

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет будівництва, теплоенергетики та газопостачання

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра будівництва, міського господарства та архітектури

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

Комплексна оцінка огорожувальних конструкцій будівель

з урахуванням їх теплотехнічного потенціалу

08-08. МКР.006.00.000. ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, групи Б-20м  
спеціальності

192 Будівництво та цивільна інженерія

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Лялюк А. О.

(прізвище та ініціали)

Керівник : к.т.н., доцент кафедри БМГА

(вчений ступінь, посада)

Бікс Ю. С.

(прізвище та ініціали)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

Опонент: к.т.н., доцент кафедри ІСБ

(вчений ступінь, посада)

Панкевич О. Д.

(прізвище та ініціали)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**Допущено до захисту**

Завідувач кафедри БМГА

В.В. Швець

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

м. Вінниця – 20\_\_ року

<u>Вінницький національний технічний університет</u>	
( повне найменування вищого навчального закладу )	
<u>Факультет Будівництва, теплоенергетики та газопостачання</u>	
<u>Кафедра Будівництва, міського господарства та архітектури</u>	
Освітньо-кваліфікаційний рівень <u>магістр</u>	
Напрямок підготовки <u>19 Архітектура та будівництво</u>	
(шифр і назва)	
Спеціальність <u>192 Будівництво та цивільна інженерія</u>	
(шифр і назва)	
Освітня програма <u>Промислове та цивільне будівництво</u>	
	<b>ЗАТВЕРДЖУЮ</b>
	Завідувач кафедри <u>БМГА</u>
	<u>Швець В. В.</u>
	“ <u>   </u> ” <u>   </u> 2021 року
<b>З А В Д А Н Н Я</b>	
<b>НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРАНТА</b>	
<u>Лялюку Андрію Олександровичу</u>	
( прізвище, ім'я, по батькові)	
1. Тема проекту (роботи) <u>Комплексна оцінка огорожувальних конструкцій будівель з урахуванням їх теплотехнічного потенціалу</u>	
керівник роботи <u>Бікс Ю. С., к.т.н., доцент,</u>	
( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)	
затверджені наказом вищого навчального закладу від “ <u>   </u> ” <u>   </u> 2021 року № <u>   </u>	
2. Термін подання магістрантом роботи <u>07.12.2021 р.</u>	
3. Вихідні дані до роботи: дані витчизняних та іноземних публікацій щодо критеріїв оцінювання, основних фізко-механічних теплофізичних та економічних показників будівельних матеріалів які використовуються для проектування енергоефективних багатошарових конструкцій стін.	
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ (актуальність та новизна наукових досліджень, об'єкт, предмет, мета і задачі, практична значимість, методи досліджень, апробація) Огляд світового та вітчизняного досвіду у визначенні ключових параметрів, які прямо та опосередковано впливають на теплотехнічний потенціал зовнішніх стінових оболонок будинків. Аналіз чинних норм, що напрацьовані у галузі енергоефективності будівництва. Аналіз теплофізичних, фізико-механічних, а також економічних факторів впливу на комплексну оцінку теплотехнічного потенціалу огорожувальних конструкцій будинків. Узагальнена комплексна оцінка огорожувальних конструкцій стін. Проведення аналітичного чисельного моделювання з визначення показників коефіцієнту теплопередачі стіни, коефіцієнту затухання, внутрішньої питомої теплоємності, визначення критеріального числа Савіна, часу теплової інерції, показника теплової інерції для запропонованих типів багатошарових стін. Визначення комплексної оцінки огорожувальних конструкцій будівель в контексті їх теплотехнічного потенціалу за методами аналізу ієрархій, сірого реляційного аналізу, методу латентної змінної. Аналіз отриманих результатів. Економічна частина (оцінка економічної ефективності запропонованої методики)	
Висновки	
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 6-8 арк. (плакати, що ілюструють результати науково-дослідної роботи)	
6. Консультанти розділів роботи	

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання перевірів
Основна частина	Бікс Ю. С., доц. кафедри БМГА	01.10.2021	05.12.2021

7. Дата видачі завдання\_01.09. 2021 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим.
1	Складання технічного завдання та вступу до МКР	25.09-03.10.21	
2	Аналіз вітчизняного та іноземного досвіду щодо визначення основних параметрів, які чинять вплив на показники енергоефективності зовнішніх оболонок стін будинків: теплотехнічні, кліматичні, економічні характеристики.	04.10-10.10.21	
3	Комплексний аналіз сучасних енергоефективних матеріалів огорожувальних конструкцій стін, вибір шести видів багатошарових конструкцій для проведення числового моделювання.	11.10-20.10.21	
4	Визначення коефіцієнту затухання $f$ , внутрішньої питомої теплоємності, критеріального числа Савіна та коефіцієнта теплопровідності для стін різних типів. Визначення узагальненого комплексного показника, що опосередковано виражає енергоефективність огорожувальної конструкції за різними методиками багатокритеріального аналізу.	16.10-20.10.21	
6	Економічна частина	26.10-30.10.21	
7	Оформлення МКР	01.11-10.11.21	
8	Подання МКР на кафедру для перевірки та доопрацювання за потреби	12.11-30.11.21	
9	Попередній захист	01.12-03.12.21	
10	Рецензування	04.12-05.12.21	

Магістрант \_\_\_\_\_ Лялюк А. О.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Бікс Ю. С.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## **Анотація**

УДК 621.3.088

*Лялюк А. О. Комплексна оцінка огорожувальних конструкцій будівель з урахуванням їх теплотехнічного потенціалу. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 192 – будівництво та цивільна інженерія, освітня програма – промислове та цивільне будівництво. Вінниця: ВНТУ, 2021. 113 с. На укр. мові. Бібліогр.: 141 назв; рис.: 16; табл. 17.*

*Магістерська кваліфікаційна робота присвячена питанню комплексної оцінки огорожувальних конструкцій будівель з урахуванням їх теплотехнічного потенціалу в контексті низки фізико-механічних, економічних та теплотехнічних критеріїв. В якості математичного інструментарію для визначення комплексної оцінки огорожувальних конструкцій будівель з урахуванням їх теплотехнічного потенціалу використані такі методики багатокритеріального аналізу (MCDA), як– методу аналізу ієрархій (АНР), сірий реляційний аналіз (GRA) та метод латентної змінної. Основний акцент роботи полягає у спробі узагальнити основні фактори впливу фізико-механічних, теплофізичних та економічних показників матеріалів багатошарових огорожувальних конструкцій стін на потенціал комплексної оцінки.*

*В якості математичного інструментарію для моделювання тепловтрат через огорожувальну конструкцію стіни використано дані ресурсу Smartcalc[].*

*Чисельне моделювання комплексної оцінки теплотехнічного потенціалу багатошарових огорожувальних конструкцій з урахуванням фізико-механічних, теплофізичних та економічних даних виконано для шести типів багатошарових огорожувальних конструкцій стін.*

*Магістерська кваліфікаційна робота містить 18 аркушів графічної частини.*

**Ключові слова:** *тепотехнічний потенціал, багатокритеріальна оцінка, багатошарові огорожувальні конструкції, АНР, GRA, метод латентних змінних.*

### **Annotation**

*Lialiuk A. O. Complex assessment of building envelopes by taking into account their thermal potential. Bachelor's thesis in specialty 192 - construction and civil engineering. Vinnytsia: VNTU, 2021. 113 p. In Ukrainian language. Bibliographer: 141 titles; fig.: 16; tabl. 17.*

*The master's qualification work is devoted to the issue of complex assessment of building envelopes by taking into account their thermal potential, in context of several physical-mechanical, economic and thermal performance criteria. Multicriteria analysis methods (MCDA), such as Analysis of Hierarchy process (AHP), Gray Relational Analysis (GRA) and latent variable method, were used as mathematical tools to determine a comprehensive assessment of building envelopes taking into account their thermal performance potential. The main emphasis of the work is devoted to an attempt to generalize the main factors of influence of physical-mechanical, thermophysical and economic parameters of materials of multilayered envelopes on the complex assessment potential.*

*Smartcalc resource data [] were used as mathematical tool for modeling heat losses through the envelope structure.*

*The master's qualification work contains 18 graphic sheets parts .*

*Numerical modeling of the complex assessment of the thermal performance potential of multilayered enclosing structures based on physical-mechanical, thermophysical and economic data was performed for six types of multilayer enclosing wall structures.*

**Key words:** *assessment of energy efficiency, multicriteria index, multilayer enclosure structure, energy efficiency potential, multicriteria analysis, multilayered envelope structures, AHP, GRA, Method of Latent Variables.*

Відомість аркушів графічної частини

Аркуш	Найменування	Примітка
1	Титульний аркуш	
2	Мета роботи	Плакат
3	Задачі дослідження	Плакат
4	Об'єкт дослідження, Предмет дослідження,	Плакат
5	Сучасний стан питання	Плакат
6	MCDA як інструментарій	Плакат
7	Використані в роботі методи MCDA аналізу	Плакат
8	Вихідні варіанти багатошарових стін для чисельного моделювання	Плакат
9	Критерії, які обрано для моделювання	Плакат
10	Багатошарові огорожувальні конструкції стін	Плакат
11	Вихідні дані для проведення моделювання	Плакат
12	Ієрархічна модель з аметодом аналізу ієрархій для багатокритеріальної оцінки	Плакат
13-16	Результати аналізу багатокритеріальної оцінки	Плакат
17-18	Основні висновки	Плакат

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 АНАЛІЗ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ТЕПЛОТЕХНІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ЗОВНІШНІХ СТІНОВИХ ОБОЛОНОК .....	11
1.1 Показники будівельних конструкцій щодо їх енергоефективності.....	11
1.2 Теплова інерція стінових оболонок будівлі та фактори, що на неї впливають .....	14
1.2.1 Питома теплоємність стінових конструкцій .....	17
1.2.2 Ефузивність стінових конструкцій .....	18
1.2.3 Дифузивність огорожувальних конструкцій.....	18
1.2.4 Приведений опір теплопередачі багат шарових стінових конструкцій ....	19
1.2.5 Величина затухання розрахункової амплітуди коливань температури мзовнішнього повітря в стіновій конструкції.....	19
1.2.5 Теплостійкість багат шарових стінових конструкцій.....	19
Висновки по розділу 1 .....	21
2 АНАЛІЗ МЕТОДИК, КРИТЕРІЇВ ТА МОДЕЛЕЙ, ЩО МОЖУТЬ БУТИ ЗАСТОСОВАНІ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ СТІНОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ВРАХОВУЮЧИ ЇХ ТЕПЛОТЕХНІЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ.....	23
2.1 Математичний апарат, що використано в методиках оцінювання .....	23
2.1.1 Метод аналізу ієрархій (АНР) [59] .....	23
2.1.2 Метод сірого реляційного аналізу (GRA) [61, 63].....	25
2.1.3 Метод латентних змінних (МЛЗ) [31] .....	29
2.2 Критерії, що можуть бути застосовані для сукупної оцінки теплотехнічного потенціалу енергоефективності стінового огородження .....	30
2.2.1 Теплотехнічний показник термічного опору стінового огородження $R$ . ...	30
2.2.2 Економічні параметри .....	31
2.2.3 Критеріальне число Гагаріна В. Г [111] .....	31
2.3 Методики оцінки теплотехнічного потенціалу багат шарових зовнішніх стінових оболонок .....	38

2.3.1 Апарат оцінки енергоефективності стінової оболонки будинку за допомогою інструментарію нечіткої логіки [112].....	38
2.3.2 Критеріальне число Савіна [86].....	48
2.5 Класифікація програмних продуктів для виконання енергетичного моделювання будівель .....	52
2.6 Стан питання розробки національних стандартів у галузі енергоефективного будівництва.....	63
2.6.1 Чинні напрацювання в нормативній базі Україні щодо оцінки енергоефективності у будівництві .....	63
2.6.2 Іноземні стандарти, що напрацьовані у галузі енергоефективного будівництва.....	65
Висновки по розділу 2 .....	67
3 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ТЕПЛОТЕХНІЧНОЇ ОЦІНКИ ЗОВНІШНІХ СТІНОВИХ ОБОЛОНОК .....	69
3.1 Характеристики матеріалів для чисельного моделювання .....	69
3.2 Визначення теплотехнічного потенціалу методом адитивної згортки враховуючи ваги критеріїв за АНР [59].....	79
3.3 Визначення комплексної оцінки за методикою сірого реляційного аналізу (GRA) [63] та методу латентної змінної [31].....	82
Висновки по розділу 3 .....	87
4 ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ БАГАТОШАРОВИХ КОНСТРУКЦІЙ З УРАХУВАННЯМ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ЇХ ТЕПЛОТЕХНІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ .....	85
ВИСНОВКИ .....	101
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ .....	103
ДОДАТОК А .....	113



## ВСТУП

Потреба у оптимальному виборі альтернативи з поміж низки варіантів та параметрів, по яким ведеться порівняння є завжди актуальною, особливо для зведення зовнішніх теплоізоляційних оболонок будівель [1]. На думку науковця Ю. М. Лапіна [2] є безліч факторів, які потрібно враховувати при зведенні екобудинку, окрім цього ці фактори є пов'язаними між собою. Самим вагомим параметром по якому ведеться перевірка альтернатив є економічний показник [3-5]. Будь яка альтернатива містить як переваги так і недоліки. Фахівець змушений чітко обґрунтовувати собі та своїм колегам чому прийнятий вибір є найоптимальнішим. Саме така ситуація зумовлює потребу у застосуванні методів багатокритеріального аналізу, що може допомогти у пошуку найкращого рішення [1].

У сучасній науковій царині підрозділом, який оперує вирішенням задачам в яких необхідно приймати рішення в умовах невизначеності при складній вхідній інформації, є системний аналіз. Основна ідея системного аналізу полягає у вирішенні задач різними математичними інструментами, або багатокритеріальний аналіз (*англ. Multicriteria Decision Analysis, MCDA*).

Об'єктивний та виважений вибір найліпшої альтернативи стінового огороження для провадження будівництва з енергоефективних будівельних матеріалів можливий лише за проведення багатокритеріального аналізу альтернатив.

Ось чому, існує підвищена увага до використання методів та методик MCDA взагалі у техніці, та зокрема у галузі будівництва [1, 6-12]. Варто відмітити, що в розрізі світового тренду до сталого розвитку та енергоефективного поводження з ресурсами методи багатокритеріального аналізу лише стають все більш популярними та затребуваними [8].

Як вже зазначено вище, низка впливових параметрів при виборі огорожувальних конструкції елементів будівлі є суттєвою [1, 12, 13, 14, 16].

Варто також відмітити те, що різномайття різних за своєю природою та величиною показників, які потрібно порівняти, і який з них є «самим важливим» у процесі прийняття рішень, все ще залишається великим викликом та проблемою [13, 17].

У підтвердження цієї тези може бути той факт, що на тепершній час різними науковцями проводяться маса досліджень, які присвячено тому самому «найкращому» та «найоптимальнішому» вибору математичного методу порівняння а досих під триває процес виявлення також критеріїв для об'єктивної оцінки різних будівельних конструкцій, з точки зору сталого розвитку [1, 7, 18, 20] та багатьох інших.

В даній роботі запропоновано використати три критерії теплофізичних показників стінового огороження, що є найважливішими для експлуатації влітку та узимку [13], а саме: коефіцієнт теплопровідності стінового огороження  $u$  (Вт/м<sup>2</sup>К), коефіцієнт затухання (*decrement factor*  $f$ ) та внутрішня питома теплоємність (*internal area heat capacity*, (кДж / м<sup>2</sup>К) за ISO 13786: 2017 [21], критеріальне число Савіна [86], час теплової інерції [38] та показник теплової інерції  $D$  [7]. Акцент у магістерській дисертації зроблено на порівнянні матеріалів огорожувальних конструкцій, в основному з органічних матеріалів та їх похідних, які умовно є екологічно чистими. Збільшення інтересу до застосування методів багатокритеріальної оцінки при дослідженні енергоефективності огорожувальних конструкцій з одного боку, та тенденція впровадження енергоефективних рішень в житловому будівництві з екоматеріалів з іншого, були факторами, що вплинули на написання цієї роботи.

З огляду на концепцію сталого розвитку, яка зараз прийнята урядами багатьох країн світу, та в контексті енергоощадного будівництва, додатковим показником щодо оцінювання типу матеріалу, технології зведення будівлі може виступати розрахунок, що базується на методології оцінки життєвого циклу матеріалу [22-24], що дозволяє оцінити за допомогою рінорманітного програмного забезпечення (наприклад програма «Athena» [39], яка наявна лише на північноамериканському ринку) для комплексної оцінки життєвого циклу будівлі на етапі її проектування. Це моделювання та оцінка дозволяють врахувати в першому наближенні вартість виготовлення, експлуатації та утилізації матеріалу будівлі та відповідно її вплив на довкілля. Такий підхід очевидно є прогресивним кроком на шляху сталого розвитку та може гіпотетично зменшити забруднення від людської діяльності [24].

Вибір матеріалу стінового огороження це завжди компроміс між ціною та отриманими характеристиками, саме тому, ще на етапі проекту необхідно враховувати не тільки фізико-механічні, теплофізичні та інші характеристики матеріалу стін, але й по можливості завжди орієнтуватись на матеріал та сировину місцевого походження [26] з урахуванням рівня забруднення довкілля. Звичайно, що все це має бути в рамках виділеного бюджету [25, 27].

Крок вибору є зазвичай складною та компромісною задачею, яка вимагає врахування самого широкого спектру впливаючих параметрів. Раціональне, виважене рішення щодо вибору матеріалу варто проаналізувати, та обрати на основі врахування техніко-економічних показників. За потреби багатокритеріального вибору постає необхідність у застосуванні математичних інструментів для виявлення «кращого» варіанту проекту [3, 28].

#### **Актуальність теми.**

Для коректної, обґрунтованої та виваженої інтегральної оцінки при вирішенні задачі вибору матеріалу стінового огороження за декількома критеріями варто сукупно враховувати еколого-економічні, фізико-механічні, теплофізичні показники матеріалу для достовірного та комплексного вибору щодо прийняття рішення стосовно конкретного варіанту огорожувальних конструкцій для зведення стін.

При чому, на глибоке переконання автора слід робити при використанні декількох методик, які повинні показати відповідну ступінь кореляції щодо оцінюваних альтернатив. Саме тому, у даній магістерській кваліфікаційній роботі виконана спроба у виборі вагомих критеріїв комплексного впливу теплотехнічних та інших параметрів на величину комплексної оцінки огорожувальних конструкцій будівель, здебільшого в контексті їх теплотехнічного потенціалу, а також виконано порівняння отриманих інтегральних оцінок за різними методиками багатокритеріального аналізу.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дана робота виконана в рамках напрямків наукових досліджень кафедри Будівництва, міського господарства та архітектури ВНТУ, спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

### Мета і задачі дослідження.

Метою даної роботи є теоретичне обґрунтування механізму підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій стін та вирішення науково-технічної задачі багатокритеріальної оцінки комплексу різнорозмірних теплотехнічних, фізико-механічних та економічних показників багатосарових стінових конструкцій стін альтернативних матеріалів природного походження та їх порівняння з традиційним варіантом влаштування зовнішніх стін. Вищесказане є основою для проведення комплексного чисельного моделювання що має на меті вибір раціонального, в контексті обраних критеріїв впливу, варіанту багатосарової стіни. Відповідно до поставленої мети є потрібні вирішенні наступних задач:

- Обрати вагомні показники для сукупного оцінювання теплотехнічних та економічних показників багатосарових стінових конструкцій при врахуванні особливостей їх нестационарних теплотехнічних характеристик влітку та взимку;

- Провести комплексне чисельне моделювання з визначенням наступних показників:

- Критеріального числа Савіна за [86];
- Коефіцієнт теплопередачі ( $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$ ), який є величиною, оберненою до загального термічного опору  $R_{\Sigma}$  стінового огородження за ДБН В.2.6-31:2016 [36];
- Час теплової інерції за 38
- Коефіцієнт затухання (*англ. decrement factor f*) за за ISO 13786:2017 [21];
- Внутрішня питома теплоємність (*англ. the internal area heat capacity*,  $\text{кДж} / \text{м}^2\text{К}$ ) за [13, 21];
- Показник теплової інерції  $D$  за [7];

для стін для запропонованих варіантів;

- Аналітично розрахувати величину комплексної оцінки огорожувальних конструкцій будівель з урахуванням їх теплотехнічного потенціалу з використанням різних методик з урахуванням ваги критеріїв оцінювання;

- Провести аналіз результатів для запропонованих типів стін;

- Виконати розрахунок економічного ефекту для запропонованих оптимальних типів стін, з огляду на результати моделювання в контексті комплексної оцінки для наведених огорожувальних стінових конструкцій.

### **Об'єкт дослідження**

Об'єктом даного дослідження є комплекс теплофізичних, фізико-механічних а також економічних показників огорожувальних стінових конструкцій.

### **Предмет дослідження**

Предметом дослідження є комплексна оцінка енергоефективності багат шарових огорожувальних конструкцій з урахуванням їх теплотехнічного потенціалу.

### **Методи дослідження.**

Знаходження динамічних характеристик багат шарових конструкцій стін виконано із застосуванням пакету розрахунку, аналітично описаного у [34] та реалізованого у програмі MS Excel “Calculation-tool-Thermal-Mass-ISO-13786” [35], знаходження термічного опору багат шарових конструкцій стін виконано згідно методики ДБН В.2.6-31 “Теплова ізоляція будівель” [36], вартість матеріалу стінових конструкцій, одиниці теплової енергії для м. Вінниця, основні фізико-механічні характеристики матеріалів стін отримано з довідкових публікацій [37, 55] та відкритих інтернет-джерел [56-73]. Розрахунок комплексної оцінки огорожувальних стінових конструкцій, в контексті поставлених задач виконано згідно методик багатокритеріальної оцінки, зокрема методу аналізу ієрархій [59], сірого реляційного аналізу [6,61] та методу латентної змінної [31]. Всі отримані в даній магістерській роботі наукові результати отримані автором самостійно на основі детального аналізу літературних джерел по темі роботи та проведених чисельних досліджень за допомогою пакету MS Excel.

### **Особистий внесок здобувача.**

Усі результати, наведені у магістерській дипломній роботі, отримані самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать такі: [116] Розроблена методика оцінки факторів впливу на вибір фінансового механізму енергозберігаючого проекту на основі апарату нечіткої логіки.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

- Отримання в результаті розрахунків величини комплексної оцінки огорожувальних конструкцій будівель з урахуванням їх теплотехнічного потенціалу за трьома методиками багатокритеріального аналізу;

**- Практичне значення одержаних результатів.**

Запропонований в роботі підхід щодо вибору вагомих показників матеріалів огорожувальних конструкцій стін може бути використаний у рамках навчального процесу, а також для формування підоснови щодо прийняття рішень з вибору раціонального конструктивного вирішення багат шарового стінового огороження з точки зору її різнопланової багатокритеріальної оцінки.

**Апробація результатів магістерської роботи.**

Основні результати даної роботи були представлені у матеріалах конференції та в статтях:

1. Бікс Ю. С., Ратушняк О. Г., Лялюк А. О. Комплексна оцінка потенціалу енергоефективності багат шарових огорожувальних конструкцій стін. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2020/paper/viewFile/10844/9052> (дата звернення 24.11.2021).
2. Biks Y., Lyalyuk O., Ratushnyak G., Ratushnyak O., Lyalyuk A. Energy efficiency assessment of heat insulation building products: fuzzy-probabilistic approach. *Architecture Civil Engineering Environment*. 2021. №1. P. 59-68.
3. Biks Y., Ratushnyak G., Ratushnyak O., Lyalyuk A. Thermal Performance Assessment of wall assemblies: Criteria Importance Theory and ANP approach. *Civil Engineering Journal*. 2021. № X. P. XX-XX. DOI XXXXX.
4. Ратушняк Г. С., Лялюк О.Г., Лялюк А. О. Бікс Ю .С. Алгоритм реалізації проекту управління імовірністю теплової відмови теплоізоляційної оболонки будівлі. *Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві*. 2019. Том №1. С. 140-146.
5. Лялюк О. Г., Лялюк А.О. Класифікація факторів впливу на вибір фінансового механізму енергозберігаючого проекту: *матеріали конф., «XLVII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету»*, Вінниця, березень 2018. URL:<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/index/pages/view/zbirn2018> (дата звернення:04.12.2021).

6. Бікс Ю. С., Лялюк А. О., Ратушняк Г. С. Моделювання теплотехнічних параметрів багатошарових огороджувальних конструкцій із теплоізоляційних матеріалів органічного походження: *матеріали конф.*, «Інноваційні технології в будівництві 2018», Вінниця, листопад 2018. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2018/paper/viewFile/6142/5121> ( дата звернення:04.12.2021).
7. Каркасна стінова панель із теплозвукоізоляційних солом'яних блоків: пат. 127505 Україна: Е04С 2/16 (2006.01), Е04С 2/30 (2006.01). № заявл. 02.02.2018; опубл. 10.08.2018, бюл. № 15.

### **Публікації.**

Основний зміст роботи викладено у [29, 113, 116, 118,30].

# 1 АНАЛІЗ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ТЕПЛОТЕХНІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ЗОВНІШНІХ СТІНОВИХ ОБОЛОНОК

## 1.1 Показники будівельних конструкцій щодо їх енергоефективності

Термін «енергоефективність» у будівельній галузі є таким, що міцно увійшов у лексикон фахівців та набуває ще більшої уваги та значення внаслідок стрімких змін оточуючого нас клімату, і всі ми є свідками цього процесу. Поняття «енергоефективність» має багато визначень, але якщо висловити найбільш значиме, то цим терміном можна виразити ступінь або міру ефективного використання будь-якого ресурсу, який подається нашими інженерними мережами до об'єкту будівництва. На думку авторів матеріалу [73] цей термін трактується як збільшення коефіцієнта корисної дії всіх енергетичних процесів, які проваджуються у будинку.

Д.т.н. Корнієнко С. В. [74] висловлює думку про те, що оцінка енергоефективності будівлі полягає у порівнянні питомого споживання енергії  $q$ , з нормованим питомим енергоспоживанням всієї будівлі  $q_{req}$ , при цьому обов'язковою є умова:  $q < q_{req}$ .

Парадокс заключається в тому, що величина  $q_{req}$  регламентується національним стандартом та, очевидно, залежатиме від типу будівлі, її призначення, умов клімату, систем мікроклімату, які повинні бути забезпечені у приміщенні, рівня платоспроможності тощо. Величину  $q$  слід розраховувати або вимірювати на підставі спектру оціночних процедур, які мають враховувати як фізико-механічні, теплофізичні, та інші специфічні параметри розглядуваної будівлі, її інженерні мережі та вихідні розрахункові параметри. Енергоефективність слід визначати шляхом прямого порівняння величини розрахункових та нормованих показників споживання енергетичних ресурсів цієї будівлі. Це в повній мірі відповідає чинному нормативному документу ДБН В.2.6-31:2016 36[36], який регламентує максимально допустимий рівень споживання енергії ( $EP_{max}$ ), яка віддзеркалює ту кількість теплоти, яку необхідно надати до або видалити з об'єму, що зазнає



кондиціювання. І все це в рамках задовільнення нормованих умов мікроклімату в приміщенні. Одиниця цього виміру може бути співставлена на одиницю площі або об'єму будівлі.

