. В. Коршунов, В. И. Зуев, «Время тепловой инерциии и термическое сопротивление слоистых стен», *Энергоресурсосбережение и энергоэффективность*, № 4(40), с. 23-26, 2011.
[24] ДБН В-31:2016. Теплова ізоляція будівель. [Чинний від 2017-05-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2017. 33 с.
[25] О. В. Коршунов, В. И. Зуев, «Время тепловой инерциии термическое сопротивление слоистых стен». *Энергоресурсосбережение и энергоэффективность*, № 4(40), с. 23-26, 2011.
[26] Т. Л. Саати, *Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети*. Москва: ЛИБРОКОМ, 2009.
[27] Liu S., Yang Y., Forrest J. Grey data analysis. *Springer Singapore.* Singapore, 2017. Vol. 10. №1007. P. 978-981.
[28] S. A. A. Daniel, R. Pugazhenthi, R. Kumar, S. Vijayananth, "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*, vol. 15, № 4, pp. 545-556. doi: 10.1016/j.dt.2019.01.001.
[29] C. Sarpkaya, E. C. Sabir, "Optimization of the sizing process with grey relational analysis", *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, no. 1(115), pp. 49-55, 2016. doi: 10.5604/12303666.1172087.
[30] ДСТУ-Н. Б. В. 2.6-190:2013. *Настанова з розрахункової оцінки показників теплостійкості та теплозасвоєння огороджувальних конструкцій* [Чинний від 2014-01-01]. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014, 40 с.
[31] T. De Saulles, *Thermal mass explained*. Concrete Centre, 2009.
[32] О. І. Філоненко, О. І. Юрін, *Будівельна теплофізика огороджувальних конструкцій будівель.* Полтава: Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка, 2015.
[33] ДСТУ Б В.2.6-189:2013. *Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель.* [Чинний від 2014-01-01]. Київ: Мінрегіон України, 2014. 55 с.
[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] І. І. Куліченко 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*, № 69, с. 257-264, 2013.
[36] *A brief guide and free tool for the calculation of the thermal mass of building components*. [Online]. Available: https://www.htflux.com/en/free-calculation-tool-for-thermal-mass-of-building-components-iso-13786/. Дата звернення 20.09.2020.
[37] J. A. Clarke, P. P. Yaneske, A. A. Pinney, *The Harmonisation of Thermal Properties of Building Materials*. [Online]. Available: http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/89/thermop_rep.pdf. Дата звернення 26.09.2020.
[38] В. В. Подіновський, «Багатокритеріальні проблеми з упорядкованими за значимістю критеріями», *Автоматизація та дистанційне управління*, вип. 37, с. 1728-1736, 1976.
[39] В. В. Подіновський, «Теорія важливості критеріїв», *Математичні соціальні науки*, вип. 27, с. 237-252, 1994.
[40] В. В. Подиновский, *Идеи и методы теории важности критериев в многокритериальных проблемах принятия решений*. Москва: Наука, 2019.
[41] В. В. Подіновський, «Кількісне значення критеріїв для MCDA». *Журнал аналізу багатокритеріальних рішень*, вип. 11, с. 1-15, 2002. https://doi.org/10.1002/mcda.312.
[42] А. П. Нелюбін, В. В. Подіновський, «Багатокритеріальний вибір на основі методів важливості критеріїв з невизначеною інформацією про переваги», *Обчислювальна математика та математична фізика*, вип. 57, с. 1475-1483, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1134/S0965542517090093.
[43] В. В. Подіновський, «Про використання інформації про важливість у задачах MCDA з критеріями, виміряними за першою впорядкованою метричною шкалою», *Журнал аналізу багатокритеріальних рішень*, вип. 15, с. 163-174, 2009. [Online]. Available: https://doi.org/10.1002/mcda.433.

[44] А. П. Нелюбін, В. В. Подіновський, «Аналітичні правила прийняття рішень із використанням впорядкованих критеріїв зі шкалою першої порядкової метрики», *Автоматизація та дистанційне управління*, вип. 73, с. 831-840, 2012. [Online]. Available: https://doi.org/10.1134/S0005117912050074.