В Україні величина максимальної енергопотреби  $EP_{max}$  є функцією від їх поверховості, для житлових будинків визначається за табл. 1.1 [36].

Таблиця 1.1 – Нормативна максимальна питома енергопотреба будівель,  $EP_{max}$

Ч.ч.	Призначення будівлі	Значення $EP_{max}$ , кВт·год/м <sup>2</sup> [кВт·год/м <sup>3</sup> ], для температурної зони України	
		I	II
1	2	3	4
<b>1</b>	<b>Житлові будинки поверховістю:</b>		
	від 1 до 3	120	110
	від 4 до 9	83	81
	від 10 до 16	77	75
	17 і більше	70	68

В галузі будівництва поняття енергоефективності, в широкому сенсі цього терміну, може бути реалізоване з всебічним застосуванням технологічних, конструктивних, чи інших об'ємно-планувальних рішень, які в певній мірі дозволяють створити сучасну енергоефективну конструкцію (будівлю). Все вищезазначене, очевидно не може бути втілено у життя без використання енергоефективних стінових оболонок.

Наприклад, в цьому сенсі, к.арх. Смирнова С. Н. [37] цілком справедливо вважає, що енергоефективною будівлею є та, в якій на концептуальному рівні проектування, на етапі її фактичного зведення, протягом терміну її експлуатації втілено «максимальну» кількість заходів (архітектурних та інженерних), які в повній мірі відповідають меті мінімізації використання джерел енергії на забезпечення мікроклімату в приміщеннях будівлі та відповідають концепції створення екологічного міського середовища.

Наведемо декілька визначень словосполучення «енергоефективний будинок» або «пасивний будинок» (німецькою *Passivhaus*, англійською *passive house*) – це будівля, яка володіє низьким споживанням енергії на рівні, що дорівнює приблизно 10% від

споживання енергії на одинцю об'єму [38]. Тут слід зазначити, що для потреб опалення в абсолютних показниках споживання енергії в такому будинку не повинно

бути більшим ніж п'ятнадцять кВт×год/м<sup>2</sup>×рік – величина, яку прийнято за орієнтир у *Passivhaus Institut* (Інститут пасивного будинку) німецького міста Дармштадт, і ця норма наразі поширюється на всі пасивні будинки в світі [41].

Стає цілком очевидним той факт, що для досягнення таких ультранизьких величин витрат енергії, що витрачаються на потреби опалення будинку, важко отримати без створення термоізоляційної непроникної оболонки, що в тому числі буде вимагати якісну термомодернізацію фасаду.

Для того, щоб будівля вважалась та дійсно була енергоефективним в повній мірі, перш за все необхідно створити суцільний, такий що не переривається термонепроникний контур по всіх площам поверхні стін. Це відразу дозволить зменшити близько 25% втрат тепла у будівлі. При цьому не варто забувати про таке поняття як мікроклімат у приміщенні. Адже саме він, в кінцевому випадку буде прямо впливати на стан здоров'я людей, що знаходяться у приміщенні. Самим простим способом, за яким можна створити таку енергоефективну «броню» яка володіє великим опором теплопередачі при зведенні стін можна виділити утеплення стін з напиленням рідкого поліуретану [32] чи популярне на нашому ринку будівельних технологій утеплення з наклеюванням екструдованого пінополістиролу, або за вже відомою на вітчизнянному ринку з середини 90-их років минулого століття технологією «Термодім» [87].

Водночас, при нехтуванні параметрами мікроклімату приміщень, до яких в першу чергу можна віднести кратність повітрообміну (м<sup>3</sup>/год), який є надзвичайно важливим для провадження різних видів людської діяльності, у приміщеннях можливі виникнення теплових відмов, згідно класифікації, запропонованої д.т.н. Фаренюком Г. Г. [14]. З іншого боку, повітрообмін є суттєво енергозатратним процесом, особливо при від'ємних температурах зовнішнього середовища. Тому компроміс між витратою енергії та параметрами мікроклімату приміщень, що мають діаметрально протилежні енергетичні витрати має бути встановлено з точки зору як витрат енергії, так і показників мікроклімату.

Саме тому, в наших реаліях, при нехтуванні повітрообміном та при цьому в гонитві за більшим термічним опором стінової оболонки будівлі дуже часто виникають

ситуації, коли стіни в будинку «теплі», а знаходитись в приміщенні некомфортно та дихати немає чим.

Як вірно відмічає в своїй роботі львівянин, к.т.н. Дудикевич Ю. Б. [42], якого сміливо можна назвати одним з вітчизняних adeptів екологічного та енергоощадного будівництва, «...стіни будинків мають дихати, ... а також регулювати рівень вологості в них, та бути теплоінерційними, тобто акумулювати тепло». При цьому, матеріал стін в ідеалі має володіти високою тепловою інерційністю, тобто здатністю до ефективного нагріву за утримання тепла в своїй масі для того, щоб тепло, збережене протягом дня, вивільняло цю теплоту повільно, при зменшенні температури зовнішнього середовища. Ця властивість та потреба є надзвичайно важливою у північних кліматичних умовах будівництва. Наприклад фахівець у галузі енергоефективного будівництва з Італії, проф. F. Stazi у своїй монографії [13] зазначає, що такі показники як коефіцієнт теплопередачі ( $\text{Вт/м}^2\text{К}$ ), який є величиною, оберненою до загального термічного опору зовнішньої стінової оболонки будівлі [44], коефіцієнт затухання (англ. *decrement factor*  $f$ ) та внутрішня питома теплоємність (англ. *the internal area heat capacity*,  $\text{кДж / м}^2\text{К}$ ) [21] є основними показниками, що мають бути контрольованими при зведенні та експлуатації енергоефективних огорожувальних стінових оболонок будівель, причому ці показники для літнього (коефіцієнт затухання та внутрішня питома теплоємність) та зимнього періоду (коефіцієнт затухання та коефіцієнт теплопередачі) мають різні значення.

У даній магістерській дисертації коефіцієнт затухання, внутрішня питома теплоємність визначено за методикою стандарту ISO 13786:2017 [21] для нестационарного режиму.

1.2 Теплова інерція стінових оболонок будівлі та фактори, що на неї впливають  
Поняття теплової інерції є прийнятим терміном [1], [7], [13], [45], [46]. Це поняття дуже характерне та вказує яку кількість теплоти конструкція може зберегти в своїй структурі. У вітчизняному нормативному документі ДБН В. 2.6-31 показник  $D$  – це параметр теплової інерції стінового огороження, який в даному випадку є

безрозмірним коефіцієнтом, який характеризує інтенсивність розповсюдження теплоти (хвиль тепла) у стіновій конструкції. Іншими словами показник теплової інерції є маркером інтенсивності нагріву чи остигання конструкцій будівлі.

По іншому теплову інерцію можна трактувати як час, на протязі якого виникає вирівнювання перепаду температур, на поверхнях стіни (зовнішній та внутрішній), що є змінними, у загальному випадку [13]. Цей показник є надзвичайно важливим, оскільки він прямо буде пливати на час нагріву, остигання, та в загальному випадку на енергоефективність огорожувальної конструкції [14,38, 86].

Додатковим параметром, який чисельно виражає міру теплової інерції в годинах є час теплової інерції. Це було відмічено у роботі к. фіз.-мат. н. Коршунова О. В. [38], який запропонував математичний апарат для знаходження цього параметру та підкреслює, що для визначення часу теплової інерції  $\tau_u$  неприпустимо застосувати математичний апарат, який запропоновано на випадок гомогенної стінової конструкції:

$$\tau_u = \pi^{-2} c \rho \delta R, \quad (1.1)$$

де  $c$  – показник теплоємності стінового матеріалу, кДж/кг×м;

$\rho$  – густина стінового матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$R = \delta / \lambda$  – термічний опір стінового матеріалу, м<sup>2</sup>×К/Вт;

$\delta$  – товщина стінового матеріалу, м;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стіни, Вт/м×К.

Вищеописаний підхід щодо визначення часу теплової інерції для багат шарової конструкції може бути отриманий за формулою (1.2) [38]:

$$\tau_u = \tau'_u S_n, \quad (1.2)$$

де  $\tau'_u$  – величина часу теплової інерції однорідної стіни завтовшки  $\delta$  з показниками першого шару [38]:

$$\tau'_u = c_1 \rho_1 \delta^2 / \pi^2 \lambda_1, \quad (1.3)$$

$S_n$  – безрозмірний коефіцієнт шаруватості зовнішніх стінових оболонок [38];

$$S_n = \frac{3\delta\delta_1^2 - 2\delta_1^3 + \frac{\lambda_1}{c_1\rho_1} \sum_{i=2}^n c_i\rho_i\delta_i^2 \left[ \frac{\Delta\delta_i}{\lambda_i} + \left(1 + 2\frac{\Delta\delta_i}{\delta_i}\right) \left(3\sum_{j=1}^{i-1} \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{\delta_i}{\lambda_i}\right) \right]}{\delta^3}, \quad (1.4)$$

де  $\delta$  – сумарна товщина стінового огороження, м;

$\delta_1$  – товщина першого шару, м;

$\Delta\delta_i = \sum_{j=i+1}^n \delta_j$  – товщина стінового огороження, при відліку з другого шару  $i = 2$ , м.

За думкою автора [38] формулу (1.3) за потреби слід використовувати  $i$ -ті характеристики конструктивного шару стінового огороження, у випадку, коли основну роль у величині часу теплової інерції буде відігравати не перший, а  $i$ -тий шар багатошарового стінового огороження,

$$\tau'_u = c_i\rho_i\delta^2 / \pi^2\lambda_i, \quad (1.5)$$

При цьому величину часу теплової інерції за формулою (1.2) варто домножити на коефіцієнт  $c_1\rho_1\delta^2\lambda_i / c_i\rho_i\pi^2\lambda_1$ .

Разом з цим, у роботі запропоновано обрати два критерія, які стосуються теплової інерції – час теплової інерції [38] та показник теплової інерції  $D$  [7]

$$\sum_{i=1}^n D_i = \sum (S_i \cdot R_i), \quad (1.6)$$

де  $S_i = \sqrt{\frac{2\pi\lambda_i c_i \rho_i}{T}}$  – коефіцієнт теплосвоєння, (Вт/м<sup>2</sup>×К)  $i$ -го шару стінової оболонки;

$T$  – величина періоду коливань, с (приймається зазвичай на базі циклу у 24 або 12 год).

Отже можна сказати, що термін «теплова інерція» є об'єктивним показником теплоакумуючої здатності матеріалу [42, 43, 88]. Сама по собі величина теплової інерції не є позитивним або негативним теплотехнічним параметром огороження будівлі, але цей показник слід однозначно враховувати при плануванні та призначенні зовнішніх стінових оболонок.

При некоректному врахуванні показника теплової інерції стінової огороджувальної конструкції енерговитрати на потреби опалення будівлі будуть непомірними, що звичайно вплине на якість життя у такому приміщенні. Очевидно, що не тільки тепла інерція є теплофізичною характеристикою матеріалу. У цьому ракурсі варто відмітити ще додаткові фізико-механічні параметри матеріалу, серед яких можна виділити наступні.

### 1.2.1 Питома теплоємність стінових конструкцій

Теплоємність – це здатність матеріалу поглинати теплоту зі збільшенням температури. Характеристикою теплоємності є питома теплоємність матеріалу  $c$ , яка чисельно дорівнює одиниці кількості теплоти в Дж, необхідної для того, щоб підняти на одиницю температури одиницю маси матеріалу.

У державному стандарті ДСТУ Б В.2.6-189:2013 [44] регламентуються величини питомої теплоємності.

### 1.2.2 Ефузивність стінових конструкцій

Це параметр який характеризує швидкість, з якою змінюється температура поверхні матеріалу [43]. Інтенсивність параметру впливає на швидкість, з якою матеріал нагрівається чи охолоджується. Якщо покласти руку на метал, який має високу ефузивність, то відчуватиметься холод до тих пір, доки температура поверхні матеріалу не буде дорівнювати температурі руки.

### 1.2.3 Дифузивність огороджувальних конструкцій

Дифузивність – характеризує швидкість поширення тепла не тільки по поверхні, але і всередині матеріалу. Чим дифузивність вища, тим швидше матеріал нагрівається або охолоджується [43].

#### 1.2.4 Приведений опір теплопередачі багатошарових стінових конструкцій

За стандартом ДСТУ Б. В.2.6-189:2013 [44] приведений опір – це фізична величина, яка характеризує співвідношення густини теплового потоку через фрагмент зовнішньої стінової оболонки будівлі в стаціонарних умовах теплопередачі.

#### 1.2.5 Величина затухання розрахункової амплітуди коливань температури зовнішнього повітря в стіновій конструкції

Це показник, який може вважатись санітарно-гігієнічним параметром, що необхідно враховувати при проектуванні та зведенні стінової оболонки будівлі.

Його розрахунок наведено у нормах ДБН В.2.6-31. Д.т.н. Табунщиков Ю. А. та к.т.н. Бродач М. М. у своїй монографії [1] справедливо вважають що цей показник є одним з ключових, які можуть бути характеристикою енергоефективності стінової конструкції. Окрім цього, на думку авторів інший безрозмірний параметр, що може бути показником ступеня енергоефективності огорожувальної конструкції стіни це добуток сумарного термічного опору  $R_{tot}$  конструкції на коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні стінового огороження  $\alpha_v$ , (Вт/м<sup>2</sup>К), що обчислюється за ДСТУ Б. В.2 6-189:2013 [44].

#### 1.2.5 Теплостійкість багатошарових стінових конструкцій

За нормативом ДСТУ Б В.2.6-100:2010 [88] цей параметр характеризує властивість матеріалу зберігати відносну стабільність температури на площині, що направлена у бік приміщення, при періодичних коливаннях теплового потоку зі сторони поверхні, що розташована з боку зовнішнього середовища.

Величина термічного опору стінової оболонки не залежить від порядку шарів у конструкції – це підкреслюють результати досліджень різних науковців [42, 43, 89, 108]. Поряд із цим, послідовність конструктивних шарів стінової оболонки у «пиріжку» стіни буде прямо впливати на такий показник як теплостійкість стін та є критичним для забезпечення показників мікроклімату (комфорту) перебуваючих у приміщенні людей (рис. 1.1).



Оптимальним розташуванням конструктивних шарів у стіновій оболонці є таким, при якому більш інерційний шар з більшою густиною та теплоємністю розташований зсередини приміщення [1, 14, 42, 43, 109] (схема *в*, див. рис.1.1).

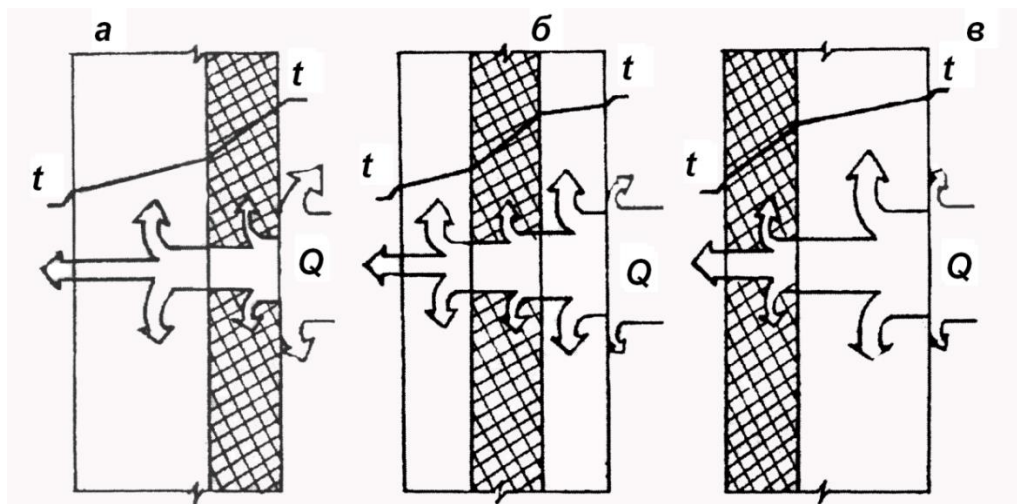


Рисунок 1.1 – Розподіл теплового потоку при різних конструктивних варіантах виконання утеплення стінового огородження (*a* – утеплювач зсередини приміщення; *б* – утеплювач між двома шарами городжуючих конструкцій; *в* – утеплювач ззовні стінового огородження приміщення)

Схема *a*) на рис. 1.1 є не вдалою з точки зору проходження потоків тепла, оскільки на думку автора [38] вона створює стіну з т.з. «клапаном, або діодом», оскільки суттєво збільшує час теплової інерції такої стіни, при цьому на межі конструктивного шару та утеплювача з часом може утворюватись грибок, та це може стати причиною відмови такої схеми розташування утеплювача (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Експлуатаційний стан конструкції при утепленні зсередини (за даними Фаренюка Г. Г. [33])

Після проведеного у розділі аналізу параметрів які прямо чи опосередковано впливають на теплотехнічні показники огорожувальної конструкції будь якої будівлі, можна в якості проміжних висновків сказати, що одними з характерних показників серед фізико-механічних параметрів матеріалів, які прямо чи опосередковано чинять вплив на теплотехнічні характеристики стінових конструкцій є наступні: час теплової інерції теплостійкість [44], внутрішня питома теплоємність [13, 21, 46]. термомаса [42], термоінерційність [43], коефіцієнт затухання та Безумовно, що цей перелік не є остаточним, а практика будівництва покаже на його перегляд/доповнення.

### Висновки по розділу 1

1. Енергоефективність будівлі взагалі, та огорожувальних констукцій зокрема охоплює досить широкий спектр різнорозмірних критеріїв. На енергоефективність конструкції стіни прямо впливає фізико-механічні та теплофізичні параметри матеріалів стін, їхня послідовність у конструкції відносно внутрішньої стінової поверхні приміщення, тощо.
2. Наступні критерії, що виділені у розділі, які можуть бути легко обчисленими та є інформативними для подальшого аналізу: час теплової інерції, показник теплової інерції, міра теплостійкості, коефіцієнт затухання, критеріальне число Савіна.
3. Лише комплексне вархування кліматичних особливостей регіону забудови, теплофізичних параметрів матеріалу, об'ємно-планувальних рішень, конструктивних та інженерних рішень може дозволити цілісно розглядати будівлю як енергоефективну систему, що в перспективі може бути будівлею з майже нульовим споживанням енергії.
4. Велика кількість впливових параметрів, які можуть бути розглянуті на концептуальному етапі проектування енергоефективної будівлі вимагає для прийняття управлінського рішення застосовувати методи багатокритеріального аналізу та додатково перевіряти достовірність отриманих результатів на декількох методиках.



## 2 АНАЛІЗ МЕТОДИК, КРИТЕРІЇВ ТА МОДЕЛЕЙ, ЩО МОЖУТЬ БУТИ ЗАСТОСОВАНІ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ СТІНОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ВРАХОВУЮЧИ ЇХ ТЕПЛОТЕХНІЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ

### 2.1 Математичний апарат, що використано в методиках оцінювання

#### 2.1.1 Метод аналізу ієрархій (АНР) [59]

Метод аналізу ієрархій (*англ. The Analytic Hierarchy Process, АНР*) є математичним інструментарієм, який зазвичай використовується для пошуку оптимальних рішень в складних системах. Особливістю даної математичного апарату є те, що отримані результати порівняння альтернатив не є правильними ані неправильними, вони віддзеркалюють лише кількісну оцінку альтернатив, яка отримана штучною адитивною згортокою критеріїв по впливовим параметрами на основі порівняння альтернатив між собою та обчислення «ваги» критеріїв методом парних порівнянь. Отримані кількісні результати суттєво полегшують дилему вибору кращої/ кращих альтернатив, що мають місце у прикладних, різнохарактерних задачах.

МАІ є систематичною процедурою ієрархічного представлення елементів, що визначають суть будь-якої проблеми. Існує кілька видів ієрархій:

- Домінантні-схожі на перевернуте дерево;
- Холархії- з оберненим зв'язком;
- Модулярні- від простого до складного .

Метод аналізу ієрархій [59] був розроблений Т. Л. Сааті. Цей метод до сьогодення є досить популярним у вирішенні реальних проблемних ситуацій, де завжди є місце слабкій структуризації самої задачі [59, 60]. Аналіз ієрархій може допомогти структуризувати складну проблему, яка має місце у прийнятті рішення шляхом розкладання її на ієрархію з альтернативами критеріями та цільовою функцією (рис. 2.1).

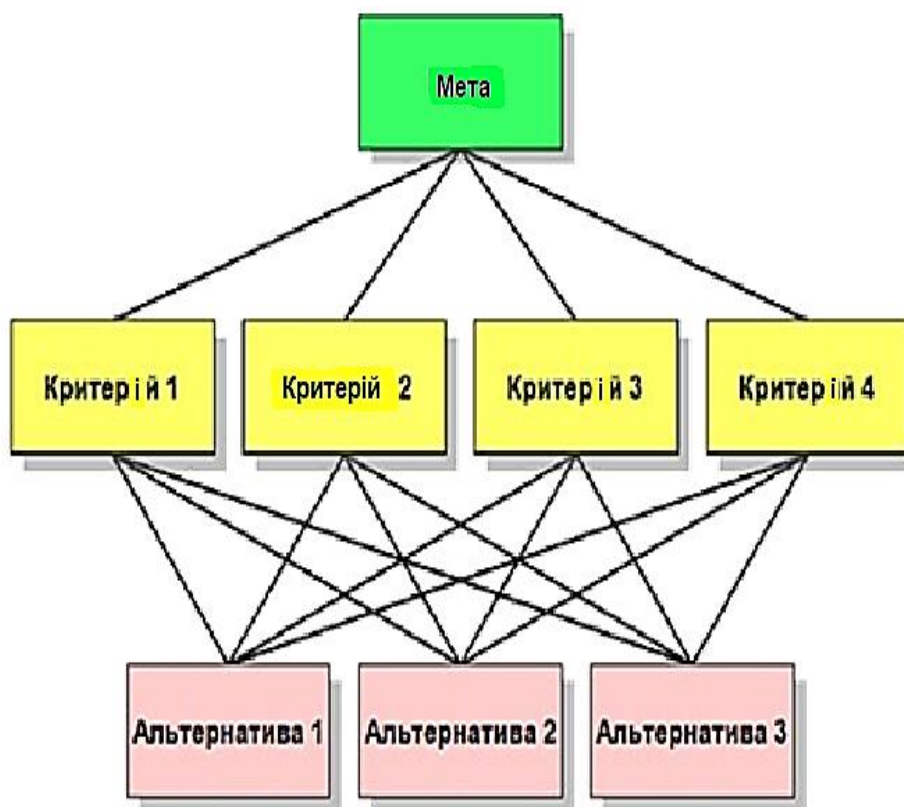


Рисунок 2.1 – Вид ієрархії при використанні методу аналізу ієрархій

Аналіз задачі щодо прийняття рішень (вибору альтернативи) розпочинається з представлення впливових критеріїв та альтернатив у вигляді ієрархії, яка, містить три основні компоненти (зазвичай): цільову функцію, параметри порівняння (критерії) та альтернативи. Очевидно, що побудова самої структури, її тип та вид є прерогативою особи, що приймає рішення.

Метод аналізу ієрархій заснований на розкладанні задачі на складові, що є простішими і в їх подальшому послідовному опрацюванні методом парних порівнянь. Результатом чого є відносний, чисельно виражений ступінь взаємодії елементів ієрархії.

За допомогою парних порівнянь [59] кожний з параметрів, та кожна з альтернатив, що порівнюється в ієрархії порівнюється між собою відносно цільової функції. Фундаментальна шкала значень для оцінювання міркувань [60] має ранжування, що наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Фундаментальна шкала [60]

Ступінь переваги	Визначення	Коментар
1	Рівна паравага	Дві альтернативи однаково важливі з точки зору цільової функції
2	Слабий рівень переваги	Проміжна градація між рівним та середнім ступенем переваги
3	Середній ступінь переваги	Досвід експерта дозволяє вважати одну з альтернатив, яка володіє несуттєвою перевагою над іншою
4	Перевага вище середнього	Проміжна градація між середньою та помірно сильною перевагою
5	Помірно сильна перевага	Досвід експерта дозволяє вважати одну з альтернатив, яка володіє значною перевагою над іншою
6	Сильна перевага	Проміжна градація між помірно сильною та дуже сильною перевагою
7	Дуже сильна (очевидна) перевага	Досвід експерта дозволяє обрати одну з альтернатив, яка володіє суттєвою перевагою: домінування альтернативи підкріплено практикою
8	Дуже, дуже сильна перевага	Проміжна градація між дуже сильною та абсолютною перевагою
9	Абсолютна перевага	Очевидність переваги однієї альтернативи над іншою має беззаперечне підтвердження
Зворотні значення оцінок переваг	Якщо перевага $i$ -тої альтернативи при порівнянні з $j$ -тою має одне з вищезазначених значень, то оцінка переваги $j$ -тої альтернативи над $i$ -тою буде мати зворотнє значення	Якщо альтернатива $x$ має ступінь переваги над альтернативою $y$ в $n$ раз, тобто $x=ny$ , тоді $y=1/nx$

Покрокова побудова та створення ієрархії за методом аналізу ієрархій наведено нижче.

**Крок 1.** Кожен параметр впливу являє собою матрицю, яку необхідно заповнювати як наведено нижче [60]:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & r_1 & r_1 & \dots & r_1 \\ & r_2 & r_3 & \dots & r_n \\ r_2 & 1 & r_2 & \dots & r_2 \\ r_1 & & r_3 & \dots & r_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_n & r_n & r_n & \dots & 1 \\ r_1 & r_2 & r_3 & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

де  $r_1, r_2, r_3, r_n$  - значення відповідних пріоритетів показників матриці, що оцінюються, які обумовлюють значення параметрів, за якими буде визначатись цільова функція (показник 1, показник 2, показник 3, ... показник  $n$ ).

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

**Крок 2.** Обчислюється вектор переваг кожного  $i$ -го показника  $m_i$  яке дорівнює середньому геометричному значенню кожного рядка елементів матриці, які ділять на суму всіх середніх геометричних значень для оцінюваних показників, за формулою [60]

$$\sqrt[n]{1 \times \frac{r_1}{r_2} \times \frac{r_1}{r_3} \times \dots \times \frac{r_1}{r_n}} = m_1. \quad (2.2)$$

**Крок 3.** Вектор пріоритетів для першого рядка матриці, який отримано за рівнянням (1) обчислюють за формулою

$$\frac{m_1}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} = x_1, \quad (2.3)$$

де  $x_1, x_2, \dots, x_n$  - відповідно вектор пріоритетів першого, другого,  $n$ -го рядка матриці. Компоненти власного вектора та вектора пріоритетів для інших рядків  $m_n$  визначаються аналогічно.

**Крок 4.** Як набір відносних ваг альтернативи використано компоненти власного вектора, що відповідають максимальному характеристичному числу  $\eta_{max}$ . Повинна бути виконана узгодженість матриці  $\eta_{max} \geq n$ , яка є обов'язковою проміжною перевіркою при використанні цього методу. Критерієм узгодженості елементів матриці  $A$ , виступає показник узгодженості (*consistency index, CI*) [60]:

$$CI = (\eta_{max} - n) / n - 1, \quad (2.4)$$

де  $n$  - ранг матриці.

**Крок 5.** Для оцінки адекватності отриманих даних використовується коефіцієнт узгодженості (*consistency ratio, CR*)

$$CR = CI / MRCI, \quad (2.5)$$

де  $MRCI$  - середній індекс випадкової узгодженості – середнє значення, яке випадковим чином обчислюється для великої кількості попарних матриць, які були сформовані в основному масштабі [60].

Отримані результати для матриці вважаються адекватними, за виконання умови  $0.2 \leq CR \leq 0.10$  (для матриць порядку  $n = 3$  бажано  $CR \leq 0.05$ , для матриць порядку  $n = 4$  бажано  $CR \leq 0.08$ ) [60].

**Крок 6.** Для проведення порівнянь серед альтернатив їх нормують. Результатом є показник  $\gamma$  для  $j$ -ої альтернативи у вигляді адитивної згортки [60] який визначається як:

$$\gamma_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \cdot w_{ij}, \quad (2.6)$$

де  $a_{ij}$  пріоритет  $i$ -ого параметру для  $j$ -ої альтернативи,  $i = 1, \dots, n$ ;  $j = 1, \dots, m$ ;  $w_{ij}$  - вектор пріоритету  $j$ -ої альтернативи за  $i$ -м параметром.

### 2.1.2 Метод сірого реляційного аналізу (GRA) [61, 63]

Поняття «сіра система» було запропоновано професором з КНР Дж. Л. Денгом. Ним встановлено відносно новий підхід до вирішення неструктурованих з високим рівнем невизначеності (або сірості). Головна родзинка застосування методу сірого реляційного аналізу полягає у тому, що дозволяє проводити аналіз частково визначених систем за допомогою створення та вилучення потрібної інформації з тієї, яка вже наявна [61]. Загалом ця методика заснована на ідеях нечітких множин Л. А. Заде [64].

Методика сірого реляційного аналізу [68] застосовує так званий «інформаційний» підхід і поняття «інформаційної ситуації». Інформаційна ситуація без інформації є «чорною скринькою», а ситуація з повною інформацією є «білою скринькою». В реальному житті немає таких ситуацій [69]. Всі дійсні ситуації, які притаманні в реальному житті, є проміжними між цими скриньками, та є «сірими скриньками» або нечіткі (розмиті). За концепцією автора методики, «сіра» система це частково відома та частково невідома інформаційна компонента задачі.



Як і метод аналізу ієрархій, сірий реляційний аналіз не надає особі, що приймає рішення найкращу альтернативу, а лиш допомагає систематизувати отримані результати за відповідними категоріями, які притаманні задачам системного аналізу.

Іншими словами методика, що базується на сірому реляційному аналізі є помічником для особи, що приймає рішення [70], і не являє собою цей апарат.

Послідовність розрахунку з використанням методу сірого реляційного аналізу показано нижче.

**Крок 1.** Нехай для аналізу представлена матриця даних  $R$  за формулою (2.7)

$$R = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}, \quad (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n) \quad (2.7)$$

**Крок 2.** Отримані у матриці дані потребують нормалізації. В залежності від методики багатокритеріального аналізу, дані необхідно підготувати та привести до «спільного знаменника», тобто нормалізувати [7, 71, 72]. Нормалізація показника виконується згідно відповідної важливості даного показника для даної прикладної задачі („Чим більше - тим краще”, „Чим менше - тим краще”).

Якщо бажаним результатом є максимум показника, то процедуру нормалізації ведуть за [72] (формула (2.8)).

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}, \quad (2.8)$$

де -  $\min x_{ij}$ ,  $\max x_{ij}$  мінімальне та максимальне розрахункове значення  $i$ -го показника для  $j$ -ої альтернативи;  $x_{ij}$  - нормалізоване значення  $i$ -го показника для  $j$ -ої альтернативи.

Якщо бажаним результатом є мінімізація показника, то процедуру нормалізації слід обчислювати як наведено у формулі (2.9) наступним чином [72]

$$x_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (2.9)$$

**Крок 3.** Обчислення відхилень значень матриці від максимального значення від нормованих за рівняннями (2.8), (2.9) [72]:

$$ds_{ij} = \max x_{ij} - x_{ij} \quad (2.10)$$

**Крок 4.** Визначення коефіцієнта сірого співвідношення [72], як наведено у формулі (2.11)

$$c_{ij} = \frac{\min ds_{ij} + \xi \cdot \max ds_{ij}}{ds_{ij} + \xi \cdot \max ds_{ij}}, \quad (2.11)$$

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

**Крок 5.** Нормоване значення комплексного показника  $\gamma$  для  $j$ -ої альтернативи визначаємо як показано нижче [72]:

$$\gamma_j = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i}, \quad (2.12)$$

### 2.1.3 Метод латентних змінних (МЛЗ) [31]

Цей метод заснований на математичному апараті моделі Раша оцінки латентних змінних, заснованих на методі найменших квадратів [65, 66].

Для використання методу будемо вважати, що інтегральна оцінка альтернативи  $AP_i$  є деякою векторною латентною змінною. МЛЗ передбачає наявність ще однієї векторної латентної змінної  $AK_j$ , яка характеризує оціночні критерії. Змінні  $AK_j$  являють собою суворість критерію  $K_j$  на всій множині альтернатив, що оцінюються. Чим більше оцінка  $AK_j$ , тим менше задовольняють всі альтернативи разом зазначеному критерію.

Відповідно до [66] для отримання оцінок латентних змінних  $AP_i$  та  $AK_j$  необхідно вирішити оптимізаційну задачу типу

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_j \cdot \left( x_{ij} - \frac{e^{AP_i - AK_j}}{1 + e^{AP_i - AK_j}} \right) \rightarrow \min, \quad (2.13)$$

де  $AP_i$  – інтегральна (сукупна) оцінка кожної альтернативи,

$AK_j$  – векторна оцінювальна змінна, що характеризує латентні змінні.

Вираз (2.13) можна доповнити умовою невід’ємності латентних змінних [65]

$$AP_i \geq 0; AK_j \geq 0; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m. \quad (2.14)$$

Метод, заснований на латентних змінних, має низку переваг у порівнянні з традиційним адитивним методом. Основні переваги цього методу за [66] наведено нижче:

1. Інтегральні оцінки альтернатив є їх унікальними характеристиками та не залежать від кількості альтернатив та набору критеріїв.
2. Інтегральні оцінки альтернатив визначають за лінійною безрозмірною шкалою, яку можна легко перевести в будь-яку іншу, наприклад, ймовірнісну шкалу оцінювання.
3. Крім комплексних оцінок моделей оцінювання, також є можливість отримати оцінки впливу критеріїв  $AK_j$ , що також є лінійними. Ці оцінки дозволяють проводити аналіз різних типів критеріїв, виділяючи найважливіші з них.

Основним недоліком використання МЛЗ є неможливість аналітичного рішення рівнянь (2.13), (2.14). Однак цю оптимізаційну задачу можна вирішити чисельно, наприклад, за допомогою MS Excel з використанням пакету «Пошук рішень».

## 2.2 Критерії, що можуть бути застосовані для сукупної оцінки теплотехнічного потенціалу енергоефективності стінового огороження

### 2.2.1 Теплотехнічний показник термічного опору стінового огороження $R$ .

Одним з контрольованих нормами [36] показників, який однозначно чинить вплив на експлуатаційні витрати утримання будинку, а й отже на його рівень енергоефективності є параметр приведенного термічного опору  $R$  ( $\text{m}^2 \times \text{°C} / \text{Вт}$ ) стінових конструкцій.

В нашому матеріальному світі критерієм енергофактивності є сума коштів, яка була витрачена/закумульована на одиниці площі/ об'єму конструкції при порівнянні її з альтернативою.

Для того, щоб оцінити доречність проведення термомодернізації, метою якої має бути ефект економії (гіпотетичної чи реальної) коштів, необхідно порахувати економічний ефект [1315].

### 2.2.2 Економічні параметри

Економічну ефективність будівництва при використанні традиційних та альтернативних матеріалів, можна визначити за залежністю, що запропоновано д.е.н. Б. М. Андрушківом [5]

$$Eб_{n.m.} = \sum_{i=1}^n B_{m.m.} - \sum_{i=1}^n B_{n.m.}, \quad (2.15)$$

де  $B_{m.m.}$  – витрати на будівництво будинку з традиційних матеріалів;

$B_{n.m.}$  – витрати на будівництво будинку з підсобних матеріалів.

На думку авторів статті [5] при такому підході, термін окупності будівництва взагалі, та такі категорії як економія енергетичних ресурсів зокрема, а також екологічність тощо, що не можуть бути оцінені в економічних показниках, можуть бути скороченими до терміну у три-чотири роки, при цьому варто відмітити, щовитратна частина може бути зменшена більш як на третину.

### 2.2.3 Критеріальне число Гагаріна В. Г [111]

Д.т.н. Гагарін В. Г. [111] запропонував емпіричні залежності для визначення критеріального числа, або граничного значення безрозмірного параметру, що дозволяє в першому наближенні оцінити доцільність термомодернізації будівлі, це може бути опосередкованим критерієм оцінки її енергоефективності

$$\Delta K \cdot p / C_T(-\Delta k) \cdot ГДОП \cdot 0,024 < 1, \quad (2.16)$$

де  $\Delta K$  – єдинократові інвестиції при термомодернізації будинку;

$-\Delta k$  – єдиноразові інвестиції на зменшення коефіцієнту теплопередачі  $u = \frac{1}{R}$

(Вт/м<sup>2</sup>×°С) при термомодернізації будинку;

0,024 = 24/1000 перехідний коефіцієнт, кВт×год/Вт×добу;

$C_T$  – вартість теплової енергії (грн./кВт×год);

$p$  – безрозмірний коефіцієнт в долях одиниці, що віддзеркалює ставку рефінансування та відсоток на ризик.

Ліву частину формули (2.19) можна використовувати при техніко економічній оцінці термомодернізації будинку.

формулу (2.19) можна перетворити та подати інакше

$$-\frac{\Delta K}{\Delta k} < \frac{C_T \cdot \text{ГДОП} \cdot 0,024}{p} = \omega \quad (2.17)$$

В результаті отримано нерівність, яка вказує на однозначну умову окупності одноразових витрат при термомодернізації стінових конструкцій будинку – згідно формули (2.17) видно, що питоме значення одномоментних інвестицій має бути менше граничного значення, яке залежить від суворості кліматичних умов (ГДОП), вартості теплової енергії та фінансового показника банку.

Це надає можливість грубо оцінити доречність або недоречність термомодернізації будинку в контексті її окупності [27, 111].

Оскільки фінансові показники відсотку по кредитній ставці (ставка рефінансування+ризик) можуть бути вказані з певним наближенням, то величина параметру  $\omega$  є також грубою, проте очевидна інформативність даного показника може допомогти прийняти правильне рішення на етапі проектування термомодернізації будинку.

Окрім розрахунку критеріального числа Гагаріна [111], можна розглядати наступні критерії, чи фактори впливу – ризики, що можуть прямо впливати на інвестиційну привабливість проекту утеплення будівлі.

Так, згідно [113] причиною виникнення ризиків є невизначеності, що існують у проекті з підвищення енергоефективності стінових 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 підготовки документації відбуваються в умовах наявності тієї або іншої міри невизначеності, обумовленої наступними факторами [113]:

- неповне знання всіх показників, 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 не співпадаючими й суперечливими інтересами партнерів.

На всіх фазах життєвого циклу енергозберігаючого проекту з підвищення енергоефективності зовнішніх стінових оболонки виникають ризики, що впливають на фінансові результати цього рішення:

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

Ризики на фазі реалізації проектного рішення можуть бути: виробничі ризики, а саме технологічні – використання неякісних матеріалів; управлінські – порушення технологічних процесів; забезпечення ресурсами; транспортні – недодержання узгодження термінів виконання робіт; ризики громадянської відповідальності; фінансові ризики, а саме кредитний; ризик зміни процентної ставки; ризик конвертації валюти.

Ризики на фазі закриття проекту утеплення: 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 проектних робіт, 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 у проектних роботах включає:

- планування управління ризиками – вибір підходів і планування діяльності по керуванню ризиками, що закладено у проектній документації;
- 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 по ослабленню 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 по 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 розроблення свідчить про необхідність методики реалізації цих інноваційних проектів [112,113].

За результатами експериментальних досліджень типових багатоповерхових житлових будинків сучасної забудови в м. Вінниця здійснено їх енергоаудит [114]. Виявлено з використанням тепловізійних зйомок, що енергоефективність цих будинків не в повній мірі відповідає нормативним вимогам. В зв'язку з цим важливим є пошук шляхів вирішення проблеми термомодернізації будівель при урахуванні факторів фінансового механізму з реалізації енергозберігаючих проектів [112].

Для типового дев'яти поверхового будинку по вул. Воїнів-Інтернаціоналістів розрахована кошторисна вартість термомодернізації будинку (утеплення зовнішніх стін). В якості утеплювача на основі теплотехнічного розрахунку термічного опору стін, який дорівнює  $3,295 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  і відповідає нормативному значенню, обраний матеріал – мінеральна вата.

Переваги для мешканців будинків при реалізації проектного рішення утеплення стін: зменшення платежів за комунальні послуги; суттєве покращення комфортності температурних умов проживання; зростання ринкової вартості житла в термомодернізованих будинках; збільшення терміну ефективної експлуатації таких будинків приблизно на 30 років.

Недоліком для мешканців будинків: багатоетапний, тривалий час реалізації проекту; велика сума коштів на виконання робіт, яка не відповідає місячній заробітній платі.

Розрахункова вартість, що закладено у проектній документації з підвищення енергоефективності будинку на передпроектній стадії визначається за формулою:

$$PB = V_{\text{тех}} + V_{\text{аудит}} + V_{\text{проект}} + V_{\text{експерт}} + \Sigma V_3, \quad (2.18)$$

де  $V_{\text{тех}}$  – вартість робіт з обстеження технічного стану будинку, яке виконується відповідно норм [115];

$V_{\text{аудит}}$  – вартість робіт з енергетичного аудиту будинку;

$V_{\text{проект}}$  – вартість розробки проектно-кошторисної документації, послідовність розробки якої передбачена в ДБН [115];

$V_{\text{експерт}}$  – вартість експертизи проектно-кошторисної документації [115];

$V_3$  – вартість окремого енергозберігаючого заходу.



На основі розрахунків економії  $\Delta E$  від енергозберігаючих заходів (різниці спожитої теплової енергії до і після проекту у грошовому вираженні, визначеної за тепловим лічильником і рекомендованими даними виконавця послуг) та загальних витрат на їх впровадження ( $PB$ ) визначено строк окупності:

$$T = PB / \Delta E \quad (2.19)$$

Кошторисна вартість дорівнює 2825,6 тис. грн. Це досить значна сума для мешканців будинку, тому постає проблема обрання оптимального організаційно-економічного рішення фінансування енергозберігаючого проекту.

Складові формули (2.19) є етапами реалізації проекту. Виконання будівельних робіт з утеплення житлових будинків здійснюється враховуючи послідовності, що передбачено стандартом ДСТУ-Н Б В.3.2-3-2014 [115]. Не допускається розроблення проектної документації без проведення обстеження та виконання енергетичного аудиту, механічних та теплотехнічних розрахунків, які повинні бути виконані приймаючи до уваги відповідні вимоги [7, 36, 44, 115].

Тому, в умовах низької фінансової спроможності громадян та організацій в Україні, більшого поширення набувають економічні механізми системного залучення інвестицій в енергоефективність та енергозбереження, які в рамках міжнародної технічної допомоги частково вже використовуються в Україні.

Джерела фінансування заходів з підвищення енергоефективності будинку представлено на рис. 2.2 [113, 116|112]. Вибір фінансового механізму залежить від: кошторисної вартості проекту та строків окупності; рівня платоспроможності співвласників; умов залучення позикових коштів від банківських установ, приватних інвесторів; умов надання міжнародних донорських грантових підтримок. Обирається варіант з мінімальним грошовим навантаженням на співвласника і мінімальним строком окупності.

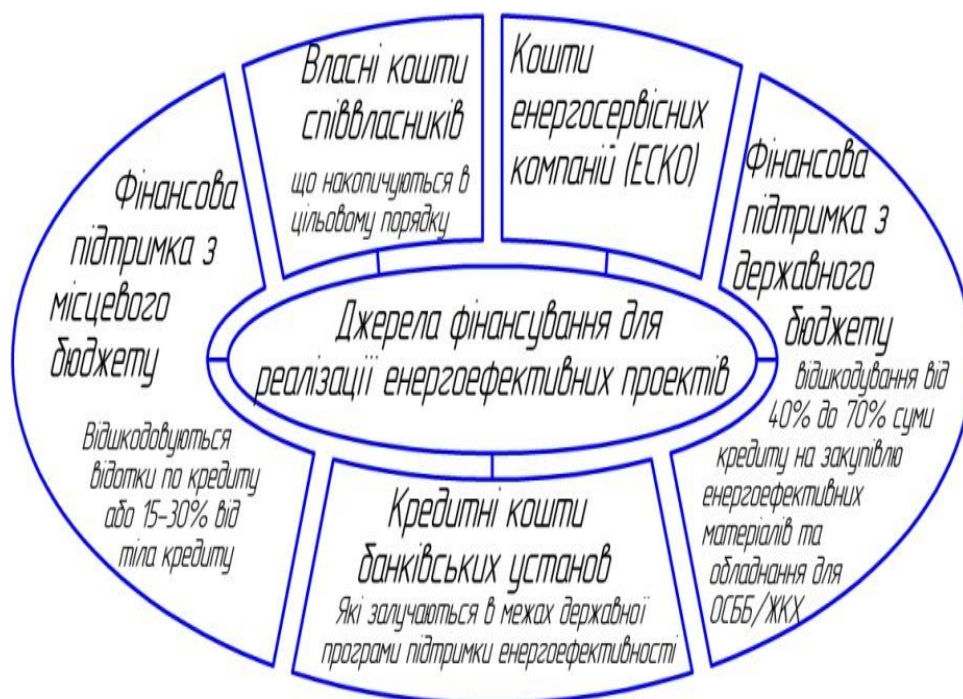


Рисунок 2.2 – Джерела фінансування енергоефективних проектів

Для об'єднань співвласників багатоквартирних будинків (ОСББ) джерелами формування спеціальних фондів є: щомісячні внески співвласників; одноразові цільові внески співвласників; добровільні грошові внески фізичних та юридичних осіб, цільове фінансування за рахунок місцевих бюджетів; цільові внески інших юридичних осіб; кошти, одержані об'єднаннями у результаті здачі в оренду допоміжних приміщень; інші не заборонені законодавством джерела фінансування. Енергосервісні компанії (ЕСКО) пропонують енергетичні послуги на весь життєвий цикл проекту. Їх послуги оплачуються замовником за рахунок економії енергоресурсів. Наприклад, якщо строк окупності проекту становить 5 років, то на протязі даного періоду замовник буде жити в комфортних температурних умовах і сплачувати таку ж суму комунальних послуг за енергоресурси, що і до початку проектних робіт.

Чинники, що впливають на вибір фінансового механізму:

- фінансові показники енергозберігаючого проектного рішення та строки його виконання;
- рівень платоспроможності співвласників багатоквартирного будинку;

- умови залучення позикових коштів від банківських установ або приватних інвесторів тощо;
- наявність відповідних державних або місцевих програм підтримки енергоефективних заходів та умови спів фінансування за ними;
- умови надання міжнародними донорськими організаціями грантової підтримки енергоефективних проектів.

### 2.3 Методики оцінки теплотехнічного потенціалу багат шарових зовнішніх стінових оболонки

#### 2.3.1 Апарат оцінки енергоефективності стінової оболонки будинку за допомогою інструментарію нечіткої логіки [112]

У праці к.т.н. Ратушняк Г. С. та к.т.н. Ратушняк О. Г. [112] реалізовано підхід, який дозволяє комплексно враховувати низку кількісних та якісних критеріїв для проведення термомодернізації будівель, що засновано на математичному апараті нечіткої логіки та лінгвістичних змінних. Основою для розробки математичних моделей послуговували ідеї д.т.н. О. П. Ротштейна [119, 121].

Отже, дослідженню основних етапів та елементів механізму управління фінансової стійкості промислового підприємства передують визначення змісту та сутності поняття «фінансовий механізм». Зазначена економічна категорія використовується для опису явищ в різних сферах життєдіяльності, як економічній, так й в політичній та соціальній. Звідси складовими частинами фінансового механізму є: фінансовий механізм підприємств, фінансовий механізм некомерційних організацій і установ та інші.

Так, у роботі [116] розроблена класифікація факторів, що впливають на прийняття організаційно-економічних рішень при виборі фінансового механізму енергозберігаючого проектного рішення, представлена на рис. 2.3.

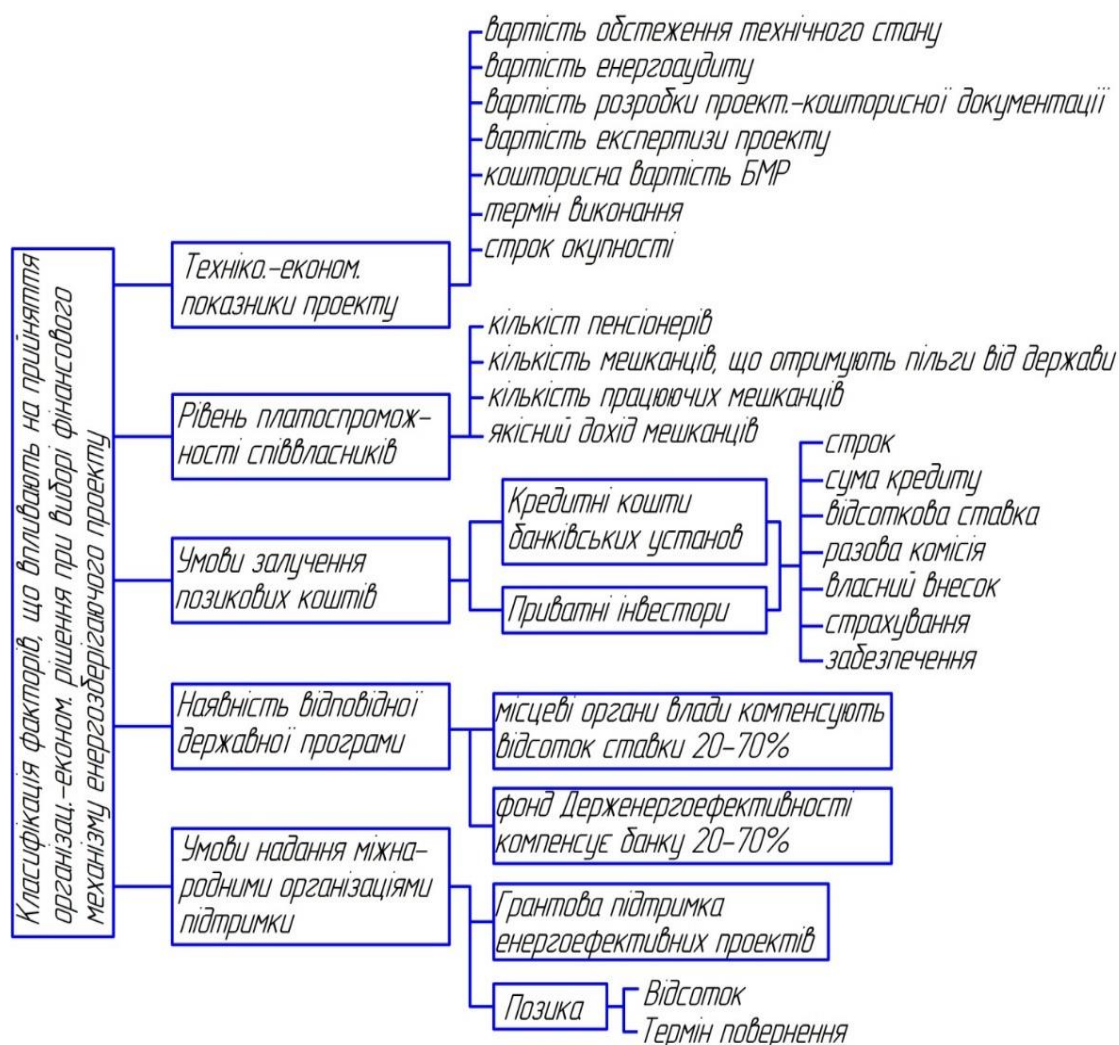


Рисунок 2.3 – Класифікація факторів, щодо прийняття організаційно-економічних рішень при виборі фінансового механізму енергозберігаючого проектного рішення [116]

Фактори впливу відповідають етапам життєвого циклу енергозберігаючого проекту і регламентованим показниками, зафіксованим в діючих нормативах [36]. На основі класифікованих факторів розроблена методика, яка враховує кількісні і якісні показники за допомогою яких можна оцінити організаційно-економічні рішення та вибрати фінансовий механізму енергозберігаючого проектного рішення. Традиційні методи багатфакторного аналізу складних економічних систем не дозволяють описати причинно-наслідкові зв'язки між показниками впливу і прогнозувати за допомогою показників, які використовують якісні показники. Використання теорії нечітких множин дає можливість приймати оптимальні рішення по оцінці проекту, який здійснюється при підтримці держави

приймаючи до уваги кількісні та якісні показники за результатами віртуального експерименту.

Методика оцінки інноваційного проектного рішення з вдосконалення стінових конструкцій на основі апарату нечіткої логіки представлена в етапах підвищення енергоефективності стінових конструкцій.

1. Етап. Побудова дерева логічного висновку. Дерево логічного висновку відображає класифікацію факторів, які впливають на оцінку інноваційного проектного рішення (Y) (рис2. 4).