[45] C. Xiaodong, X. Dai, L. Junjie, «Побудова статусу споживання енергії у всьому світі та найсучасніші технології для будівель з нульовою енергією протягом останнього десятиліття», *Енергетика та будівлі*, вип. 128, с. 198-213. 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089.

[46] Ф. СТАЗІ, *Теплова інерція в енергоефективних конвертах будівель.* (Баттерворт-Хайнеман), 2017. 367 с.

[47] Б. А. Шимрай, К. М. Сінгх, Р. К. Мехта, «Опитування багатокритеріальної техніки прийняття рішень, що використовується у плануванні відновлюваної енергетики», *Міжнародний комп'ютерний журнал*, вип. 4523, с. 124-140, 2017.

[48] Thomas L. Saaty, *Багатокритеріальне прийняття рішень: процес аналітичної ієрархії.* (Публікації RWS), 1996. 479 с.

[49] *Система підтримки прийняття рішень DASS [комп'ютерна програма]* [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL http://mcodm.ru/soft/dass/. Дата звернення 25.02.2021.

[50] Ю. Бікс, Г. Ратушняк, О. Ратушняк, «Оцінка енергетичної ефективності конвертів з органічних матеріалів», *Архітектура Середовище цивільного будівництва,* вип. 3, с. 55-67, 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://doi.org/10.21307/ACEE-2019-036.

[51] Ю. Бікс, Г. Ратушняк, О. Ратушняк, П. Ряполов, «Застосування методів AHP та GRA в оцінці потенціалу енергоефективності конвертів з природних матеріалів», *Теорія та будівельна практика*, № 2, с. 48-62, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу : https://doi.org/10.23939/jtbp2020.02.048.

[52] *Короткий посібник та безкоштовний інструмент для розрахунку теплової маси будівельних елементів*, [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.htflux.com/en/free-calculation-tool-for-thermal-mass-of-building-components-iso-13786/. Дата звернення 17.02.2021.

[53] ISO 13786: 2017. *Теплова характеристика будівельних компонентів - Динамічні теплові характеристики - Методи розрахунку*,

[Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.iso.org/standard/65711.html. Дата звернення 16.02.2021].
[54] Ю. С. Бікс, Г. С. Ратушняк, О. Г. Ратушняк, *Композиційний будівельний термоблок.* Україна. IPC: E04B 1/00 E04C 2/16 (2006.01). Корисна модель u201808845. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails& IdClaim=253299. Дата звернення 09.05.2021.
[55] W. Gan et al., «Енергозберігаючий дизайн огороджувальних конструкцій на основі багатопараметричної оптимізації», *Математичні проблеми в техніці*, вип. 2, с. 1-12. 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://doi.org/10.1155/2019/5261869.
[56] C. J. Hopfe, G. L. Augenbroe, J. L. Hensen, «Багатокритеріальне прийняття рішень в умовах невизначеності в оцінці ефективності будівлі», *Будівництво та навколишнє середовище*, № 69, с 81-90, 2013. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.buildenv. Дата звернення 07.01.2013.
[57] ДСТУ Б.В. 2.6-189: 2013, *Методи вибору ізоляційного матеріалу для утеплення будівель*. Київ: Мінрегіон, 2014.
[58] F. Kheiri, «Огляд методів оптимізації, що застосовуються в енергоефективній геометрії будівель та дизайні конвертів», *Огляди відновлюваних джерел та стійкої енергетики*, вип. 92, с. 897-920, 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.080.
[59] M. E. Arce et al., Використання методів, заснованих на сірому кольорі, у багатокритеріальному аналізі рішень для оцінки стійких енергетичних систем: огляд. Огляди відновлюваних джерел та стійкої енергетики, вип. 47: 924-932. 2015. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.010.

Висновки

1. Жорсткі вимоги до енергетичної ефективності будівель з метою зменшення споживання енергоносіїв передбачають розроблення та впровадження інноваційних технологій при влаштуванні енергоефективних зовнішніх огороджувальних конструкцій будівель. Вирішення цієї проблеми потребує оцінювання потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій будівель при забезпеченні мікроклімату, про що свідчить виконаний аналіз вітчизняних та зарубіжних досліджень світових тенденцій у вирішенні науково-прикладної проблеми підвищення теплозахисної здатності теплоізоляційної оболонки будівель.