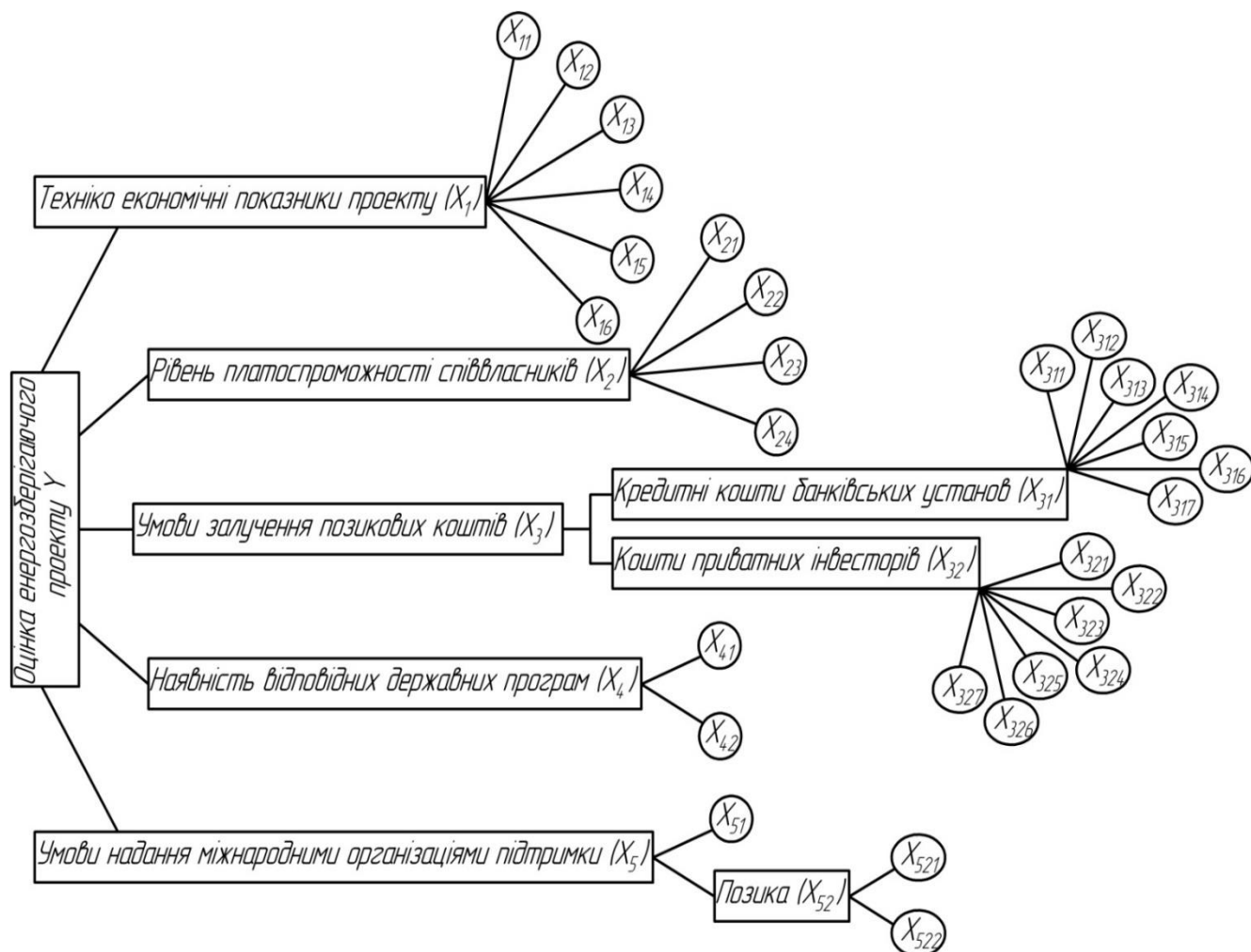


Рисунок 2.4 – Дерево логічного висновку ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на прийняття організаційно-економічних рішень при виборі фінансового механізму енергозберігаючого проектного рішення

Лінгвістичну змінну Y можна відобразити у вигляді співвідношення:

$$Y = F_Y (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5), \quad (2.20)$$

де  $X_1$  - лінгвістична змінна (ЛЗ), яка описує техніко-економічні показники проектного рішення;

$X_2$  - ЛЗ, яка описує рівень платоспроможності співвласників;

$X_3$  - ЛЗ, яка описує умови залучення позикових коштів;

$X_4$  - ЛЗ, яка описує наявність відповідних державних програм;

$X_5$  - ЛЗ, яка описує умови надання міжнародними організаціями підтримки.

2. Етап. Фазифікація чинників, які передбачають вибір нечітких термів для лінгвістичної оцінки факторів і формалізацію цих термів за допомогою функцій належності.

3. Етап. Складання нечітких матриць знань. До нечітких матриць знань відносять результати віртуального експерименту. Експерт відповідає на питання, якою буде лінгвістична оцінка вихідного показника при комбінації лінгвістичних оцінок факторів.

4. Етап нечіткий логічний висновок. Техніка нечіткого логічного висновку допомагає розрахувати прогнозований показник у вигляді нечіткої множини за допомогою системи висловлювань типу «ЯКЩО – ТО», яка об'єднує нечіткі терміни вихідних і вхідних змінних за допомогою операцій І та АБО, прийнятих в теорії нечітких множин, і відповідають операціям  $\min$  та  $\max$ . Лінгвістичним висловлювань відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних відповідному терміну.

5. Етап дефазифікації вихідного показника. Для того, щоб перейти від отриманої нечіткої множини до кількісної оцінки, треба виконати процедуру дефазифікації, що означає перетворення нечіткої інформації в чітку форму.

Ступінь належності інтегрального (комплексного) показника нечітким термам  $n$ ,  $nc$ ,  $s$ ,  $vc$ ,  $v$  при виборі фінансового механізму енергозберігаючого проектного рішення наведено у рівняннях (2.21)-(2.25).

$$\begin{aligned} \mu_n(Y) &= \mu_n(X_1) \wedge \mu_n(X_2) \wedge \mu_n(X_3) \wedge \mu_n(X_4) \wedge \mu_n(X_5) \vee \\ &\mu_{nc}(X_1) \wedge \mu_{nc}(X_2) \wedge \mu_n(X_3) \wedge \mu_n(X_4) \wedge \mu_n(X_5) \vee \\ &\mu_n(X_1) \wedge \mu_n(X_2) \wedge \mu_{nc}(X_3) \wedge \mu_{nc}(X_4) \wedge \mu_{nc}(X_5). \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned}
\mu_{HC}(Y) &= \mu_H(X_1) \wedge \mu_H(X_2) \wedge \mu_H(X_3) \wedge \mu_H(X_4) \wedge \mu_H(X_5) \vee \\
&\mu_{HC}(X_1) \wedge \mu_{HC}(X_2) \wedge \mu_{HC}(X_3) \wedge \mu_{HC}(X_4) \wedge \mu_{HC}(X_5) \vee \\
&\mu_H(X_1) \wedge \mu_H(X_2) \wedge \mu_{HC}(X_3) \wedge \mu_{HC}(X_4) \wedge \mu_{HC}(X_5) \vee \\
&\mu_H(X_1) \wedge \mu_H(X_2) \wedge \mu_{HC}(X_3) \wedge \mu_{HC}(X_4) \wedge \mu_{HC}(X_5).
\end{aligned} \tag{2.22}$$

$$\begin{aligned}
\mu_C(Y) &= \mu_{HC}(X_1) \wedge \mu_C(X_2) \wedge \mu_{BC}(X_3) \wedge \mu_H(X_4) \wedge \mu_C(X_5) \vee \\
&\mu_{HC}(X_1) \wedge \mu_C(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_B(X_4) \wedge \mu_H(X_5) \vee \\
&\mu_{BC}(X_1) \wedge \mu_C(X_2) \wedge \mu_H(X_3) \wedge \mu_C(X_4) \wedge \mu_C(X_5) \vee \\
&\mu_C(X_1) \wedge \mu_C(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_C(X_4) \wedge \mu_C(X_5) \\
\mu_{BC}(Y) &= \mu_{BC}(X_1) \wedge \mu_C(X_2) \wedge \mu_{BC}(X_3) \wedge \mu_B(X_4) \wedge \mu_C(X_5) \vee
\end{aligned} \tag{2.23}$$

$$\begin{aligned}
&\mu_{BC}(X_1) \wedge \mu_C(X_2) \wedge \mu_B(X_3) \wedge \mu_B(X_4) \wedge \mu_C(X_5) \vee \\
&\mu_C(X_1) \wedge \mu_{BC}(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_C(X_4) \wedge \mu_{BC}(X_5).
\end{aligned} \tag{2.24}$$

$$\begin{aligned}
\mu_B(Y) &= \mu_{BC}(X_1) \wedge \mu_B(X_2) \wedge \mu_{BC}(X_3) \wedge \mu_B(X_4) \wedge \mu_{BC}(X_5) \vee \\
&\mu_{BC}(X_1) \wedge \mu_{BC}(X_2) \wedge \mu_B(X_3) \wedge \mu_B(X_4) \wedge \mu_{BC}(X_5) \vee \\
&\mu_{BC}(X_1) \wedge \mu_B(X_2) \wedge \mu_{BC}(X_3) \wedge \mu_{BC}(X_4) \wedge \mu_B(X_5).
\end{aligned} \tag{2.25}$$

Для уникнення ризиків реалізації проектного рішення по підвищенню енергоефективності стінових конструкцій за запропонованою методикою необхідно мати достовірну базу даних якісних та кількісних факторів впливу, та чітко представляти причинно-наслідковий зв'язок цих факторів та кінцевої інтегральної(комплексної) оцінки.

Очевидно, що наведена класифікація впливаючих факторів за кількісними та якісними ознаками (економічними, екологічними, теплофізичними, художньо-естетичними) дозволяє встановити їхні взаємозв'язки, які потім трансформуються у систему логічних рівнянь цільової функції щодо вибору оптимального теплоізоляційного матеріалу при термореновації будівель.

Тут також слід відмітити, що використання апарату нечіткої логіки та лінгвістичних змінних які враховують не тільки кількісні але й якісні характеристики нададуть можливість особі, що приймає рішення (ОПР) гнучко обирати проекти до реалізації, приймаючи до уваги отриману комплексну теплотехнічну оцінку енергоефективності будівлі.

Окрім фінансових ризиків, що мають місце при реалізації проектного рішення термомодернізації будівлі, варто також відмітити, що у реальних умовах економічної та фінансової невизначеності ще мають місце невизначеність, або нестабільність фізико-механічних характеристик власне будівельних матеріалів.

Ігнорування цією мінливістю фізико-механічних та тепло-фізичних характеристик будівельних матеріалів, що використовуються при влаштуванні зовнішніх стінових оболонок, може зумовити також непередбачувані розрахунком «відмови», або вихід за межі допустимих діапазонів у цих характеристиках.

Так, зменшення спроможності зовнішніх стінових оболонок забезпечувати нормативні теплоізоляційні властивості при заданих експлуатаційних режимах за причинами виникнення теплової відмови визначаються рядом чинників. На цій підставі класифіковано теплову відмову ізоляційної оболонки будівлі за тепловим режимом і причинами її виникнення за такими типами: проектно-конструктивні, технологічно-монтажні, експлуатаційні та концептуальні на системному рівні. Результати експериментальних тепловізійних обстежень існуючих багатоповерхових житлових будинків в м. Вінниці свідчать про наявність відхилень теплофізичних властивостей їх зовнішніх стінових оболонок від діючої нормативної бази. Особливо суттєва відмова ізоляційної оболонки будівлі притаманна вузлам примикання стінових конструкцій. Управління енергозберігаючими проектами термомодернізації стін будівель на етапі розробки інвестиційної фази проектною реалізації із зменшення теплової відмови оболонки для забезпечення комфортних мікрокліматичних умов в приміщеннях можливо тільки при сукупній оцінці імовірності теплової відмови з врахуванням можливих кількісних та якісних чинників. Вирішення цієї задачі показує розроблення структурно-алгоритмічної моделі реалізації проектного рішення з комплексного



управління імовірністю теплової відмови теплоізоляційної оболонки будівлі, яка враховує динамічне оточення проектного рішення для створення нормативних санітарно-гігієнічних умов в приміщеннях.

Вимоги до теплотехнічних властивостей теплоізоляційної оболонки стін в Україні регламентуються відповідною нормативною базою [36], які суттєво підвищені останнім часом, але не в повній мірі дозволяють прогнозувати імовірність теплової відмови під впливом негативних кількісних та якісних чинників.

Реалізація заходів з енергозбереження потребує розроблення проектів із забезпечення зменшення дії сукупності кількісних та якісних негативних факторів, що впливають на показники імовірності теплової відмови теплоізоляційної оболонки будівлі [33117]. Особливо це стосується управління енергозберігаючими проектами утеплення будівель [112] на етапі розробки концепції інвестиційної фази проектною документацією, так як збільшення імовірності теплової відмови теплоізоляційної оболонки призводить до зменшення комфортних мікрокліматичних умов в приміщеннях та зниження локальних температур внутрішньої поверхні стін [33117, 120].

Теплоізоляційна оболонка будівлі як комплексна оцінка естетичних, соціальних та економічних показників, призначена забезпечувати комфортні санітарно-гігієнічні умови для життєдіяльності людини та нормативні вимоги щодо технологічних процесів в приміщеннях. За Фаренюком Г.Г. [33,14] під тепловою відмовою теплоізоляційної оболонки розуміється такий її стан, при якому подальша експлуатація призводить до порушення умов життєдіяльності людини або технологічних процесів в приміщеннях, зменшується довговічність конструкцій та збільшуються експлуатаційні витрати енергоносіїв.

За результатами вивчення питань надійності та довговічності теплоізоляції будинків на підставі статистичних даних Фаренюк Г.Г. [33] запропонував класифікацію теплових відмов ізоляційної оболонки будівлі. Для будівель, що запроектовані та побудовані на підставі різної нормативної бази, ним за аналізом статистичних даних встановлено чотири типи та їх величини розподілу виникнення

теплових відмов (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Розподіл виникнення теплових відмов у будинках різних років за будови (Фаренюк Г.Г., 2009) [14]

Період за будови	Причини теплових відмов, %			
	Проектні	Технологічні	Експлуатаційні	Концептуальні
1960-1995	10	35	35	20
1996-2006	35	20	5	40

В роботі [120] запропоновано методику числового оцінювання теплової надійності однорідних зовнішніх стінових оболонок за критерієм тепловтрат. Такими критеріями є відхилення величин опору теплопередачі від розрахункових через мінливість проектних геометричних й теплофізичних показників матеріалів стін та перевищення максимально допустимого значення щільності теплового потоку через їх товщу.

Дослідженнями зарубіжних авторів стверджується, що на теплову надійність зовнішніх стінових конструкцій суттєво впливає мінливість теплотехнічних характеристик будівельних матеріалів, які використані при їх виготовленні, тобто технологічні фактори впливу.

В роботі [120] за результатами аналітичних досліджень зміни температури внутрішнього повітря приміщень будівлі в холодний період року встановлено, що на величину сумарних тепловтрат суттєво впливають дефекти зовнішніх стінових конструкцій під час їх виготовлення та експлуатації. Запропоновано залежності прогнозування теплової надійності стінових конструкцій, які мають дефекти, для визначення аналітичним способом температури внутрішніх приміщень будівлі.

В роботі українських науковців Пічугіна С.Ф., Семка В.А. [117] розглянуто методику теплової відмови зовнішніх стінових оболонок із сталевих холодноформованих елементів за критерієм зниження локальних значень температур. Теплову відмову розглянуто як випадок зниження температури на поверхні стіни нижче температури конденсації водяної пари. За результатами

числового моделювання рекомендується визначати значення математичного сподівання і стандарту функції локальної температури на внутрішній поверхні стіни будівлі.

Порівняльний аналіз тепловізійних характеристик зовнішніх стінових оболонки, отриманих за результатами тепловізійних обстежень багатопверхових житлових будинків м. Вінниці свідчить, що відхилення фактичного термічного опору від нормативного становить до 20% [114]. При оцінці енергоефективності архітектурних об'єктів у Вінниці використовують наступну їх градацію:

- споруди, які почали експлуатуватися раніше 2007 року, вимагають для обігріву та охолодження приблизно 300 кВт / год на квадратний метр;
- нові споруди з відповідним енергоспоживанням в 150 кВт / год на квадратний метр;
- об'єкти з низьким споживанням енергії в 60 кВт / год на квадратний метр;
- будівлі пасивного типу, які споживають 15 кВт / год на квадратний метр;
- споруди з нульовим споживанням енергії;
- будівлі, що виробляють енергію в кількості, що перевищує її споживання (обладнані сонячними батареями, колекторами, тепловими насосами рекуператорами та подібним енергетичними агрегатами).

Суттєві коливання зовнішніх температур фасадів будівель у вузлах примикання на горищі, в підвалах, у входах в під'їзди та біля віконних прорізів. В зв'язку з цим для підвищення теплової надійності оболонки будівель, що побудовані протягом останніх 20-30 років, доцільним є впровадження інноваційних енергозберігаючих заходів.

Обґрунтування доцільності оптимізації варіантів підвищення імовірності величини теплової відмови теплоізоляційної оболонки будівлі рекомендується здійснювати відповідно до запропонованої структурно-логічної моделі з реалізації проектного рішення щодо управління заходами із забезпечення теплової надійності стінових оболонки (рис. 2.5) [118].

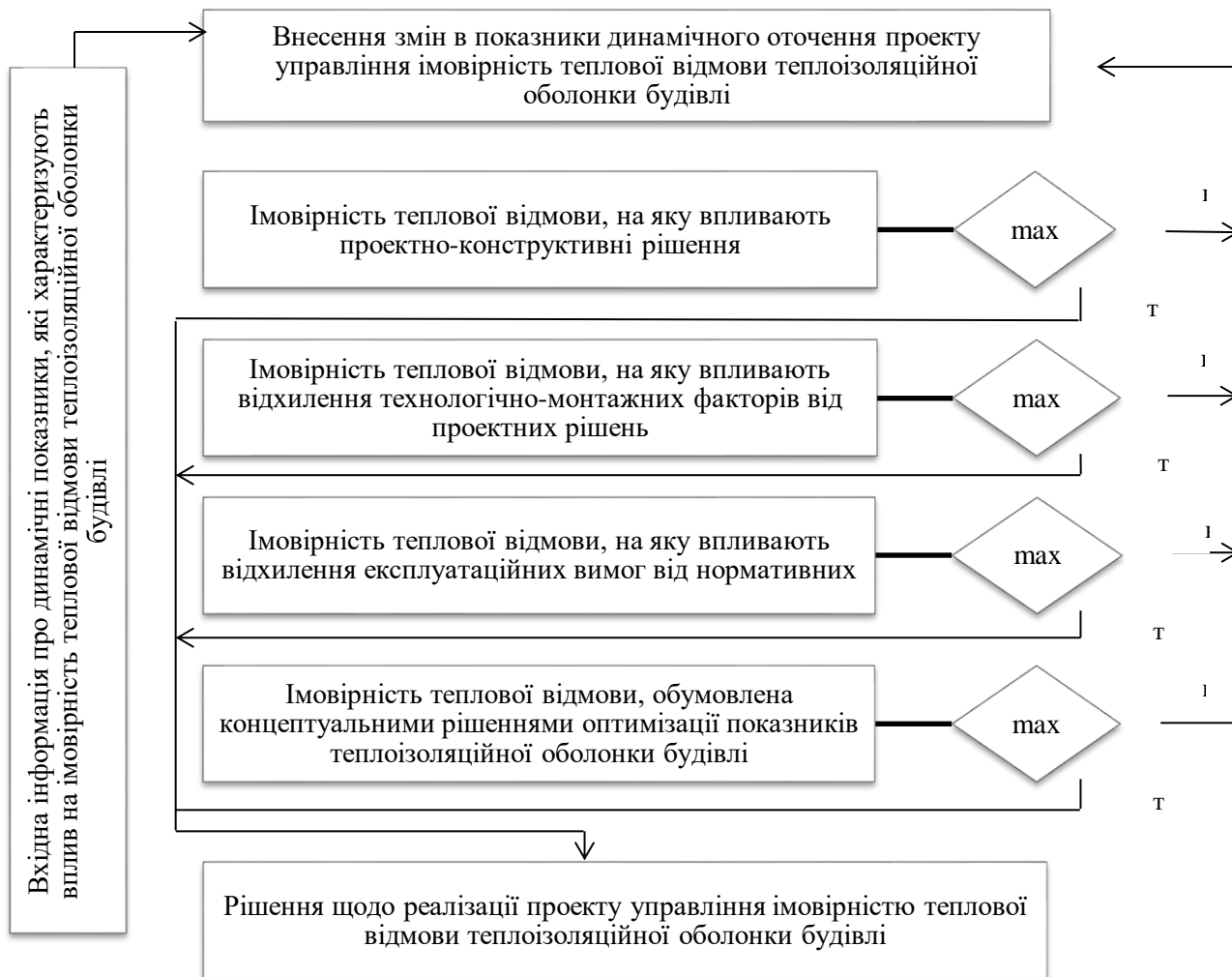


Рисунок 2.5 – Структурно-алгоритмічна модель реалізації проектного рішення для комплексного управління імовірністю теплової відмови теплоізоляційної оболонки будівлі [118]

Змінні показники динамічного оточення управління проектом із забезпечення необхідної загальної теплової надійності ( $I_{\text{заг}}$ ) теплоізоляційної оболонки будівлі необхідно оптимізувати шляхом впровадження енергозберігаючих заходів з врахуванням можливих типів та причин теплової відмови стінових конструкцій

$$I_{\text{заг}} = f(I_{\text{ПК}}, I_{\text{ТМ}}, I_{\text{Е}}, I_{\text{К}}) \rightarrow I_{\text{min}}, \quad (2.26)$$

де  $I_{\text{ПК}}$ ,  $I_{\text{ТМ}}$ ,  $I_{\text{Е}}$ ,  $I_{\text{К}}$  – відповідно імовірність теплової відмови теплоізоляційної оболонки будівлі, на яку впливають проектно-конструкторські, технологічно-монтажні, експлуатаційні та концептуальні рішення при термомодернізації стінових конструкцій.

Запропоновані та реалізовані організаційно-технологічні рішення по оптимізації імовірності теплової відмови оболонки будівель на концептуальній фазі життєвого циклу проекту управління тепловою надійністю дозволяють підвищити енергоефективність будівлі та забезпечити необхідні санітарно-гігієнічні параметри в приміщеннях.

### 2.3.2 Критеріальне число Савіна [86]

Д.т.н. Савін В. К. [86] запропонував спосіб визначення мінімальних енергозатрат які можна теоретично досягти при проектуванні оболонки будівлі. Ним запроваджено безрозмірний показник  $Sa$ , що характеризує тепловтрати  $1 \text{ м}^2$  стіни, при опорі теплопередачі  $R_0^*$ , при їх співставленні з вартістю теплової енергії, що була освоєна на виробництво, монтаж (демонтаж) конструкції стінової оболонки в рамках терміну експлуатації зовнішніх стінових оболонок без проведення догоровартісної процедури капітального ремонту. Таким чином Савін В. К. [86] зміг зв'язати в одній залежності енергозатратність зовнішніх стінових оболонок, їх теплотехнічні характеристики, суворість клімату району будівництва та інтегральну характеристику довговічності. Зрозуміло, що такий вдалий підхід може бути застосований в якості вагомого показника для багатокритеріального порівняння альтернатив, для раціонального та зваженого вибору типу стіни.

Безрозмірний показник  $Sa$  обчислюється як [86]

$$Sa = \frac{Q_k^* \cdot R_0^*}{24 \cdot D \cdot z}, \quad (2.27)$$

де  $Q_k^*$  – енергопотреба еталонного зразка, що дорівнює  $1 \text{ кВт} \times \text{год} / \text{м}^2$ ;

$R_0^*$  – опір теплопередачі зовнішніх стінових оболонок, що дорівнює  $1 \text{ м}^2 \times \text{°C} / \text{Вт}$ ;

$D$  – кількість градусо-днів опалювального періоду (ГДОП) району будівництва,  $\text{°C} \times \text{днів}$ ;

$z = \frac{z_{\text{експл}}}{z_{\text{оп.період}}}$  – безрозмірна величина, яка дорівнює терміну експлуатації

огороджувальної стіни, років;

Для потреби грубого розрахунку енергопотреба стінового огороження може бути обчислена як [86]

$$Q_k^* = \frac{c^*}{c_m}, \quad (2.28)$$

де  $c^*$  – вартість влаштування квадратного метра еталонного зразка стінової оболонки,  $c^* = 1$  (грн/м<sup>2</sup>);

$c_m$  – чинний вартість теплової енергії, грн/Гкал;

Після обчислення безрозмірного показника  $Sa$  обчислюють мінімальне значення опору теплопередачі як [86]

$$R_0^{min} = \frac{R_0^*}{\sqrt{Sa}} = \frac{1}{\sqrt{Sa}}, \left[ \frac{\text{М}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}} \right]. \quad (2.29)$$

Мінімальний сумарний коефіцієнт теплопередачі 1м<sup>2</sup> елемента зовнішньої стінової оболонки знаходимо як [86]

$$K_{сум}^{min} = 2 \cdot K_e^* \cdot \sqrt{Sa} = 2 \cdot 1 \cdot \sqrt{Sa} = 2 \cdot \sqrt{Sa}, \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{М}^2 \cdot \text{°C}} \right]. \quad (2.30)$$

Величина мінімальних річних енерговитрат, які містять в своєму обчисленні витрати життєвого циклу стінової оболонки визначають як [86]

$$q_{сум}^{min} = 0,024 \cdot D \cdot K_{сум}^{min}, \left[ \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{М}^2 \cdot \text{°C} \right]. \quad (2.31)$$

Порівняння альтернатив, яке проводять по даним формули (2.31) покаже на мінімальну з можливих стінову оболонку в якій сумарна енергопотреба буде меншою зі всіх порівнюваних. Це і буде кращим типом огорожувальної конструкції стіни.

Таким чином, в даній магістерській кваліфікаційній роботі критеріальне число Савіна взято до уваги, як об'єктивний показник при проведенні багатокритеріального аналізу.

2.4 Поняття енергетичного моделювання ВЕМ, що необхідно для ефективного аналізу моделей

Визначення терміну енергетичного моделювання будівель (*Building Energy Modeling, BEM*) у різних авторів трактується по різному, але суть при цьому залишається однаковою. В загальному розумінні BEM – моделювання енергоспоживання будівлі, або енергомоделювання будівель. Тобто це серія інженерних розрахунків, що дозволяють прогнозувати споживання енергії будівлею протягом року. І, як наслідок, спрогнозувати окупність проектних рішень при порівняннях результатів. Це співзвучно із думкою автора [90], що вважає параметри будівель і споруд, які формують їх енергоефективність, повинні враховуватись вже на передінвестиційній та інвестиційній фазах будівництва. При цьому енергоефективність стає узагальненою характеристикою функціонування будівлі, споруди, закладеної при проектуванні, та втіленої у процесі експлуатації.

На думку канд. фіз.-мат. наук Герасимова М. А. BEM – комплекс інженерних розрахунків, що демонструє функціонування будівлі протягом року на рівні параметрів, що описують процеси споживання енергії. Ключовим словом тут є «комплекс», адже при енергомоделюванні необхідно провести комплексні розрахунки, при яких враховуються всі зв'язки між елементами будівлі і споживачами енергії в актуальних умовах експлуатації [91].

Схожа оцінка надана терміну BEM і к.т.н. Білоус І. Ю. у роботі [92]. Так автор визначає, що енергетичне моделювання в будівництві (BEM) передбачає прогнозоване споживання енергії будівлею та відповідний рівень енергозбереження порівняно із стандартною базовою лінією. Що, в свою чергу має демонструвати відповідність проекту вимогам зеленої сертифікації (наприклад LEED [124], DGNB [126125], BREAM [126126], СТО НОСТРОЙ 2.35.4-2011 [127], HQE [128] чи іншим).

BEM прогнозує енергоефективність на основі даних типового метеорологічного року (Typical Meteorological Year - TMY), а також припущень щодо експлуатації будівель, що, в свою чергу, дозволяє розрахувати різні енергозберігаючі заходи [93, 94]. BEM може бути використаний для оцінки споживання енергії в будівництві при застосуванні різних дизайнерських рішень та допомагає проектувальникам приймати найкращі рішення [93-95].

Очевидно, що енергомодельовання – це мистецтво, яке є нагальною необхідною сучасною компетенцією для інженера у будівництві. Як зазначає автор [91], енергомодельовання – це ціла галузь, яка може стати необхідним та корисним доповненням до будь-якого проекту. Можливість побудувати і розрахувати єдину модель будівлі в актуальних умовах експлуатації, з урахуванням динаміки і реальної фізики процесів, дає величезні можливості для прийняття проектних рішень і контролю їх якості. Погодинні профілі холодильних і опалювальних навантажень, ефективність рекуперації і теплових насосів, природне освітлення і вплив на сусідні будівлі, оптимальна орієнтація і склад огорожувальних конструкцій – цілий комплекс інженерних розрахунків, які неможливо провести вручну вручну [91]. З тезою про безліч параметрів, що необхідно врахувати при проектуванні енергоефективного житла погоджується й автор книги Ю. Н. Лапін [2].

Головне те, що в ході роботи по енергомодельованню припустимо робити вибір між багатьма варіантами і їх компонуванням, і це не потребує заново проводити всі розрахунки, як в ручному варіанті. Автоматизація обчислень при цьому не звільняє від необхідності ретельної підготовки вихідних даних. Головну роль при цьому відіграє фахівець, що виконує модельовання, і рівень його підготовки. І таким фахівцем може стати кожен, при достатньому бажанні, часу і знанні англійської мови [91].

Отже слід відмітити, що інтеграція математичних моделей ВЕМ, які можуть описувати будівельну фізику, може допомогти в успішному контролі енергоефективності будівництва з урахуванням динамічно змінюваних параметрів а.

як у проектній частині так і у кліматичному аспекті.



## 2.5 Класифікація програмних продуктів для виконання енергетичного моделювання будівель

Для аналізу теплового стану будівель моделі створюються на базі програмних продуктів, стандартів для визначення енергопотреби будівель та використовуються авторські розробки.

Для аналізу будівель наявний великий спектр програмних продуктів, вони різняться за вартістю та доступністю, побудовані для різних операційних систем. Методологічно вони можуть бути побудовані:

- як бази даних;
- на базі фізичних розрахунків на основі фізичних законів, рівнянь;
- для вирішення завдань оптимізації; для моделювання об'єктів енергоспоживання за різних умов (стаціонарних, квазістаціонарних, нестаціонарних режимів) [96].

Багато програмних продуктів можна знайти через Інтернет як у вільному доступі так і через ліцензійний доступ. В огляді наведені програмні продукти, які дозволять проводити аналіз як окремої будівлі (зони), так і групи будівель/району міста.

К. т. .н. Білоус І. Ю. у своїй роботі проведено ретельний аналіз методів, засобів та типів програм для енергомоделювання будівель [92]. Так, ВЕМ підходи реалізуються на базі програмних продуктів, найбільш поширений серед них це EnergyPlus та TRNSYS [97, 98].

ВЕМ використовуються для аналізу вже діючих будівель. За класом вирішуваних задач розглянуті програмні продукти підрозділяються для:

- прогнозування та планування енергоспоживання: EnergyPlus [97], TRNSYS [98], eQUEST [99];
- оптимізації енергоспоживання: Energy PLAN, EnergyPlus, eQUEST, TRNSYS, OSeMOSYS, HOMER, Modelica [97, 98, 100];
- визначення енергетичних характеристик будівель: Енергетичний паспорт, Дисплей, EnergyPlus, eQUEST, TRNSYS [97, 98, 99, 100];

Програмні продукти є різними за складністю, доступністю та іншими ознаками, що призводить до різного ступеню застосування. Для деяких програмних продуктів, що відсутні в мережі у вільному доступі (наприклад, FLUENT), створені безкоштовні аналоги на базі Linux (наприклад, OpenFOAM). Розглянуті програмні продукти дозволяють вирішувати великий спектр задач. Для визначення енергетичних характеристик будівель найбільш розповсюдженим є використання існуючих програмних продуктів, таких як EnergyPlus, eQUEST, TRNSYS, ANSYS / FLUENT, SolidWorks, Modelica тощо.

Програмне забезпечення EnergyPlus є найбільш розвиненою і докладною програмою для аналізу споживання енергії на будівлях, що базується на динамічному моделюванні. Для України доцільним є використання EnergyPlus з наступних причин: програмний продукт є безкоштовним, має високу точність розрахунків та можливостей, а також містить для двох міст України (Києва та Одеси) погодинні кліматичні файли, що підтримуються програмою International Weather for Energy Calculations (IWEC) [102102]. Програмний продукт не має свого графічного редактору, тому розміри елементів огорожень можна задати покоординатно або через графічний редактор Google SketchUp або ліцензійну версію Design Builder. Задаються теплофізичні властивості багатошарового огороження, віконні конструкції з оптичними особливостями скління, інженерні системи, графік роботи та температурні режими роботи та інше. Програмний продукт враховує інерційні особливості огорожень та систем будівлі, динаміку мінливості кліматичних даних. На виході програмний продукт дозволяє отримувати температуру повітря, радіаційну температуру поверхонь, навантаження на систему опалення/охолодження та вентиляцію (HVAC-систему), та інше. EnergyPlus використовує функції DOE-2 та BLAST, до яких наближені європейські стандарти, що робить його привабливим для будівель різного призначення та для різних вихідних параметрів в програмному середовищі EnergyPlus.

RHPP (Німеччина) – програма для проектування пасивного будинку (пакет проектування пасивного будинку), що використовується при розробці пасивних

будинків і служить для підтвердження стандарту пасивного будинку. Розроблений у 1998 році, постійно вдосконалюється, із кожною новою версією до програми додаються нові фактори впливу на енергетичний баланс будинку. Додаються нові методи розрахунку. РНРР включає в себе розрахунок енергобалансів, проектування комфортної системи вентиляції, розрахунок опалювального навантаження або навантаження на систему охолодження, а також багато інших інструментів [90].

При підрахунках максимально враховані всі види факторів, що впливають на енергетичний баланс будинку – кліматологічні дані, фізичні дані об'єкту (площі будівельних елементів, їх орієнтація, коефіцієнти теплопередачі), затінення від сусідніх об'єктів, враховуються всі можливі втрати тепла (трансмісійні, містки холоду, втрати тепла через вентиляцію, тепловтрати через прилеглі до ґрунту конструкції і навіть розраховуються втрати тепла системою опалення та гарячого водопостачання), враховується пасивне надходження тепла (сонячне надходження тепла) та можливість введення даних для пасивного охолодження, враховується використання відновлювальної енергії, враховуються різні види вентиляції (окрім класичної, наприклад, механічна нічна вентиляція в літній період через вікна).

Розрахунки можна проводити як для холодної пори року для розрахунку енергетичних потреб на опалення, так і для теплої пори року для розрахунку потреб на охолодження.

В результаті, РНРР забезпечує розрахунки таких параметрів:

- Потреба енергії на опалення на рік [кВт / год·м<sup>2</sup>] та максимальне опалювальне навантаження [Вт / м<sup>2</sup>];
- Потреба енергії на охолодження на рік [кВт / год·м<sup>2</sup>] та максимальне охолоджувальне навантаження [Вт / м<sup>2</sup>] (у разі активного охолодження);
- Літній комфорт при пасивному охолодженні: частота перегріву [%];
- Попит на відновлювану первинну енергію на рік та попит на первинну енергію всіх енергетичних послуг вцілому по будівлі [кВт / год·м<sup>2</sup>];
- Оцінка річного приросту відновлюваної енергії [кВт / год·м<sup>2</sup>].

Результати для різних варіантів проекту виводяться у графіках у вигляді стовпців і обчислюються паралельно, так що вплив цих змінних параметрів можна легко

порівняти. Також, різні етапи реконструкції також можуть бути введені в єдиний файл PHPP. Також, у останній версії програми можливе порівняння економічної доцільності між вибраними варіантами планування. В якості додатку, Інститутом пасивного будинку розроблено плагін для програми ScetchUp – Design PH, інструмент для введення у PHPP геометрії об'єкту. Даний інструмент дозволяє користувачам моделювати проекти пасивних будинків у 3D форматі, він спрощує процес введення даних у PHPP - геометричні дані вводяться у PHPP автоматично після того, як користувач експортує 3D модель свого проекту з програми ScetchUp через плагін Design PH (у якому налаштовується регіональний клімат, освітлення об'єкту) у PHPP.

Інструмент PHPP спільно з плагіном Design PH можна вважати ефективним програмним забезпеченням для розрахунку теплового балансу будівлі, проте тут не враховується вплив внутрішніх структурних елементів один на одного в повній мірі, при розрахунках не враховується процеси переміщення мас повітря всередині будівлі, а об'єкт сприймається програмою як єдина оболонка. Відсутня можливість задати різні параметри внутрішнього клімату в різних зонах об'єкту.

В Австрії енергетичні розрахунки проводять у програмі ArchiPHYSIK [103]. Програма подібна до PHPP, яка після розрахунків виводить енергетичний сертифікат, що затверджений законодавством даної країни. ArchiPHYSIK містить спрощені та детальні розрахунки для одиночних та багатозонних енергетичних сертифікатів. У цій програмі (так само, як і у PHPP) вводяться дані щодо конструктивних рішень та матеріалів об'єкту, а виводяться розраховані дані по даному об'єкту. Так само, як і PHPP, дана програма розглядає об'єкт як єдину теплову оболонку.

Геометричні та географічні дані є невід'ємною частиною будівельних фізичних розрахунків, тому два спеціальних додатка до ArchiPHYSIK забезпечують легку обробку даних CAD. Для перепланування та реконструкції можливий доступ до даних ArchiCAD. Також є можливість для роботи зі SketchUp. Окрім розрахунку теплового балансу в будівлі, дана програма розраховує екологічний індекс OI3 для житлових субсидій в Австрії та видає матеріал для екологічної сертифікації ÖGNI.

Також у даній програмі розраховуються та виводяться результати звукоізоляції будівлі.

Простий у використанні та наочний інструмент для енергетичного моделювання будівель – програма OPTIMA (Польща). Програма створена для енергетичного моделювання на ранній стадії етапу проектування будівель, вона зручна і дозволяє реалізувати енергетичну та економічну оцінки будівлі ще на етапі концепції проектного рішення.

Точність результатів у даній програмі має другорядне значення, а акцент робиться на швидкість, інтуїтивність і простоту у використанні, що досягається за допомогою робочої моделі, яка полягає у заданні конфігурації оболонки будівлі із запропонованих збірних елементів з певними показниками. Програма виконує розрахунок енергетичних показників (розраховує трансмісійні втрати тепла, втрати через вентиляцію, прогнозує витрати енергії на опалення та гаряче водопостачання) та оптимізує рішення, що впливають на енергетичну якість будівлі, що в кінцевому підсумку вказує на оптимальні рішення. Програма також аналізує економічну рентабельність використання відновлювальних джерел енергії та вибрану систему опалення. В OPTIMA можна оцінити енергетичну, екологічну та економічну ефективність окремих будівельних елементів, що впливають на споживання енергії, а також визначити вартість їх використання та можливе збільшення інвестиційних витрат.

Найбільш інформаційний інструмент енергетичного моделювання будівель з усіх на сьогодні наявних – пакет програм Hottgenroth (Німеччина) [104], висновки якої офіційно визнаються урядом Німеччини. Це декілька програм, які співпрацюють одна з одною та кожна відповідає за свою частину розрахунку. У програмах можна змоделювати у 3D форматі систему опалення, охолодження, вентиляції, водопостачання, протипожежний захист, спроектувати роботу фотоелектричних систем, спроектувати тепловий насос та режим його роботи для об'єкту, графічно змоделювати та розрахувати нагрівальні трубні мережі для опалення, скласти погодинний графік теплового балансу будівлі, скласти сертифікат споживання енергії для будинку та багато іншого. Інструментом для моделювання теплового

балансу будівлі в цій збірці програм є софт ETU-Planer – універсальне рішення, що дозволяє проводити велику кількість розрахунків в одному програмному середовищі. Програма дає можливість продивлятися 3D-зображення на будь-якому етапі моделювання, можливість виділення зон (окремих приміщень) з різними температурними режимами, визначення теплового навантаження приміщень, виконувати розрахунок радіаторів, нагрівальних елементів на підлозі або на стіні, виходячи з навантаження на опалення та багато супутніх розрахунків. Графічне представлення навантажень і результатів виконується у вигляді діаграм [90].

Потужним інструментом оцінки теплового балансу будівлі є EcoDesigner STAR – розширення ARCHICAD [105], що дозволяє використовувати всі переваги BIM проектування в процесі Енергетичного Моделювання Будівель (BEM). Нюансом програми є те, що температурні показники кожної зони будівлі, що проектується, не можна задати з самого початку, вони є похідними від вибраної системи опалення або охолодження (і підраховуються програмою автоматично), тобто обернену задачу можна вирішувати тільки методом підбору варіантів систем опалення та охолодження. Ще однією особливістю програми є те, що взаємний тепловий вплив зон враховано тільки трансмісійним та інфільтраційним видом теплообміну, а способів врахування променевого та конвективного виду теплообміну не передбачено. Проте програма зручна у використанні за рахунок того, що дозволяє проектувати у програмі GRAPHISOFT ARCHICAD та паралельно переносити дані у EcoDesigner STAR для швидкого складання енергобалансу, змінювати об'ємно-планувальні рішення, якщо результати не задовольняють, порівнювати їх та вибирати найкращий варіант проекту.

Графічно тепловий баланс будівлі надається у вигляді двох стовбчастих графіків один над одним – надходження тепла у кВт у графіку з додатними стовпчиками та втрати тепла у графіку з від'ємними стовпчиками. Графіки можуть бути створені для кожної зони або для об'єкту в цілому. Також підраховуються пікові навантаження на системи опалення та охолодження [90].

У РФ некомерційне об'єднання «АВОК», що доречі є одним з розробників стандарту СТО НОСТРОЙ 2.35.4-2011 [127], пропонує проектувальникам

програми по оцінці тепловтрат та теплонадходжень у будівлю при проектуванні. Це «Розрахунок тепловтрат приміщень і теплових навантажень на систему опалення житлових та громадських будівель» та «Програма з експрес-оцінки ефективності енергозберігаючих рішень». Коротко наведено основні особливості використання даних програмних продуктів:

1. «Розрахунок тепловтрат приміщень і теплових навантажень на систему опалення житлових та громадських будівель». Програма призначена для визначення розрахункових тепловтрат опалювальних приміщень, тепловіддачі опалювальних приладів і розрахунку навантаження на систему опалення при проектуванні нових, при реконструкції, капітальному ремонті та модернізації житлових і громадських будівель [127].

Дана програма дозволяє визначити:

- а) розрахункові тепловтрати окремих приміщень та будівлі в цілому;
- б) трансмісійні тепловтрати приміщень та будівлі в цілому;
- в) енергетичні потреби на нагрівання зовнішнього повітря, що надходить через систему вентиляції;
- г) розрахунок необхідних теплових навантажень на систему опалення;
- д) розрахункові параметри теплоносія, що циркулює в системі опалення, і їх зміни в залежності від температури зовнішнього повітря і з урахуванням запасу поверхні нагрівання опалювальних приладів.

Серед вихідних даних: зовнішня температура повітря, швидкість вітру, параметри огорожувальних конструкцій (коефіцієнт теплопередачі, коефіцієнт положення, приведений опір повітропроникності), загальні параметри будівлі (висота, розміри). У результатах підрахунків тепловтрати по приміщенням сумуються у загальні тепловтрати будівлі, проте зовсім не враховується взаємне розташування приміщень відносно один одного, вплив одного приміщення на інше. Недоліком програми є те, що враховується лише трансмісійний вид теплопередачі, і зовсім не враховані конвективна та радіаційна теплопередачі та процес теплообміну за рахунок переміщення потоків повітря.

2. «Програма з експрес-оцінки ефективності енергозберігаючих рішень» дозволяє оцінити внесок конкретного енергозберігаючого рішення в зниження теплоспоживання конкретного будинку в порівнянні з базовим за рахунок застосування енергозберігаючого обладнання, технологій або заходів, таких як:

- регулювання витрат на споживання теплової енергії на ввіді в будинок або квартиру (пристрій ІТП, автоматизований вузол управління і т.д.);
- регулювання тепловіддачі опалювальних приладів (пофасадне регулювання, переривчастий режим опалення, пристрій термостатів);
- зниження трансмісійних тепловтрат через зовнішні світлонепроникні огорожувальні конструкції (зменшення впливу містків холоду, підвищення теплотехнічної однорідності огорожуючих конструкцій);
- зниження трансмісійних та інфільтраційних тепловтрат через зовнішні світлопроникні огорожуючі конструкції (застосування нічних штор);
- регулювання вентиляційного повітрообміну в залежності від потреби (пристрій припливних регульованих пристроїв, центральних і місцевих вентиляційних установок).
- використання утилізаторів теплоти витяжного вентиляційного повітря для нагріву / охолодження припливного повітря (застосування пластинчастих теплообмінників, теплообмінників з обертовою теплообмінною насадкою (роторних рекуператорів), теплообмінників з проміжним теплоносієм (теплообмінники рідина-повітря)).

Ефективне поєднання математичної моделі теплового балансу будівлі з його геометрією показує у своїй роботі д.т.н. Табунщиков Ю. А. [1]. В роботі висвітлюються концептуальні положення побудови графо-аналітичних моделей будівель як об'єкту теплообміну. При цьому робота не містить конкретних практичних вказівок щодо комплексних системних розрахунків теплового балансу будівлі. Отже, не зважаючи на наявність досить ергономічних інформативних програм розрахунку, не існує жодної, яка б вирішувала обернену задачу.

Також, практично всі програмні засоби розглядають об'єкт в цілому як єдину теплову оболонку, не враховуючи в повній мірі вплив одного елемента внутрішньої



структури на інший [107]. Такий розгляд робить неможливим задання різних мікрокліматичних умов в різних приміщеннях (наприклад, в дитячій кімнаті потрібно задати  $+25^{\circ}\text{C}$ , а в іншому приміщенні - спортзалі чи санвузлі  $+19^{\circ}\text{C}$ ) та детально проаналізувати вплив приміщень з різним мікрокліматом на загальний тепловий баланс будинку.

Критичний огляд вищезазначених методик та програмних засобів для моделювання енергоспоживання будівлі представлений в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Методи та програмні засоби оцінки теплового балансу при проектуванні архітектурних об'єктів, за даними [107]

№	Різнovid	Країна походження	Різнovid	Функціональність	Можливість моделювання внутрішньої геометрії об'єкту, наявність графічного супроводу
1	2	3	4	5	6
1	Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорта будинків при новому будівництві та реконструкції	Україна	Настанова	Розрахунок загальних тепловтрат будинку через огорожувальну оболонку; - розрахунок теплонадходжень протягом опалювального періоду; - розрахунок значення питомих тепловтрат на опалення будинку за опалювальний пе-ріод; - присвоєння будівлі класу енергетичної ефективності від А до G.	Неможливе Розглядає об'єкт як єдину теплову оболонку). Не має графічного додатку.
2	РНРР (пакет проектування пасивного будинку)	Німеччи на	Програмни й комплекс	Розрахунок потреб енергії на опалення та максимальне опалювальне навантаження; - розрахунок потреб енергії на охолодження; - розрахунок пасивного охолодження, частоту перегріву при ньому; - розрахунок попиту на відновлювану первинну енергію та	Не можливо. Графічний додаток є, проте об'єкт сприймається програмою як єдина теплова оболонка.

				попиту на первинну енергію всіх енергетичних послуг вцілому по будівлі; -оцінка річного приросту відновлюваної енергії.	
3	«Розрахунок тепловтрат приміщень і теплових навантажень»	Росія	Програмний комплекс	- Розрахунок трансмісійних тепловтрат окремих приміщень та будівлі вцілому; - розрахунок	Не можливо. Не має графічного додатку.

## Продовження табл. 2.1.

	на систему опалення житлових та громадських будівель».			енергетичних потреб на нагрівання зовнішнього повітря, що надходить через систему вентиляції; - розрахунок необхідних теплових навантажень на систему опалення.	
4	«Програма по експрес-оцінці ефективності енергозберігаючих рішень».	Росія	Програмний комплекс	Оцінка внеску конкретного енергозберігаючого рішення у зниження теплоспоживання конкретного будинку в порівнянні з базовим за рахунок застосування енергозберігаючого обладнання та технологій	Не можливо. Не має графічного додатку.
5	Archiphysik	Австрія	Програмний комплекс	-Розрахунок потреб енергії на опалення та охолодження	Не можливо. Графічний додаток є, проте об'єкт сприймається програмою як єдина тепла оболонка.
6	Optima	Польща	Програмний комплекс	-Розрахунок енергетичних показників (трансмісійні втрати тепла, втрати через вентиляцію, прогноз витрати енергії на опалення та гаряче водопостачання) -оптимізація рішень, що впливають на енергетичну якість	Не можливо. Графічний додаток є, проте об'єкт сприймається програмою як єдина тепла оболонка.

				будівлі; -аналіз економічної рентабельності Використання відновлювальних джерел енергії та економічний аналіз вибраної	
7	Hottgenroth (зокрема, софт ETU- Planer)	Німеччи на	Програмний комплекс	- Моделювання теплової поведінки будівель, зон; -визначення теплового Навантаження приміщень;	Можливо. Внутрішня геометрія Враховується при розрахунках.

Продовження табл. 2.1.

				- розрахунок нагрівальних елементів; -проектування системпитної води; -планування та проектування систем вентиляції будинку; -енергетична реконструкція будівель; -розрахунок навантаження на охолодження; -моделювання систем гарячого водопостачання та сонячного опалення;-проектування фотоелектричних систем; -планування літньої теплоізоляції; -проектування когенераційних установок, систем теплового насоса; -можливість продивлятися 3D-зображення на будь-якому етапі моделювання; -детальна підготовка документів для затвердження.	Не вирішується обернена задача проектування.
8	GRAPHISOFT EcoDesigner STAR	Міжнародна розробка	Розширення до графічного програмного пакету САПР GRAPHISOFT ArchiCAD	-Розрахунок втрат тепла для кожної зони; -розрахунок потреб енергії на опалення та охолодження впродовж року; - прогнозування температурних показників у кожній зоні впродовж року.	Можливо. Внутрішня геометрія враховується при розрахунках. Не можливо задати різні температурні показники для різних приміщень як вихідні дані. Не

					вирішується обернена Задача проектування. Графічні Можливості обмежені.
--	--	--	--	--	---

Аналіз даних табл. 2.1 та програм, що наведено у огляді вказує на той факт, що на сьогоднішній день на ринку існує багато різних за призначенням та функціоналом програмним забезпеченням, яке дозволяє моделювати енергопотребу будівлі.

Очевидним є те, що до тих під поки державними нормами не буде закріплено використання того чи іншого програмного продукту для енергомодельовання на рівні стандарту, то вибір типу програмного забезпечення залишатиметься прерогативою інженера, з огляду на зручність використання цього забезпечення та його вартість/доступність. Мабуть достовірність результатів моделювання можливо оцінити шляхом додаткової верифікації моделі енергоспоживання у різних програмних пакетах.

## 2.6 Стан питання розробки національних стандартів у галузі енергоефективного будівництва

### 2.6.1 Чинні напрацювання в нормативній базі Україні щодо оцінки енергоефективності у будівництві

З 01.07.2008 р. в нашій країні введено в дію стандарт ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2008 «Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорта будинків при новому будівництві та реконструкції», де розкрито сутність процедур, які необхідно виконати при розрахунку показників енергетичного паспорта.

Вищезазначений стандарт є розвитком положень стандарту ДБН В.2.6-31 в рамках оцінювання показників енергоефективності будинків та споруд.

Починаючи з 01.01.2009 р. в нашій державі практикується обов'язкове виконання Енергетичного паспорту будинку [122] для житлових та громадських будівель при новому будівництві та реконструкції. Стандарт, який регламентує цю процедуру – ДБН В.2.6-31:2016 «Теплова ізоляція будівель» [36].

Положення, що встановлюються у стандарті, дозволяють визначати величини розрахункових показників та складати розділ проектної документації, що стосується реалізації вимог з енергозбереження та оцінки енергетичної ефективності будинків згідно з ДБН А.2.2-3-2014 «Склад та зміст проектної документації на будівництво».

В нормах ДБН В.2.6-31:2016 [36] регламентується 6 класів енергоефективності будівель (рис. 2.6).

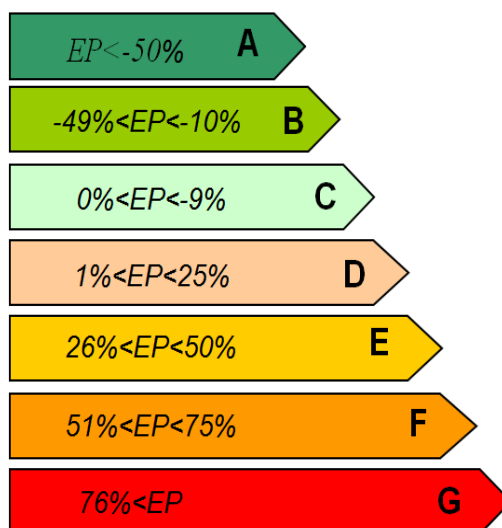


Рисунок 2.6 – Вітчизняна класифікація будинків за енергоефективністю  
Приведена у нормах [36] класифікація надає можливість уніфікувати доцільні заходи, що є економічно обґрунтованими, з метою бережливого та ощадливого використання енергії в будинках. Причому рівень заходів буде відрізнятися по суті та кошторису для приведеної гармонізації будівель різних серій та років зведення, до чинного рівня теплотехнічних вимог.

Маркування відповідності класу енергетичної ефективності будинку остаточно встановлюють після введення будинку в стадію експлуатації, за фактичними рівнем витрат енергії та співставленням цих витрат з референтними значеннями норм.. Зрозуміло, що фактичний клас може відрізнятися від проектного та може

коригуватись за проведення низки енергозберігаючих заходів по факту експлуатації.

Найкращим з точки зору енергоефективності є будівлі, що маркуються літерою «А», відповідно «F» – маркування що притаманно будівлям з найгіршими показниками.

Головна ідея що покладена в основу маркування будинків за енергоефективністю полягає у відносному відхиленні фактичних значень питомих енерговитрат від нормованих для даного класу.