2. Дослідження еколого-економічних механізмів реалізації біосферосумісного будівництва з використанням матеріалів відходів виробництва свідчать про необхідність вдосконалення економічного та екологічного маркетингу в будівництві. Підкреслено необхідність сприянню розвитку рециклінгу при утилізації відходів будівельної галузі та ефективно організованої логістики при управлінні відходами на всіх етапах життєвого циклу створення будівельної продукції. Запропоновано структурно-логічну модель управління будівельними відходами при біосферосумісному будівництві.

3. Обґрунтовано необхідність оцінювання ризиків при виборі механізму реалізації енергозберігаючого проекту. З метою інтелектуальної підтримки управління ризиками при реалізації проекту по збільшенню потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій запропоновано структурно-алгоритмічну модель, що передбачає врахування економічних, екологічних, проектно-конструкторських та експлуатаційних ризиків. Наведено науково-методологічні механізми подальшого розвитку досліджень потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій будівель на засадах біосферосумісності.

4. Визначено фактори впливу на теплотехнічні властивості теплоізоляційних матеріалів рослинного походження, які характеризуються кількісними та якісними показниками. Аналіз методів та обладнання для дослідження теплопровідності теплоізоляційних матеріалів рослинного походження дозволив запропонувати авторську конструкцію установки для визначення теплопровідності з використанням гомогенного теплового потоку, яка захищена патентом України.

5. Наведено конструктивні особливості установки для визначення теплопровідності теплоізоляційних матеріалів та методику експери-

ментальних досліджень. Результати виконаних експериментальних досліджень зразків спресованої соломи свідчать про однозначний вплив щільності та вологості соломи на величину коефіцієнта теплопровідності спресованого солом'яного блока. Отримані результати мають хорошу збіжність з дослідженнями інших авторів.

6. Обґрунтовано доцільність для ідентифікації складних нелінійних закономірностей впливу на надійність забезпечення потенціалу ефективності теплоізоляційних виробів із соломи використовувати логіко-лінгвістичні моделі та лінгвістичні змінні, які дозволяють враховувати кількісні та якісні фактори. За результатами математичного моделювання отримано систему нечітких логічних рівнянь до лінгвістичних висловлювань, що дозволить здійснювати інтелектуальну підтримку прийняття рішень щодо підвищення надійності забезпечення енергоефективності теплоізоляційних огороджувальних конструкцій із матеріалів рослинного походження.

7. Розглянуто теоретичні засади багатокритеріальної оцінки потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій, що дозволило вибрати доцільні методи для об'єктивної оцінки різних будівельних конструкцій теплоізоляційної оболонки будівель. Здійснено чисельне моделювання оцінювання потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій будівель методом аналізу ієрархій та методом сірого реляційного аналізу. Інтерпретація результатів чисельного моделювання оцінювання потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій представлена в табличній та графічній формах.

8. Для проведення чисельного моделювання та аналізу отриманих результатів запропоновано безрозмірний узагальнений індекс потенціалу енергоефективності огороджувальних конструкцій. Цей індекс дозволяє комплексно оцінити рівномірні значення характеристик параметрів, що впливають на потенціал енергоефективності огороджувальних конструкцій будівель.

Наукове видання

Юрій Семенович Бікс,
Георгій Сергійович Ратушняк,
Олена Георгіївна Лялюк,
Ольга Георгіївна Ратушняк

ПОТЕНЦІАЛ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ БІОСФЕРОСУМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ

Монографія

Видається у авторській редакції

Оригінал-макет підготовлено авторами

Підписано до друку 01.07.2022 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Ум. др. арк. 7,98.
Наклад 100 (перший запуск 1-30) пр.
Зам № В2022-04.

Вінницький національний технічний університет,
редакційно-видавничий відділ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114. Тел. (0432) 65-18-06.
press.vntu.edu.ua; email: irvc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія
ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порика, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія
ДК № 4377 від 31.07.2012 р.