## 2.6.2 Іноземні стандарти, що напрацьовані у галузі енергоефективного будівництва

Проведений аналіз літератури станом на кінець 2021 року дозволив виділити наступні стандарти:

– *Leadership in Energy and Environmental Design* [124] – один з найбільш популярних видів добровільної сертифікації у галузі будівництва (США) (англ. *LEED*). Цей стандарт сприяє впровадженню енергоефективних технологій будівництва, зокрема з натуральних матеріалів завдяки розробці і впровадженню універсальних інструментів оцінки показників енергоефективності. В нашій країні за цим стандартом сертифіковані будівлі посольства США, та офіс компанії Shell (в бізнес-центрі «Торонто») [129];

– *German Sustainable Building Certificate* [125], сертифікат стійкого будівництва (Німеччина). Характеризується шістьма показниками: екологічним, економічним, соціокультурний і функціональний, технологічним, експлуатаційним і за місцем розташування. В нашій державі цим стандартом виконано сертифікацію одного об'єкту – супермаркет компанії Billa в Києві (вул. А.Ахматової, 49) [129];

– *The Building Research Establishment* [126], метод екологічної експертизи (Великобританія). Методика містить дев'ять критеріїв: відходи, землекористування та екологія, матеріали, шкідливі викиди в атмосферу, водокористування, транспорт, енергетика, менеджмент та здоров'я та благоустрій.

В нашій країні попередню сертифікацію за цим стандартом отримали бізнес-центри «Оптіма» у Львові та Астарта в Києві та [129];

– *рейтингова система оцінки зеленого будівництва BENE* [128] (Франція), характерною особливістю якої є гнучка адаптація під місцеві стандарти країни в якій вона використовується.

– *Зеленое строительство* рейтингова система оцінки сталості довкілля СТО НОСТРОЙ 2.35.4-2011 [127] (Росія). Ця система має 46 показників, які згруповані в 10 категорій.

На превеликий жаль в Україні ще не створено національного стандарту, який би нормував «зелене» будівництво та мав би чітку шкалу маркування критеріїв для визначення класності, як це практикується у світі. Цю тезу підсилюють автори статті [131] : «Україна сьогодні робить перші кроки в галузі «зеленого» будівництва, продиктовані насамперед економічною та енергетичною кризою, ніж законодавчими або адміністративними ініціативами. «Енергетичною стратегією України до 2030 року» не передбачено окремого розділу, що стосувався б «зеленого» будівництва чи енергоефективності будівель...»

Є лише зародки такої ініціативи. Так, за даними [129], групою зацікавлених компаній та фахівців у галузі, з 2011 року в Україні створено Київську організацію – «Раду з зеленого будівництва» (UaGBC), що займалася своєю діяльністю до 2013 року. Пізніше, в 2016 році а засновано всеукраїнську громадську організацію, яка увійшла до складу Всесвітньої ради з зеленого будівництва (далі – Рада) [129].

Аналіз вищезазначених напрацювань у світі показав, що головна ідея полягає у поширенні заходів, що сприяють підвищенню енергоефективності будівель, при урахуванні потреби в мінімізації негативного впливу від вуглецевого «сліду» чи шлейфу, який ми в тій чи іншій мірі залишаємо при видобутку, транспортуванні виготовленні та утилізації будівельного матеріалу, за традиційними технологіями виробництва будівельних матеріалів.

## Висновки по розділу 2

1. Проведений аналіз літературних джерел по темі роботи показав, що на сьогоднішній день є низка різнорозмірних показників для оцінювання енергоефективності стінового огороження – фізико-механічних, економічних, комплексних тощо. Але поряд з цим, прослідковується постійний рух у напрямку пошуку нових методик, критеріїв оцінювання та відсутність єдиного методу, критерію тощо, що в повній мірі, комплексно, виважено, «об’єктивно» враховувати різнорозмірні показники, не тільки фізико-механічні, економічні, теплотехнічні, кліматологічні але й інші, що не мають кількісної шкали оцінювання. Все це сприятиме більш комплексному та виваженому підходу до вирішення поставленої задачі вибору оптимального варіанту зовнішніх енергоефективних стінових оболонок.

2. Цілком зрозуміло, що досі в світі немає універсального математичного апарату щодо об’єктивного оцінювання при вирішенні багатокритеріальних задач. Поряд з цим, найбільш ймовірним коректним рішенням у задачі багатокритеріального аналізу буде те, яке буде враховувати економічні, теплофізичні, кліматичні фактори впливу, тощо, при чому це рішення має бути несуперечливим, мати високий ступінь кореляції при опрацюванні різними методами багатокритеріального аналізу.

3. Вибір інструментарію, для виконання багатокритеріального аналізу оцінювання слід обирати від компетенції особи, що приймає рішення, повноти вхідної інформації, розуміння причинно-наслідкових зв’язків між параметрами, що беруться до уваги. В даній магістерській кваліфікаційній роботі це виконано з використанням за допомогою використання адитивної згортки критеріїв з урахуванням ваги параметрів за методом аналізу ієрархій [60], отримання комплексної оцінки теплотехнічного потенціалу стінових конструкцій будівель за методом сірого реляційного аналізу GRA [63] та методу, що засновано на латентних змінних [31].

4. Окрім низки теплотехнічних, фізико-механічних, кліматичних та економічних показників, що слід враховувати для комплексної оцінки теплотехнічного



потенціалу для зведення нових енергоефективних стін, слід також враховувати нестабільність теплотехнічних характеристик, що можуть призвести до відмови теплотехнічних характеристик зовнішніх стінових оболонок [33] а також об'єктивну низку факторів, що виникають на різних фазах життєвого циклу енергозберігаючого проекту [118]116, що вносять корективи при реалізації проектів термомодернізації існуючої забудови. Результатом управління цими факторами повинні бути максимізація позитивних і мінімізація негативних наслідків настання ризикових подій, які є невідомою складовою будь-якого взагалі, та вітчизняного будівельного сектору зокрема.

5. Енергомодельовання потреб будівлі (BEM) – творчий та комплексний процес, що демонструє функціонування будівлі протягом року на рівні параметрів, що описують процеси споживання енергії. При чому при енергомодельованні необхідно проводити комплексні розрахунки, при яких враховуються всі зв'язки між елементами будівлі і споживачами енергії в актуальних умовах експлуатації.

6. Інтеграція математичних моделей BEM, які можуть описувати будівельну фізику, може допомогти в успішному контролі енергоефективності будівництва з урахуванням динамічно змінюваних параметрів як клімату, так і інвестиційної чипроєктної частини документації.

7. Для аналізу енергомодельовання будівель наявний великий спектр програмних продуктів, вони різняться за вартістю та доступністю, побудовані для різних операційних систем.

8. На ринку програмних продуктів для ефективного енергомодельовання присутня велика кількість як безкоштовних так і комерційних варіантів. Найбільш поширеними серед безкоштовних є EnergyPlus, серед комерційних – TRNSYS, eQUEST, PHPP, EcoDesigner STAR та інші;

## **3 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ТЕПЛОТЕХНІЧНОЇ ОЦІНКИ ЗОВНІШНІХ СТІНОВИХ ОБОЛОНОК**

### **3.1 Характеристики матеріалів для чисельного моделювання**

Проведений аналіз джерел, в яких увага зфокусована проектуванню стінових енергоефективних конструкцій, не є вичерпним. Варто відмітити напрацювання вітчизняних авторів [4, 5, 10, 11, 14, 17, 26, 27, 38, 42], серед робіт закордонних науковців це роботи [1, 2, 9, 12, 13, 15, 22, 24, 34, 37, 45, 47, 50]. Проведений аналіз дозволив звести кількість матеріалів, що на думку автора є енергоефективними та перспективними у рамках їх використання у стінових оболонках, для проведення подальшого чисельного моделювання, до наступних:

- 1) стіна з арболіту (тип «А»);
- 2) стіна з землєбиту (тип «Б»);
- 3) стіна з солом'яних панелей (тип «В»);
- 4) стіна із цегли+утеплювач (тип «Г»);
- 5) стіна з саману (тип «Д»);
- б) Каркасна панель з ековатою (тип «Е»);

Прийнята ширина всіх досліджуваних типів стін, окрім цегляної з утеплювачем, становить 600 мм з міркувань максимізації теплової інерції та питань несучої здатності. Фізико-механічні та теплотехнічні характеристики матеріалів обчислено за довідковими даними джерел [13, 36, 44, 713], а також даних з інтернет-мережі [56, 58]. Для визначення критеріального числа Савіна ціну матеріалів взято усередненою по цінам в Україні станом на кінець 2021 року.

Поперечні перерізи стін, що аналізуються в роботі, наведено на рис. 3.1.

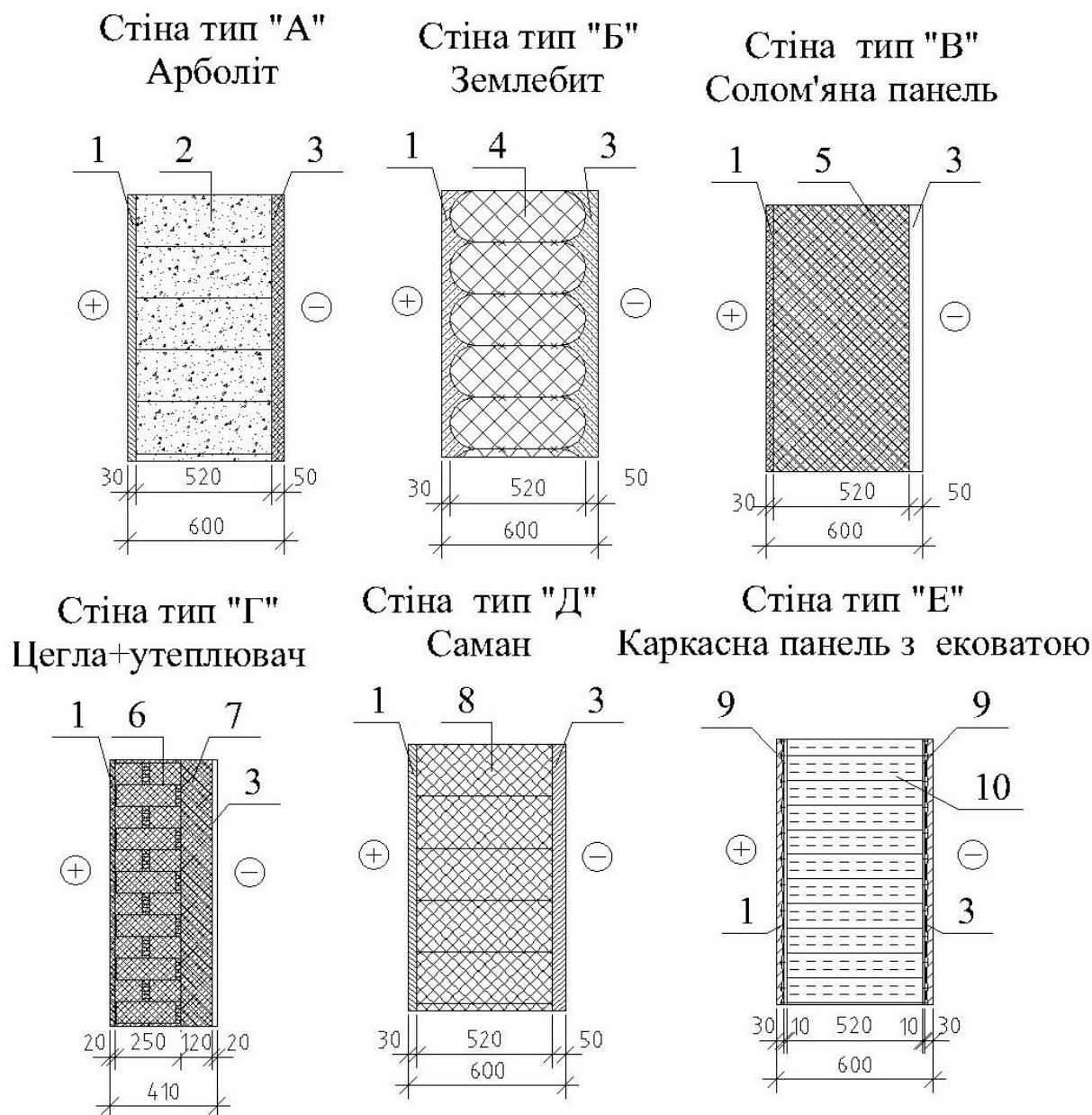


Рисунок 3.1 – Поперечний переріз багатошарових конструкцій стін (1- внутрішня вапняно-піщана штукатурка; 2-арболітовий блок; 3-зовнішня вапняно-піщана штукатурка; 4-щільно утрямбований ґрунт; 5- панель зі спресованої соломи; 6- кладка з керамічної цегли; 7 -утеплювач (мінеральна вата); 8 - саманний блок; 9 - фанера; 10 - екофібра (ековата).

Основні розрахункові характеристики матеріалів для запропонованих зовнішніх стінових оболонок (рис. 3.1), представлено у табл. 3.1-3.8.

Таблиця 3.1 – Теплофізичні характеристики та вартість матеріалів

Будівельний матеріал для стін	Питома теплоємність $c_i$ , Дж/кг*К	Теплопровідність $\lambda_i$ , Вт/м*К	Густина $\rho_i$ , кг/м <sup>3</sup>	Усереднена вартість* матеріалу $Q_i$ , грн/м <sup>3</sup>
Костробетон	1700	0.065	350	2500
Солом'яна панель	1675	0.07	80	2520
Саман	880	0.4	1400	625
Кам'яна кладка	880	0.58	1300	1037
Землебит	837	1.05	1800	600
Фанера	2400	0.18	600	10800
Екофібра	1880	0.06	55	1500
Посічена солома	1675	0.06	60	300
Вапняно-піщана штукатурка	840	0.81	1600	1200

Таблиця 3.2 – Основні характеристики шарів стіни типу «А»

Стіна тип «А» (Арболіт)									
Конструктивний шар стіни	Питома теплоємність матеріалу шара $c_i$ ,	Товщина шару $\delta_i$ , (м)	Густина шару $\rho_i$ , (кг/м <sup>3</sup> )	Вартість матеріалу стіни при заданій	Теплопровідність	Коеф. Теплозасвоєння шару $s_i$ , (Вт/м <sup>2</sup> *К)	Термічний опір $i$ -того шару	U-value, (Вт/м <sup>2</sup> *К)	Показник теплової інерції шару, $Di= Ri * si$
Вапняно-піщана штукатурка	840.00	0.03	1600.00	30.00	0.81	8.90	0.04	0.149	0.33
Арболіт	1700.00	0.25	350.00	712.50	0.08	1.86	3.13		5.81
Арболіт	1700.00	0.25	350.00	712.50	0.08	1.86	3.13		5.81
Арболіт	1700.00	0.02	350.00	57.00	0.08	1.86	0.25		0.47
Вапняно-піщана штукатурка	840.00	0.05	1600.00	50.00	0.81	8.90	0.06		0.55
	Всього	0.6	Всього	1562.00		Всього	6.70		12.97

Таблиця 3.3 – Основні характеристики шарів стіни типу «Б»

Стіна тип «Б» (Землебит)									
Конструктивний шар стіни	Питома теплоємність матеріалу шара $c_i$ ,	Товщина шару $\delta_i$ , (м)	Густина шару $\rho_i$ , (кг/м <sup>3</sup> )	Вартість матеріалу стіни при заданій товщині,	Теплопровідність шару $\lambda_i$ , (Вт/м*К)	Коеф. Теплозасвоєння	Термічний опір $i$ -того шару $R_i$ , (м <sup>2</sup> *К/Вт)	U-value, (Вт/м <sup>2</sup> *К)	Показник теплової інерції
Вапняно-піщана штукатурка	840.00	0.03	1600.00	30.00	48.00	0.81	8.90	0.04	0.33
Землебит	837.00	0.25	1800.00	150.00	450.00	1.05	10.73	0.24	2.55
Землебит	837.00	0.25	1800.00	150.00	450.00	1.05	10.73	0.24	2.55
Землебит	837.00	0.02	1800.00	12.00	36.00	1.05	10.73	0.02	0.20
Вапняно-піщана штукатурка	840.00	0.05	1600.00	50.00	80.00	0.81	8.90	0.06	0.55
	Всього	0.6	Всього	392.00	1064.00		Всього	0.75	6.19

Таблиця 3.4 – Основні характеристики шарів стіни типу «В»

Стіна тип «Б» (Солом'яна панель)									
Конструктивний шар стіни	Питома теплоємність матеріалу шара $c_i$ ,	Товщина шару $\delta_i$ , (м)	Густина шару $\rho_i$ , (кг/м <sup>3</sup> )	Вартість матеріалу стіни при заданій	Теплопровідність шару $\lambda_i$ , (Вт/м*К)	Коеф. Теплозасвоєння	Термічний опір $i$ -того шару $R_i$ , (м <sup>2</sup> *К/Вт)	U-value, (Вт/м <sup>2</sup> *К)	Показник теплової інерції шару, $Di=Ri*si$
Вапняно-піщана штукатурка	840.00	0.03	1600.00	30.00	48.00	0.81	8.90	0.04	0.33
Солом'яна панель	1675.00	0.25	160.00	1980.00	60.00	0.07	1.17	3.57	4.17
Солом'яна панель	1675.00	0.25	160.00	0.00	60.00	0.07	1.17	3.57	4.17
Солом'яна панель	1675.00	0.02	160.00	0.00	4.80	0.07	1.17	0.29	0.33
Вапняно-піщана штукатурка	840.00	0.05	1600.00	50.00	80.00	0.81	8.90	0.06	0.55
	Всього	0.6	Всього	2060.00	252.80		Всього	7.69	9.56

Таблиця 3.5 – Основні характеристики шарів стіни типу «Г»

Стіна тип «Г» (Цегляна кладка+утеплювач)									
Конструктивний шар стіни	Питома теплоємність	Товщина шару	Густина шару $\rho_i$ , (кг/м <sup>3</sup> )	Вартість матеріалу стіни	Теплопровідність шару $\lambda_i$ ,	Коеф. Теплозасвоєння	Термічний опір $i$ -того шару $R_i$	U-value, (Вт/м <sup>2</sup> *К)	Показник теплової інерції шару, $Di=Ri*si$
Вапняно-піщана штукатурка	840.00	0.02	1600.00	20.00	32.00	0.81	8.90	0.02	0.22
Кам'яна кладка	880.00	0.25	1300.00	259.25	325.00	0.58	6.95	0.43	2.99
Мінеральна вата	840.00	0.1	130.00	166.80	13.00	0.06	0.71	1.56	1.11
Мінеральна вата	840.00	0.1	130.00	166.80	13.00	0.06	0.71	1.56	1.11
Вапняно-піщана штукатурка	840.00	0.02	1600.00	20.00	32.00	0.81	8.90	0.02	0.22
	Всього	0.49	Всього	632.85	415.00		Всього	3.76	5.66

Таблиця 3.6 – Основні характеристики шарів стіни типу «Д»

Стіна тип «Д» (Саман)									
Конструктивний шар стіни	Питома теплоємність матеріалу шара $c_i$ ,	Товщина шару $\delta_i$ , (м)	Густина шару $\rho_i$ , (кг/м <sup>3</sup> )	Вартість матеріалу стіни при заданій товщині, грн/м <sup>2</sup>	Теплопровідність шару $\lambda_i$ , (Вт/м*К)	Коеф. Теплозасвоєння шару $si$ , (Вт/м <sup>2</sup> *К)	Термічний опір $i$ -того шару $Ri$ , (м <sup>2</sup> *К/Вт)	U-value, (Вт/м <sup>2</sup> *К)	Показник теплової інерції шару. $Di=Ri*si$
Вапняно-піщана штукатурка	840.00	0.05	1600.00	50.00	80.00	0.81	8.90	0.06	0.55
Саман	880.00	0.25	1400.00	600.00	350.00	0.40	5.99	0.63	3.74
Саман	880.00	0.25	1400.00	600.00	350.00	0.40	5.99	0.63	3.74
Саман	880.00	0.02	1400.00	48.00	28.00	0.40	5.99	0.05	0.30
Вапняно-піщана штукатурка	840.00	0.03	1600.00	30.00	48.00	0.81	8.90	0.04	0.33

	Всього	0.6	Всього	1328.00	856.00		Всього	1.56	8.66
--	--------	-----	--------	---------	--------	--	--------	------	------

Таблиця 3.7 – Основні характеристики шарів стіни типу «Е»

Стіна тип «Е» (Каркасна панель з ековатою)									
Конструктивний шар стіни	Питома теплоємність матеріалу шара $c_i$ ,	Товщина шару $\delta_i$ , (м)	Густина шару $\rho_i$ , (кг/м <sup>3</sup> )	Вартість матеріалу стіни при заданій товщині, грн/м <sup>2</sup>	Теплопровідність шару $\lambda_i$ , (Вт/м*К)	Коеф. Теплозасвоєння шару $s_i$ , (Вт/м <sup>2</sup> *К)	Термічний опір $i$ -того шару $R_i$ , (м <sup>2</sup> *К/Вт)	U-value, (Вт/м <sup>2</sup> *К)	Показник теплової інерції шару, $Di=Ri*s_i$
Вапняно-підсана штукатурка	840.00	0.03	1600.00	30.00	48.00	0.81	8.90	0.04	0.33
Фанера	2400.00	0.01	600.00	337.54	6.00	0.18	4.34	0.06	0.24
Ековата	1880.00	0.52	65.00	676.00	33.80	0.06	0.73	8.67	6.33
Фанера	2400.00	0.01	600.00	337.54	6.00	0.18	4.34	0.06	0.24
Вапняно-підсана штукатурка	840.00	0.03	1600.00	30.00	48.00	0.81	8.90	0.04	0.33
	Всього	0.6	Всього	1411.09	141.80		Всього	9.01	7.47

Сумарний термічний опір багатошарової зовнішньої стінової оболонки обчислено з врахуванням коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_6 = 8,7$  (Вт/м<sup>2</sup>К) для внутрішньої та  $\alpha_3 = 23,0$  (Вт/м<sup>2</sup>К) для зовнішньої поверхні стіни згідно ДСТУ Б В.2.6-189:2013 [44]

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{\alpha_6} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_{ip}} + \frac{1}{\alpha_3} \quad (3.1)$$

де  $\lambda_{ip}$  – теплопровідність  $i$ -того шару стіни в розрахункових умовах експлуатації (розрахункова теплопровідність), (м<sup>2</sup>К)/Вт.

Обчислення внутрішньої теплоємності поверхні  $\text{кДж/м}^2\text{К}$  а також коефіцієнту затухання  $f$  виконано за допомогою програми NTflux [35]

Фрагмент вікна калькулятора для розрахунку стіни «А» наведено на рис. 3.2-3.7.

layer name	thermal conductivity $\lambda$ [W/m.K]	gross density $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	spec. heat capacity C [J/kg.K]	layer thickness d [m]	R [m <sup>2</sup> K/W]
<b>Rsi (int. heat transfer resistance)</b>					<b>0.11494253</b>
Вапняно-піщана штукатур	0.810	1600.0	840	0.0300	0.037
Арболіт	0.065	350.0	1700	0.0600	0.923
Арболіт	0.065	350.0	1700	0.3000	4.615
Арболіт	0.065	350.0	1700	0.0600	0.923
Вапняно-піщана штукатур	0.810	1600.0	840	0.0500	0.062
<b>Rse (ext. heat transfer resistance)</b>					<b>0.04347826</b>
<i>U-value:</i>					<i>0.1488 W/m<sup>2</sup>K</i>
<i>total thickness:</i>					<i>0.500 m</i>

Рисунок 3.2 – Вікно входних параметрів стіни [3535]

<i>Calculation results according to EN ISO 13786:</i>	
external thermal admittance:	5.212 W/(m <sup>2</sup> K)
time shift external side:	3.91 h
internal thermal admittance:	3.316 W/(m <sup>2</sup> K)
time shift internal side:	3.28 h
periodic thermal transmittance:	0.001 W/(m <sup>2</sup> K)
time shift periodic thermal transmittance:	-5.66 h
external areal heat capacity:	71.683 kJ/(m <sup>2</sup> .K)
internal areal heat capacity:	45.605 kJ/(m <sup>2</sup> .K)
decrement factor f:	0.007



Рисунок 3.3 – Вікно результатів розрахунку параметрів нестационарного режиму за ISO 13786 [35]

Остаточна таблиця результатів для подальшого чисельного моделювання для пропонованих типів стін наведена у табл 3.9.

Таблиця 3.9 – Вихідні параметри для проведення моделювання для стін

Критерій Савіна $S_a$	Сумарна теплова інерція багатопарової стіни $\Sigma$ (год)	Коефіцієнт теплопередачі $u$ -value зовнішніх стінових оболонок, Вт/м <sup>2</sup> К	Коефіцієнт затухання, $f$	Внутрішня питома теплоємність, кДж/м <sup>2</sup> К	Показник теплової інерції $D$	
Стінова конструкція "А" (арболіт)	1.81	67.43	0.149	0.003	46.401	12.97
Стінова конструкція "Б" (землебит)	0.64	60.60	1.329	0.068	68.268	6.19
Стінова конструкція "В" (солом'яна панель)	2.18	146.99	0.130	0.027	43.258	9.56
Стінова конструкція "Г" (цегла+утеплювач)	1.73	54.73	0.266	0.117	60.737	5.66
Стінова конструкція "Д" (саман)	1.54	110.79	0.642	0.024	59.583	8.66
Стінова конструкція "Е" (каркасна панель+ековата)	1.24	80.41	0.111	0.106	49.735	7.47

За бажаний стан критеріїв прийнято мінімізацію першого, третього та четвертого критерію та максимізація решти.

Якщо проаналізувати дані табл. 3.9, проранжувавши для зручності дані функцією «РАНГ» у програмі Excel, то їх сприйняття буде дещо легшим, але не однозначним (1 – найкраща альтернатива, 6 – найгірша). У табл. 3.10 наведено результати ранжування.



Таблиця 3.10 – Ранжування результатів для стін

□	Критерій Са-віна $Sa$ □	Сумарна теплова інерція багатошарової стіни $\tau_i$ (год) □	Коефіцієнт теплопередачі $u$ -value зовнішніх стінових оболонки, Вт/м <sup>2</sup> К □	Коефіцієнт затухання, $f$ □	Внутрішня питома теплоємність, кДж/м <sup>2</sup> К □	Показник теплової інерції $D$ □
Стінова конструкція "А" □ (арболіт) □	5 □	4 □	3 □	1 □	5 □	1 □
Стінова конструкція "Б" □ (землебит) □	1 □	5 □	6 □	4 □	1 □	5 □
Стінова конструкція "В" □ (солон'яна панель) □	6 □	1 □	2 □	3 □	6 □	2 □
Стінова конструкція "Г" □ (цегла + утеплювач) □	4 □	6 □	4 □	6 □	2 □	6 □
Стінова конструкція "Д" □ (саман) □	3 □	2 □	5 □	2 □	3 □	3 □
Стінова конструкція "Е" □ (каркасна панель + ековата) □	2 □	3 □	1 □	5 □	4 □	4 □

Аналіз отриманих значень (табл. 3.10) свідчить, що неможливо сказати однозначно, яка з альтернатив є кращою по всім показникам – це є нетривіальною задачею. Тому тут слід вдатись до проведення багатокритеріального аналізу.

За проведеним аналізом методик у розділі 2, в даній роботі проведення подальшого розрахунку застосовано три методики – адитивна згортка з обчисленням ваг критеріїв методом аналізу ієрархій, сірого реляційного аналізу та латентних змінних.

### 3.2 Визначення теплотехнічного потенціалу методом адитивної згортки враховуючи ваги критеріїв за АНР [59]

Спочатку визначимо вагу критеріїв, використовуючи парні порівняння за методикою АНР. Результати наведено у табл. 3.11.



Таблиця 3.11 – Матриця порівнянь для визначення ваг критеріїв методом аналізу ієрархій

Критерій	Критерій Sa	Сумарна теплова інерція багатошарової стіни ти (год)	U-value, Вт/м <sup>2</sup> К	Decrement factor f	Internal area heat capacity	Показник теплової інерції D	Нормоване значення ваги критерію
Критерій Sa	1	3	4	3	3	3	0.381
Сумарна теплова інерція багатошарової стіни ти (год)	1/3	1	2	2	2	2	0.192
U-value, Вт/м <sup>2</sup> К	1/4	1/2	1	1	1	1	0.103
Decrement factor f	1/3	1/2	1	1	1	1	0.108
Internal area heat capacity	1/3	1/2	1	1	1	1	0.108
Показник теплової інерції D	1/3	1/2	1	1	1	1	0.108
λmax	6.014						
IY(C.I.)	0.070						
OY(C.R.)	0.057						

Оскільки отримана оцінка узгодженості (OY) є в межах 10%, то можна зробити висновок, що матриця порівнянь не є суперечливою та містить узгоджену оцінку критеріїв [60].

**Крок 1.** Визначаємо величину комплексного показника теплотехнічного потенціалу багатошарових стінових конструкцій за методом адитивної згортки, нормуючи показники критеріїв за формулами (2.8.) (2.9). Результати розрахунків наведено у табл. 3.12.

Таблиця 3.12 – Нормовані значення критеріїв порівняння

	Критерій Sa	Сумарна теплова інерція багатошарової стіни ти (год)	U-value, Вт/м <sup>2</sup> К	Decrement factor f	Internal area heat capacity KJ/m <sup>2</sup> К	Показник теплової інерції D
Стінова конструкція "А" (арболіт)	0.239	0.138	0.968	1.000	0.126	1.000
Стінова конструкція "Б" (землебит)	1.000	0.064	0.000	0.429	1.000	0.072
Стінова конструкція "В" (солом'яна панель)	0.000	1.000	0.984	0.787	0.000	0.533
Стінова конструкція "Г" (цегла +утеплювач)	0.294	0.000	0.873	0.000	0.699	0.000
Стінова конструкція "Д" (саман)	0.415	0.608	0.564	0.814	0.653	0.410
Стінова конструкція "Е" (каркасна панель+ековата)	0.607	0.278	1.000	0.100	0.259	0.247

Після цього, виконуємо операцію адитивної згортки для кожного типу стіни використовуючи формулу (2.6). Для порівняння виконуємо адитивну згортку без урахування ваг критеріїв. Графічна інтерпретація проведеного розрахунку наведено на рис. 3.4. Аналіз отриманих результатів (рис. 3.4) свідчить про те, що найкращими з точки зору обраних критеріїв порівняння в контексті оцінювання теплотехнічного потенціалу багат шарових зовнішніх стінових оболонок виявились варіанти стін типу «Саман» – 0,200 та «Землебит» – 0,194. Майже вдвічі менші показники мають варіант стіни з цегли – 0,102. Очевидно це можна пояснити різнорозмірним за своїми показниками врахуванням критеріїв оцінювання. Варто також відзначити, що наведені порівняння (ри. 3.4) демонструють кореляцію між результатами, а саме 0,696, тобто можна сказати що існує зв'язок між оцінками, виконаними методом адитивної згортки критеріїв з використанням АНР з отриманими даними без урахування ваг критеріїв.

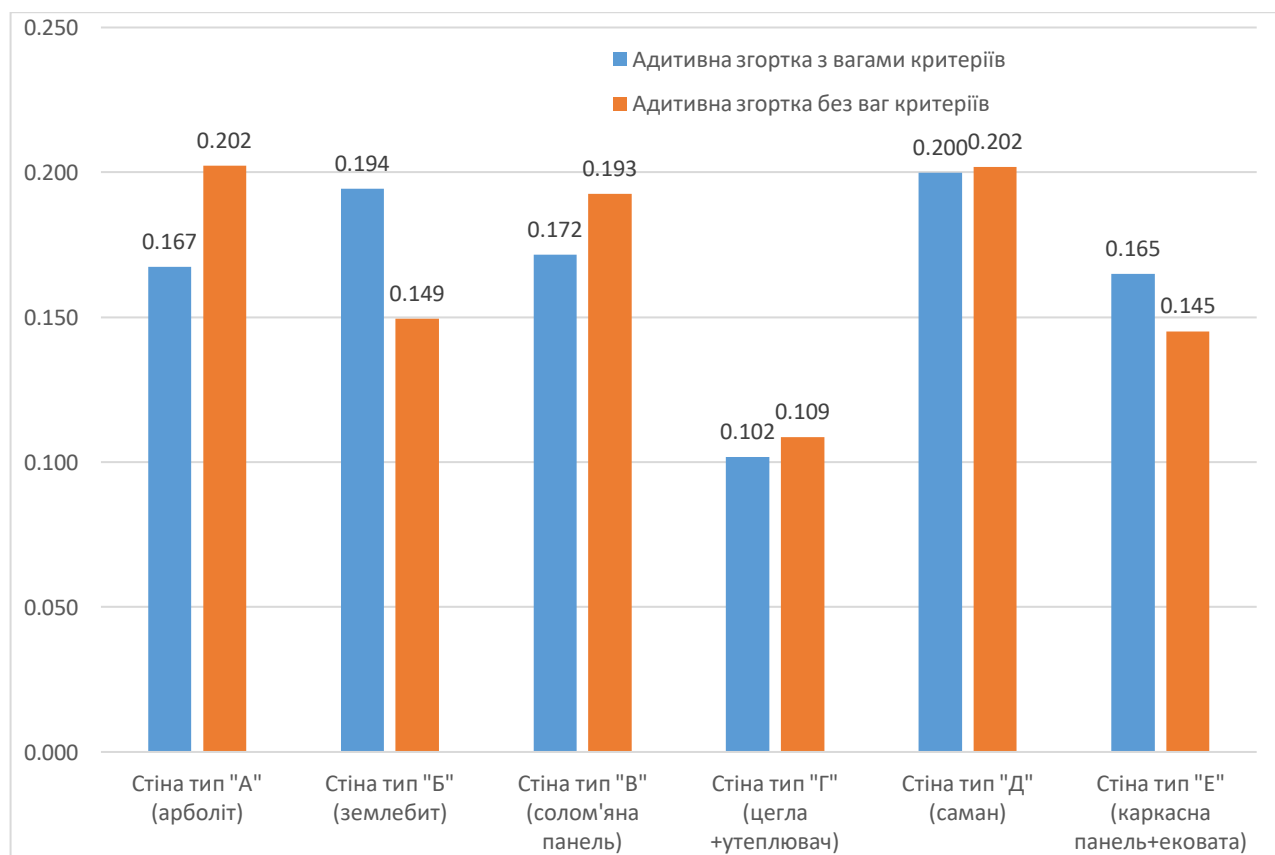


Рисунок 3.4 – Оцінка комплексного показника теплотехнічного потенціалу методом адитивної згортки враховуючи вагу критеріїв та без цього врахування

### 3.3 Визначення комплексної оцінки за методикою сірого реляційного аналізу (GRA) [63] та методу латентної змінної [31]

Визначаємо показники для оцінювання згідно математичного апарату, описаного у формулах (2.8)-(2.12). Вихідними даними для оцінювання стінових конструкцій будівель при тому, що враховано їх теплотехнічного потенціалу методом сірого реляційного аналізу є дані. табл. 3.9. Результати наведено у табл. 3.13.

Таблиця 3.13 – Значення реляційних коефіцієнтів та нормовані значення для порівняння методом сірого реляційного аналізу

	Критерій $Sa$	Сумарна теплова інерція багат шарової стіни ти (год)	$U$ -value, Вт/м <sup>2</sup> К	Decrement factor $f$	Internal area heat capacity KJ/m <sup>2</sup> К	Показник теплової інерції $D$	Нормалізовані значення комплексної оцінки
Стінова конструкція "А" (арболіт)	0.397	0.367	0.941	1.000	0.364	1.000	0.196
Стінова конструкція "Б"(землебит)	1.000	0.348	0.333	0.467	1.000	0.350	0.169
Стінова конструкція "В"(солон'яна панель)	0.333	1.000	0.970	0.701	0.333	0.517	0.186
Стінова конструкція "Г" (цегла +утеплювач)	0.415	0.333	0.797	0.333	0.624	0.333	0.137
Стінова конструкція "Д" (саман)	0.461	0.560	0.534	0.729	0.590	0.459	0.161
Стінова конструкція "Е" (каркасна панель+ековата)	0.560	0.409	1.000	0.357	0.403	0.399	0.151

Для графічного віддзеркалення результатів за методом GRA використовуємомог гістограму. Графічне зображення результатів аналізу наведено на рис. 3.5.

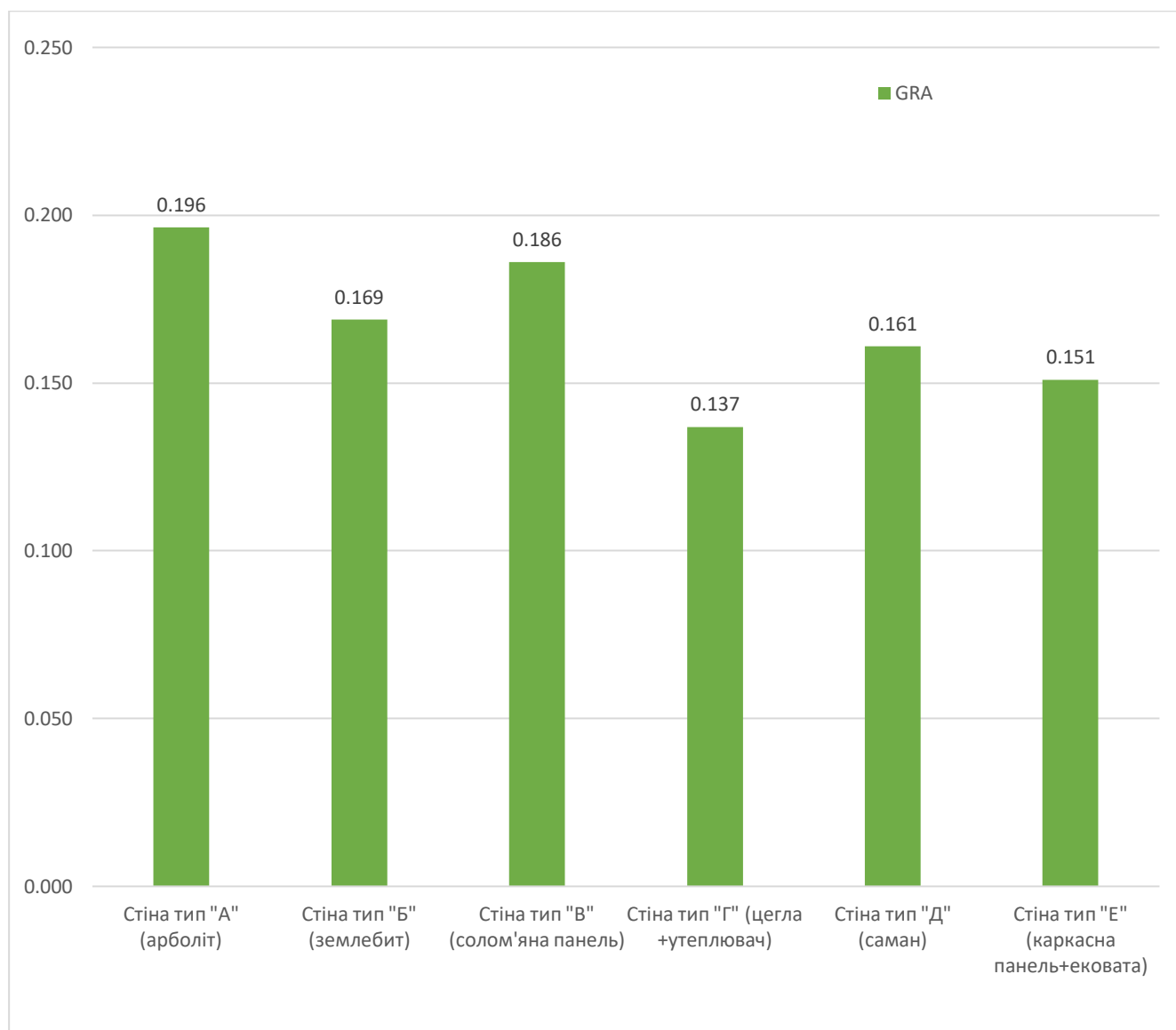


Рисунок 3.5 – Комплексна оцінка конструкцій стін будівель враховуючи їх теплотехнічного потенціалу GRA

Аналіз рис. 3.5 показав, що всі альтернативи мають один порядок оцінки, однак можна виділити кращу альтернативу – стіну типу арболіт з оцінкою 0,196, солом'яну панель - 0,186 та землебит - 0,161.

Визначення комплексної оцінки зовнішніх стінових оболонок враховуючи їх теплотехнічний потенціал за методом латентної змінної згідно формул (2.8) (2.9) та (2.13), (2.14) за оптимізаційним пошуком рішень за пакетом «Пошук рішень» у програмі Excel дозволило отримати результати, що представлено на рис. 3.6.



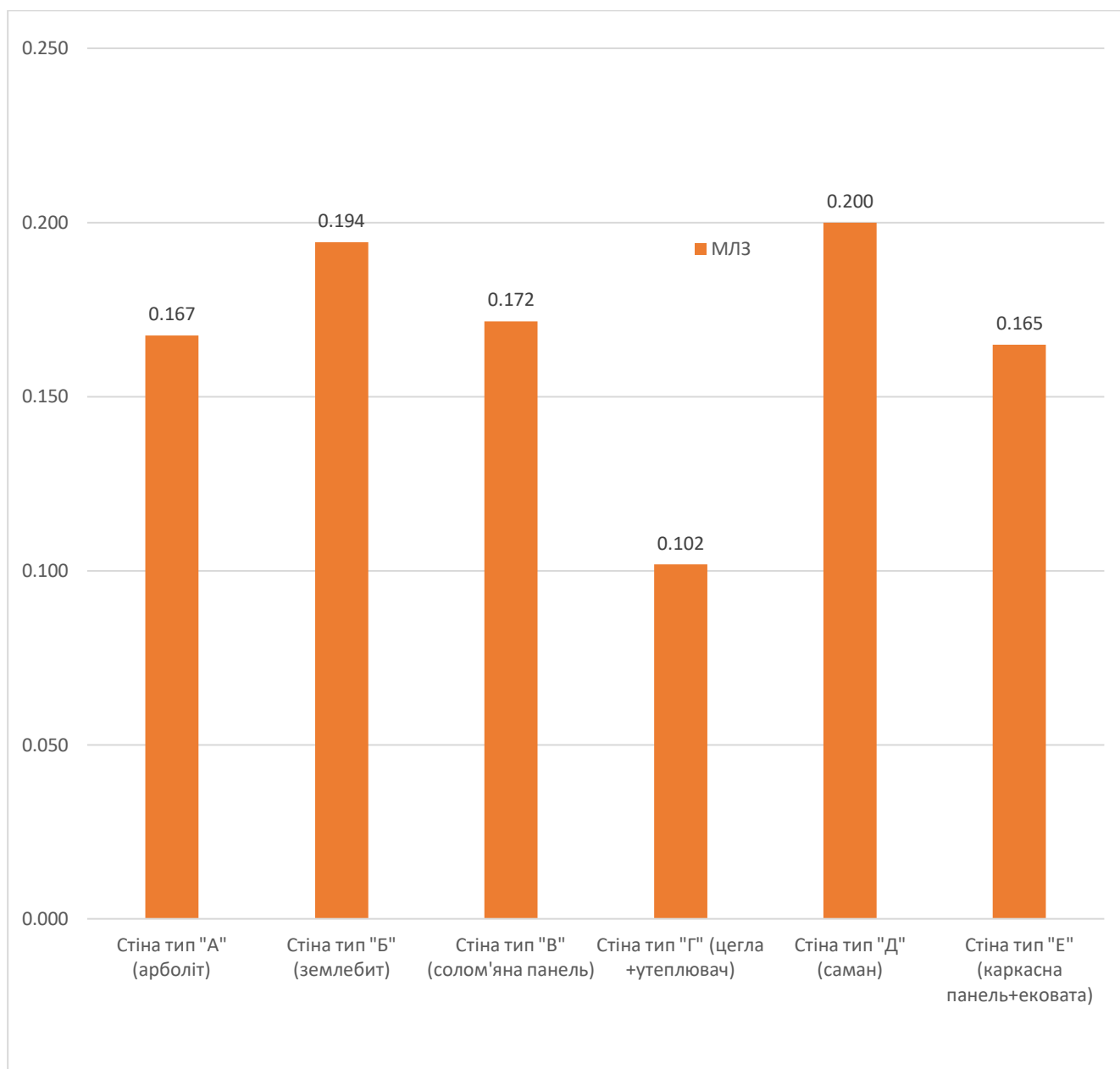


Рисунок 3.6 – Результати визначення комплексної оцінки стінових конструкцій будівель враховуючи їх теплотехнічний потенціал за методом латентних змінних. Аналіз рис. 3.6 показав, що найкращим, в контексті даного методу аналізу виявився варіант стіни з саману (0,200) та землебиту (0,192). Найгіршим варіантом виявився варіант з традиційної системи цегляна стіна+ утеплювач, з мінімальною оцінкою 0,102.

Найбільший інтерес представляє порівняння отриманих результатів за всіма методиками на одній шкалі значень. Оскільки всі попередні результати є нормованими, то їх порівняння на одному графіку буде коректним, відповідно до їх величин (рис. 3.6). Також, для додаткового аналізу результатів сумарну кількісну

оцінку представлено у вигляді гістограм ранжування, де 1 – найгірша оцінка, 6 – найкраща (рис. 3.7).

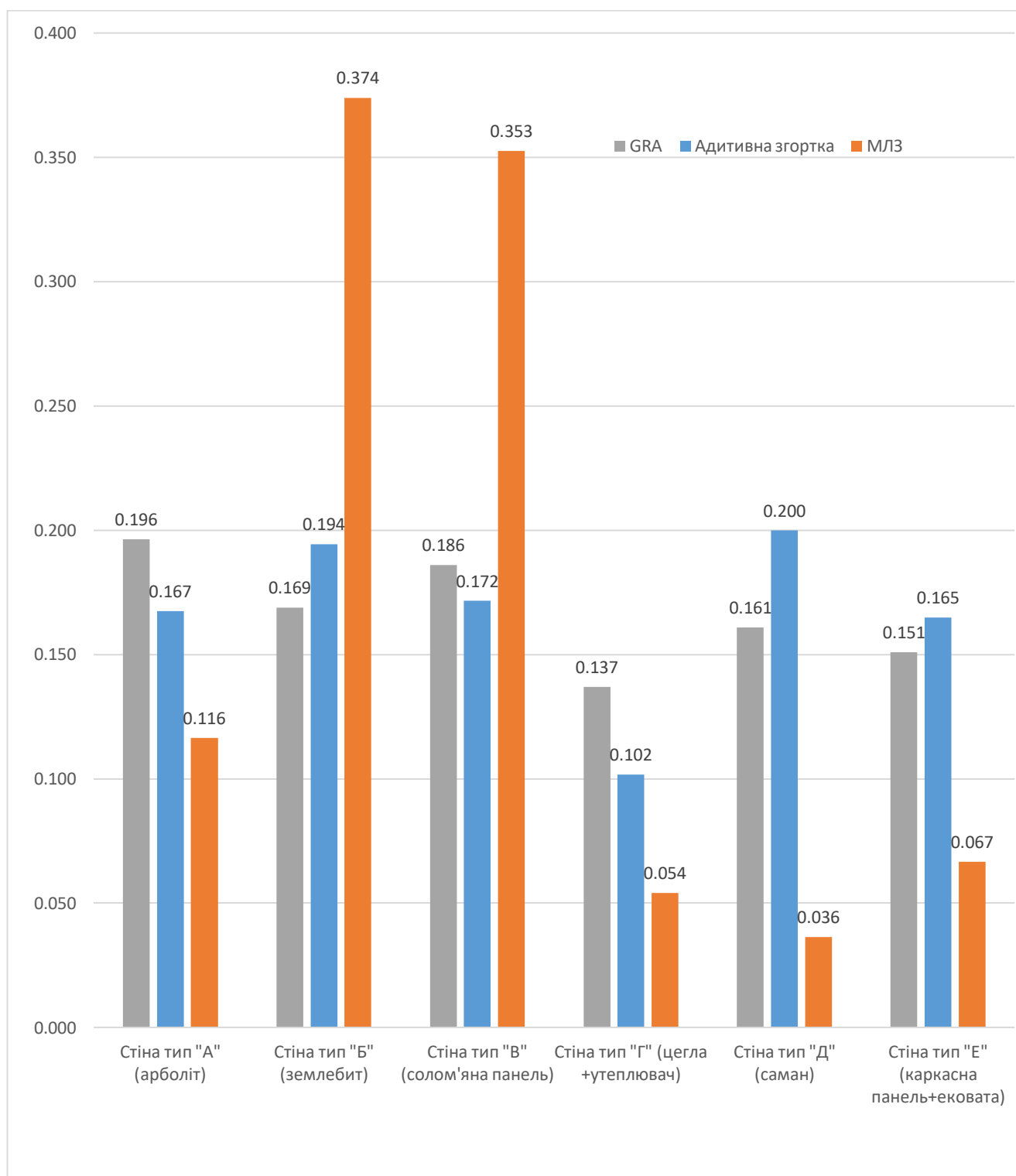


Рисунок 3.7 – Порівняння потенціалу енергоефективності стін за методиками адитивної згортки, сірого реляційного аналізу та методу латентної змінної

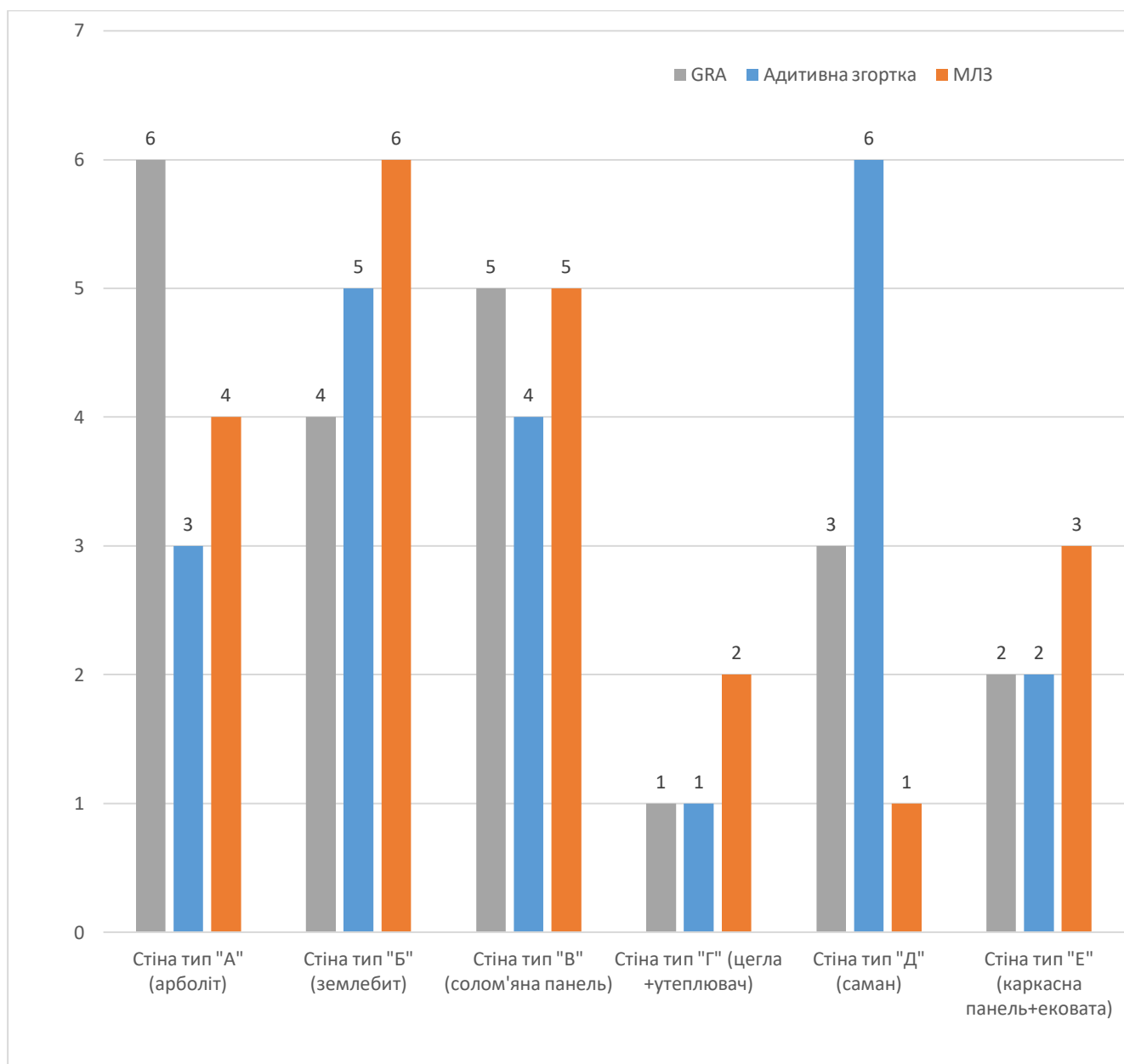


Рисунок 3.8 – Ранжування отриманих результатів за методиками адитивної згортки, сірого реляційного аналізу та методу латентної змінної

Аналіз результатів, (рис. 3.7, рис. 3.8) чітко сигналізує про те, що існує розбіжність та неоднозначність результатів оцінювання за наведеними методиками. Також можна побачити, що не виявлено явного «фаворита» за типом стіни, який був би кращим варіантом за всіма трьома різними способами порівняння. Так, за всіма методиками одною з кращих варіантів стін виявилась стіна із землебиту (вищий ранг за методом латентних змінних – 6 та високі ранги за іншими методами 4 ,5 відповідно. Гіршою за всіма методиками в контексті критеріїв порівняння та

методик, що використані у дослідженні виявилась стіна з цегли+утеплювач (найнижчі оцінки).

Варто, відмітити, що отриманий результат потребує більш детального аналізу з можливою додатковою інформацією, оскільки тут важко зробити однозначний вибір. Зрозуміло лише те, що три перших альтернативи стін будуть кращими від трьох останніх за результати (рис. 3.7, рис. 3.8).

Підсумовуючи вищесказане, слід сказати, що проблема вибору оптимальної багатошарової стінової оболонки для конкретного спектру критеріїв виявляється нетривіальною задачею, основна складність якої, на думку автора полягає у наявності чіткого та зрозумілого математичного інструменту, яким був би в одночас простим та прозорим в контексті перетворень вхідних даних, щодо вирішуваних задач та інтерпретації отриманих результатів.

### Висновки по розділу 3

Проведене чисельне моделювання та його аналіз при визначенні комплексної оцінки стінових конструкцій будівель з врахуванням їх теплотехнічного потенціалу за різними методиками багатокритеріального аналізу дозволив зробити наступні висновки:

1. В реальних задачах, які необхідно вирішувати, як правило критеріїв завжди більше одного, тому остаточний вибір є компромісним між декількома альтернативами.
2. Наведені в розділі показники, за якими виконується порівняння альтернатив є простими в аналітичному обчисленні та змістовними, а саме – коефіцієнт затухання, внутрішня питома теплоємність стін, коефіцієнт теплопровідності, показник теплової інерції стіни  $D$ , час теплової інерції та критеріальне число Савіна.
3. За методом оцінювання адитивною згорткою з використанням методу аналізу ієрархій у якості інструментарію для визначення вагових коефіцієнтів оцінюваних показників виявлено, що найкращими варіантами є стіна з саману(оцінка 0,200), та стіна з землебиту (0,192). Найгіршим варіантом багатошарової стінової оболонки

виявився варіант з цегли+утеплювач (0,102). При чому, оцінювання адитивною згортою без урахування вагових коефіцієнтів показало ступінь кореляційного зв'язку – 0,696 з методом адитивної згортки.

4. За методом сірого реляційного аналізу найкращими типами стін є стіна з арболіту (оцінка 0,196), стіна з солом'яної панелі (0,186). Нанижчу оцінку отримав варіант стіни з керамічної цегли+утеплювач (0,137).

5. При проведенні оцінювання за методом латентної змінної кращою є стіна з землєбиту (0,374) та солом'яної панелі (0,353). При цьому, найгіршим виявилась стінова конструкція стіни з саману – 0,036.

6. Виконане порівняння результатів розрахунків комплексної оцінки з урахуванням теплотехнічних показників стін проведене за запропонованими методиками свідчить проте, що єдиної альтернативи, яка була б кращою за всіма методиками немає. Але варт відмітити, що стіни з арболіту, солом'яної панелі та землєбиту в цьому сенсі виграють у решти варіантів – саману, цегли+утеплювача та комплексної панелі.

#### **4 ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ БАГАТОШАРОВИХ КОНСТРУКЦІЙ З УРАХУВАННЯМ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ЇХ ТЕПЛОТЕХНІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ**

Виконаємо техніко-економічне порівняння різних конструктивних варіантів стін : 1 варіант – солом'яна панель; 2 варіант – землебіт, 3 варіант – каркасна панель з ековатою.

Для визначення кошторисної вартості розробляємо локальні кошторисні документи за допомогою програмного комплексу АВК за кожним з варіантів (табл.4.1, 4.2, 4.3).

Вони розроблялися на основі:

ресурсних елементних кошторисних норм на будівельні роботи (РЕКН, ДБН Д.2.2 - 99); збірника єдиних середніх кошторисних цін на матеріали, вироби та конструкції загально виробничі витрати розраховані відповідно до усереднених показників додатка 3 до ДСТУ Б Д.1.1 – 1 – 2013.

Кошторисна вартість влаштування конструкцій враховує трудовитрати та заробітна плата будівельників та машиністів, кількість та вартість матеріальних ресурсів, експлуатації будівельних машин та механізмів. Кошторисна вартість влаштування конструкцій визначається як сума прямих та загальновиробничих витрат.

Прямі витрати ( ПВ) враховують в своєму складі заробітну плату робочих, вартість експлуатації будівельних машин та механізмів, вартість матеріалів, виробів та конструкцій.

Загальновиробничі витрати ( ЗВВ ) – це витрати будівельно-монтажної організації, які входять у виробничу собівартість будівельно-монтажних робіт. Усі затрати, які відносяться до ЗВВ, згруповані в три групи.

**Таблиця 4.1 - Локальний кошторис на будівельні роботи № 1**  
**1 варіант – солом'яна панель**

Основа:  
креслення (специфікації) №

Кошторисна вартість 105,109 тис. грн.  
 Кошторисна трудомісткість 2,195 тис.люд.-год.  
 Кошторисна заробітна плата 48,329 тис. грн.  
 Середній розряд робіт 4,1 розряд

Складений в поточних цінах станом на "4 жовтня" 2021 р.

N п /п	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.- год.	
					Всього	експлуатації машин	Всього	заробіт- ної плати	експлуатації машин	не зайнятих обслуговуванням машин	
										заробіт- ної плати	в тому числі за- робітної плати
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ЕН15-36-1	Поліпшене штукатурення піщано-вапняним розчином стін механізованим способом	100м2	2,32	<u>2681,28</u> 1708,33	<u>73,61</u> 53,82	6221	3963	<u>171</u> 125	<u>77,23</u> 3,7044	<u>179,17</u> 8,59
2	Е8-20-3	Мурування зовнішніх із солом'яних панелей керамічної при висоті поверху до 4 м	м3	100	<u>596,70</u> 296,59	<u>91,86</u> 29,67	59670	29659	<u>9186</u> 2967	<u>14,01</u> 1,6791	<u>1401</u> 167,91
3	ЕН15-46-5	Поліпшене штукатурення цементно-вапняним розчином стін механізованим способом	100м2	2,32	<u>3172,72</u> 1801,47	<u>108,17</u> 88,48	7361	4179	<u>251</u> 205	<u>86,36</u> 6,0883	<u>200,36</u> 14,12
		Разом прямі витрати по кошторису					73252	37801	<u>9608</u> 3297		<u>1780,53</u> 190,62
		Разом будівельні роботи, грн.					73252				

	в тому числі:			
	вартість матеріалів, виробів та конструкцій, грн.	25843		
	всього заробітна плата, грн.	41098		



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Загальновиробничі витрати, грн. трудоємність в загальновиробничих витратах, люд.год. заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн. <b>Всього будівельні роботи, грн.</b>					31857 223,66 7231 <b>105109</b>				
		----- <b>Всього по кошторису</b>					<b>105109</b>				
		<b>Кошторисна трудоємність, люд.год.</b> <b>Кошторисна заробітна плата, грн.</b>					<b>2195</b> <b>48329</b>				

Склав

\_\_\_\_\_  
[посада, підпис ( ініціали, прізвище )]

Перевірив

\_\_\_\_\_  
[посада, підпис ( ініціали, прізвище )]

**Таблиця 4.2 - Локальний кошторис на будівельні роботи № 2**  
2 варіант – землебіт

Основа:  
креслення (специфікації ) №

Кошторисна вартість 75,148 тис. грн.  
Кошторисна трудомісткість 1,614 тис.люд.-год.  
Кошторисна заробітна плата 35,513 тис. грн.  
Середній розряд робіт 4,1 розряд

Складений в поточних цінах станом на "4 жовтня" 2021 р.

N п /п	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.- год.	
					Всього	експлуатації машин	Всього	заробітної плати	експлуатації машин	не зайнятих обслуговуванням машин	
										тих, що обслуговують машини	
заробітної плати	в тому числі заробітної плати			в тому числі заробітної плати	на одиницю	всього					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1 5	ЕН15-46-	Поліпшене штукатурення цементно-вапняним розчином по каменю і бетону стін механізованим способом в середині приміщення	100м2	2,32	<u>3172,72</u> 1801,47	<u>108,17</u> 88,48	7361	4179	<u>251</u> 205	<u>86,36</u> 6,0883	<u>200,36</u> 14,12
2	Е8-20-8	Мурування стін із щільноутрамбованого ґрунту	м3	100	<u>383,01</u> 198,79	<u>60,61</u> 19,44	38301	19879	<u>6061</u> 1944	<u>9,39</u> 1,1121	<u>939</u> 111,21
3 1	ЕН15-36-	Поліпшене штукатурення цементно-вапняним розчином по каменю зовнішніх стін механізованим способом	100м2	2,32	<u>2681,28</u> 1708,33	<u>73,61</u> 53,82	6221	3963	<u>171</u> 125	<u>77,23</u> 3,7044	<u>179,17</u> 8,59
Разом прямі витрати по кошторису							51883	28021	<u>6483</u> 2274		<u>1318,5</u> 3 133,92

	Разом будівельні роботи, грн.	51883			
	в тому числі:				
	вартість матеріалів, виробів та конструкцій, грн.	17379			
	всього заробітна плата, грн.	30295			

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Загальнови­роб­ни­чі витрати, грн.					23265				
		трудо­мі­ст­кість в загально­ви­роб­ни­чих витратах, люд.год.					161,42				
		заробітна плата в загально­ви­роб­ни­чих витратах, грн.					5218				
		<b>Всього будівельні роботи, грн.</b>					<b>75148</b>				
		-----									
		<b>Всього по кошторису</b>					<b>75148</b>				
		<b>Кошторисна трудо­мі­ст­кість, люд.год.</b>					<b>1614</b>				
		<b>Кошторисна заробітна плата, грн.</b>					<b>35513</b>				

Склав

\_\_\_\_\_

*[посада, підпис ( ініціали, прізвище )]*

Переві­рив

\_\_\_\_\_

*[посада, підпис ( ініціали, прізвище )]*

**Таблиця 4.3 - Локальний кошторис на будівельні роботи № 3**  
3 варіант – каркасна панель з ековатою

Основа:  
креслення (специфікації ) №

Кошторисна вартість 138,907 тис. грн.  
Кошторисна трудомісткість 2,673 тис.люд.-  
год.  
Кошторисна заробітна плата 58,277 тис. грн.  
Середній розряд робіт 4,0 розряд

Складений в поточних цінах станом на "4 жовтня" 2021 р.

N п /п	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.- год.	
					Всього	експлу а- тації машин	Всього	заробіт - ної плати	експлу а- тації машин	не зайнятих обслуговуванням машин	
										заробіт - ної плати	в тому числі за- робітно ї плати
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1 5	ЕН15-46-	Поліпшене штукатурення цементно- вапняним розчином по каменю і бетону стін механізованим способом в середині приміщення	100м2	2,32	<u>3172,72</u> 1801,47	<u>108,17</u> 88,48	7361	4179	<u>251</u> 205	<u>86,36</u> 6,0883	<u>200,36</u> 14,12
2 1	ЕН10-91-	Улаштування фанери	100м2	2,32	<u>9363,13</u> 3536,45	<u>92,47</u> 37,63	21722	8205	<u>215</u> 87	<u>182,01</u> 2,0007	<u>422,26</u> 4,64
3	Е8-20-3	Мурування зовнішніх стін із екофібри керамічної при висоті поверху до 4 м	м3	100	<u>649,16</u> 296,59	<u>91,86</u> 29,67	64916	29659	<u>9186</u> 2967	<u>14,01</u> 1,6791	<u>1401</u> 167,91
4 1	ЕН15-36-	Поліпшене штукатурення цементно- вапняним розчином по каменю зовнішніх стін механізованим способом	100м2	2,32	<u>2681,28</u> 1708,33	<u>73,61</u> 53,82	6221	3963	<u>171</u> 125	<u>77,23</u> 3,7044	<u>179,17</u> 8,59
		Разом прямі витрати по кошторису					100220	46006	<u>9823</u> 3384		<u>2202,7</u> 9

		Разом будівельні роботи, грн. в тому числі:	100220				195,26
--	--	--	--------	--	--	--	--------

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		вартість матеріалів, виробів та конструкцій, грн.					44391				
		всього заробітна плата, грн.					49390				
		Загальновиробничі витрати, грн.					38687				
		трудоємність в загальновиробничих витратах, люд.год.					274,89				
		заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн.					8887				
		<b>Всього будівельні роботи, грн.</b>					<b>138907</b>				
		-----									
		<b>Всього по кошторису</b>					<b>138907</b>				
		Кошторисна трудоємність, люд.год.					<b>2673</b>				
		Кошторисна заробітна плата, грн.					<b>58277</b>				

Склав

\_\_\_\_\_  
[посада, підпис ( ініціали, прізвище )]

Перевірив

\_\_\_\_\_  
[посада, підпис ( ініціали, прізвище )]

Результати порівняння варіантів стін наведені в таблиці 4.4

Всі вищенаведені показники, окрім первісної вартості і-тої машини та нормативної тривалості роботи машини за рік, узяті з локальних кошторисів. При порівнянні варіантів приймається той варіант, який має мінімальне значення приведених витрат.

$$P_i = C_i + E_n \cdot K_i \leq \min, \quad (4.1)$$

Величина  $C$  і  $K$  прирівнюються за допомогою нормативного коефіцієнта ефективності капітальних вкладень  $E_n$ , який є допустимим мінімумом зниження собівартості на одиницю додаткових капітальних вкладень, за якими вони визнаються ефективними.

Собівартість робіт визначається за формулою:

$$C = ПВ + ЗВВ, \quad (4.2)$$

де ПВ – прямі витрати, грн. Під прямими витратами розуміють витрати, пов'язані з виконанням будівельних робіт, які можна прямо та безпосередньо включити до собівартості конкретних будівельних робіт;

ЗВВ – кошторисна величина загальнопромислових витрат, грн.

ПВ та ЗВВ визначаємо із локального кошторису (таблиці 4.1 –4.2).

Капітальні вкладення у виробничі фонди:

$$K = K_{ОВФ} + K_{обігові\ кошти}, \quad (4.3)$$

де  $K_{ОВФ}$  – вартість основних виробничих фондів;

$$K_{обігові\ кошти} = C_{см} / K_{обор.} - \text{обігові кошти},$$

де  $C_{см}$  – кошторисна вартість (всього по кошторису), грн.;

$$K_{обор.} = 3-4.$$

Основні виробничі фонди визначаються за формулою:

$$K_{ОВФ} = \sum_{i=1}^n \frac{\Phi_i \cdot T_{i,об.}}{T_{i,річн.}}, \quad (4.4)$$

де  $\Phi_i$  – первісна вартість і-тої машини, грн. ( в даному випадку приймемо вартість експлуатації машин із кошторису);

$T_i$  – тривалість роботи і-тої машини на об'єкті, год.;



$T_{i, \text{рiчн.}}$  – нормативна тривалість роботи за рік, год.

Економічний ефект

$$E = П1 - П2$$

Таблиця 4.4 - Порівняння варіантів стін

Показники	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3
Прямі витрати, тис. грн.	73,252	51,883	100,22
Кошторисна трудомісткість, тис. люд.-год.	2,195	1,614	2,673
Кошторисна заробітна плата, тис. грн.	48,329	35,513	58,277
Загальновиробничі витрати, тис. грн.	31,857	23,265	38,687
Усього за кошторисом, тис. грн.	105,109	75,148	138,907
Кошторисний прибуток, грн.			
<b>Показники (обчислені)</b>			
Кошторисна величина ЗВВ, тис. грн.	31,857	23,265	38,687
Собівартість робіт (С), тис. грн.	105,11	75,15	138,91
Обігові кошти, тис. грн.	35,03633333	25,04933333	46,30233333
Основні виробничі фонди, тис. грн.	6,311	4,209	6,311
Капіталовкладення в виробничі фонди, тис. грн.	41,35	29,26	52,61
<b>Показник приведених витрат, тис. грн.</b>	<b>110,07</b>	<b>78,66</b>	<b>145,22</b>
<b>Економічний ефект, тис. грн.</b>		66,56	

#### Висновки

Складені локальні кошториси для кожного варіанту стін. Порівнюючи кожний варіант утеплення стін із таблиць 4.4 можна зробити висновок, що найбільш економічним є варіант 2 – землебіт. Кошторисна вартість становить – 75,15 тис. грн., кошторисна трудомісткість – 1,614 тис. грн., приведені витрати – 78,66 тис. грн. Економічний ефект від застосування цього варіанту 66,56 тис. грн.

## ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження з визначення багатокритеріального показника потенціалу енергоефективності багат шарових огорожувальних конструкцій стін. До основних результатів роботи можна віднести:

1. Енергоефективність будівлі – комплексне поняття, яке залежить від багатьох показників: теплофізичних, кліматичних, економічних, основними з яких є теплоємність, термоінерційність, теплостійкість, довговічність.

2. Проектування енергоефективних огорожувальних конструкцій будівлі неможливе без комплексного врахування ключових показників, які необхідно контролювати для літнього та зимнього періоду експлуатації стін, а саме коефіцієнт теплопередачі (*англ. u-value*, Вт/м<sup>2</sup>К), який є величиною, оберненою до загального термічного опору  $R_z$  стінового огороження, коефіцієнт затухання (*англ. decrement factor f*) та внутрішня питома теплоємність (*англ. the internal area heat capacity*, кДж / м<sup>2</sup>К).

3. Метою всіх розрахунків, що стосуються енергоефективності є, у тому числі, потенціальне зменшення негативного антропогенного навантаження від «вуглецевого сліду» при видобутку, транспортуванні, виготовленні та утилізації будівельного матеріалу з однієї сторони, та максимальне гармонічне використання натуральних матеріалів, що можуть бути гідною альтернативою сучасних, високотехнологічних та дорогих у всіх відношеннях конструкційно-ізоляційних матеріалів.

4. Об'єктивний аналіз при проектуванні енергоефективних огорожувальних конструкцій та прийняття рішень про вибір «найкращого варіанту» з поміж декількох порівнюваних можливий лише за залучення методів багатокритеріальної аналізу для оцінки альтернатив (MCDA).

5. Математичний апарат, що дозволяє виконати багатокритеріальне оцінювання необхідно обирати в залежності від повноти вихідних даних та ваги (пріоритету) критеріїв, що лежить в площині компетенції ОПР. В даній роботі це реалізовано за

допомогою використання методу аналізу ієрархій АНР, сірого реляційного аналізу GRA та методу, що засновано на теорії важливості критеріїв ТВК.

6. В якості критеріїв для проведення чисельного порівняння обрано теплофізичні показники які є ключовими для літнього та зимнього періоду експлуатації огорожувальних конструкцій – коефіцієнт затухання (*англ. decrement factor*)  $f$  та внутрішня питома теплоємність стіни,  $\text{кДж/м}^2\text{К}$  (*англ. the internal area heat capacity*), а також прямі (вартість матеріалу стіни,  $\text{грн/м}^2$ ) та непрямі (маса стіни,  $\text{кг/м}^2$ ) економічні показники, які можна легко обчислити для будь-якої багатошарової огорожувальної конструкції.

7. Найкраще дані результатів чисельного моделювання корелюються між методами GRA та ТВК (при рівноважних критеріях) – коефіцієнт кореляції 0,836, найгірше між методами АНР та ТВК – коефіцієнт кореляції -0,006.

8. Запропоновані критерії оцінки потенціалу енергоефективності можуть бути застосовані при прийнятті рішень щодо оцінки впливу економічних, теплофізичних, тощо.

9. Порівняння результатів розрахунків потенціалу енергоефективності за всіма методиками показало, що однозначної альтернативи, яка була б кращою за всіма методиками немає. Це можна пояснити різним математичним апаратом, що реалізований у наведених методиках.

10. Очевидно, що для остаточного та обґрунтованого вибору оптимального варіанту багатошарового огороження, є потреба у ітераційному перерахунку величини потенціалу енергоефективності за різними методиками до тих пір, поки похибка між оцінками потенціалу енергоефективності, що обчислена за різними методиками MCDA не буде перевищувати допустиму величину.

11. Економічний розрахунок, що виконано для трьох типів стін, які виявлено кращими у результаті багатокритеріального порівняння за декількома методиками MCDA, показав, що умовна стіна із землебіту об'ємом  $100 \text{ м}^3$  (Кошторисна вартість становить – 75,15 тис. грн.) за показником приведених витрат виявилась дешевшою на 66,56 тис. грн від стіни - каркасна панель з ековатою. землебіт.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий: монография. Москва: АВОК, 2012. 204 с.
2. Лапин Ю. Н. Автономные экологические дома. Москва: Алгоритм, 2005. 416 с.
3. Мацура А. А., Ермоленко Б. В. Разработка методов оптимального проектирования энергоэффективных домов. Успехи в химии и химической технологии. 2015. №8. ТОМ XXIX. С. 118–122.
4. Куліченко І. І. та ін. Економічна ефективність використання місцевих екологічних матеріалів в малоповерховому будівництві доступного житла. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. 2013. №.69. С.257-264.
5. Андрушків Б. Прикладні аспекти наукової діяльності кафедри або як здешевити індивідуальне житлове будівництво. Соціально-економічні проблеми і держава: електрон. наук. фахове вид. 2011. Вип. 2 (5). URL: <http://sepd.tntu.edu.ua/images/stories/pdf/2011/11abmizb.pdf> (дата звернення 27.12.2018).
6. Arce M. E. et al. The use of grey-based methods in multi-criteria decision analysis for the evaluation of sustainable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 47. P. 924-932. DOI: 10.1016/j.rser.2015.03.010.
7. ДСТУ-Н. Б. В. 2.6-190:2013. Настанова з розрахункової оцінки теплостійкості будівлі. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2014. 40 с.
8. Wang J. J. et al. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2009. Vol. 13, №. 9. P. 2263-2278. DOI: 10.1016/j.rser.2009.06.021.
9. Bojic M., Parvedy A. P., Boyer H. Optimization of thermal comfort in building through envelope design URL: <https://arxiv.org/abs/1302.5941> (дата звернення 14.10.2020).

10. Шарко О. В., Степанчиков Д. М. Використання апарату нечіткої логіки при виборі стратегії енергозберігаючих заходів у житлово-комунальному господарстві. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2015. №. 2. С. 346-352.
11. Менеїлюк О. І., Олійник Н. В., Черепашук Л. А. Багатокритерійний аналіз визначення найбільш ефективного рішення зведення огорожуючих конструкцій. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука" Галузь Технічні науки*. 2019. №7.
12. Gan W. et al. Energy-Saving Design of Building Envelope Based on Multiparameter Optimization *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. Vol. 2019. DOI: 10.1155/2019/5261869.
13. Stazi F. Thermal Inertia in Energy Efficient Building Envelopes. Butterworth-Heinemann, 2017. DOI: 10.1016/B978-0-12-813970-7.00001-7.
14. Фаренюк Г. П. Основи забезпечення енергоефективності будинків та теплової надійності огорожувальних конструкцій. Київ: Гамма-Принт, 2009. 137 с.
15. Сычев С. А. Экотехнологии строительства с учетом критериев энергоэффективных зданий. *SCIENCETIME*. 2014. №10. С.343–349.
16. Shimray B. A., Singh, K. M., Mehta, R. K. A survey of multi-criteria decision making technique used in renewable energy planning. *International Journal of Computer*. 2017. Vol. 4523. P. 124-140.
17. Biks Y., Ratushnyak G., Ratushnyak, O. Energy performance assessment of envelopes from organic materials. *Architecture Civil Engineering Environment*. 2019. № 3: P. 55-67. DOI: 0.21307/ACEE-2019-036.
18. Kheiri F. A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 92. P. 897-920. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.080
19. Wang J. J., Jing Y. Y., Zhang C. F., Zhang X. T., Shi G. H. Integrated evaluation of distributed triple-generation systems using improved grey incidence approach. *Energy*. 2008. Vol. 33. № 9. P. 1427-1437. DOI: 10.1016/j.energy.2008.04.008.

20. Hopfe C. J., Augenbroe G. L., Hensen J. L. Multi-criteria decision making under uncertainty in building performance assessment. *Building and environment*. 2013. № 69, P. 81-90. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.07.019.
21. ISO 13786:2017. Thermal performance of building components – Dynamic thermal characteristics – Calculation methods. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/65711.html> (дата звернення 20.09.2020).
22. Medgyasszay P. *Comparative analysis of an existing public building made from natural building materials and reference buildings designed from common building materials*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/335663459> Comparative analysis of an existing public building made from natural building materials and reference buildings designed from common building materials (Last accessed 03.11.2019).
23. Carabaño R. *Life Cycle Assessment (LCA) of building materials for the evaluation of building sustainability: the case of thermal insulation materials* URL: <https://www.researchgate.net/publication/316645292> Life Cycle Assessment LCA of building materials for the evaluation of building sustainability the case of thermal insulation materials (Last accessed 03.11.2019).
24. Brojan L., Petric A., Clouston Peggi L. *A comparative study of brick and strawbale wall systems from environmental, economical and energy perspectives*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2013.Vol.8, No.11.P.920–926.
25. Смирнова С. Н. Теоретическая модель энергоэффективного здания. Приволжский научный журнал. Серия: Архитектура. Дизайн.2009.№2.С.86–91.
26. Бікс Ю. С. Перспективи використання виробів з соломи у малоповерховому будівництві. Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві. 2017. Том 22, №1. С. 75-83.
27. Савицький М. В., Бабенко М. М. Показники енергоефективності екологічного малоповерхового будинку з місцевих матеріалів. Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения. 2014. №.77. С.168–172.

28. Шеина С. Г., Миненко Е. Н. Разработка алгоритма выбора энергоэффективных решений в строительстве. *Инженерный вестник Дона*. 2012. №4-1(22). С.133.
29. Biks Y., Ratushnyak G., Ratushnyak O., Ryapolov P. Application of ANP and GRA methods in energy efficiency potential's assessment of envelopes from natural materials. *Theory and building practice*. 2020. № 2. P. 48-62. DOI: [10.23939/jtbp2020.02.048](https://doi.org/10.23939/jtbp2020.02.048).
30. Бікс Ю. С., Ряполов П. С. Оцінка потенціалу енергоефективності огорожувальних конструкцій за допомогою методів MCDA. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2020/paper/viewFile/10844/9052> (дата звернення 24.11.2020).
31. Баркалов С.А., Глушкова А.Ю., Моисеев С.И. Математические методы многокритериального оценивания привлекательности проектов. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2020 Т. 20, № 1. С. 111–119.
32. Утеплення поліуретаном – освоюємо технологію за 12 кроків. URL: <https://upts.com.ua/uteplennja-poliuretanom-stin-budinku-i-inshih/> (дата звернення 07.12.2021).
33. Фаренюк Г. Г. Стани теплових відмов ізоляційної оболонки будинків та експериментальні методи їх визначення. *Реконструкція житла*. Вип. 9. 2008. с. 99 – 106.
34. S. Saboor, Babu T. P. A. Analytical computation of admittance, decrement factor, time lag and surface factors for different exterior wall materials of the buildings in Dakshina Kannada district. *ISHMT-ASME: Proceedings of the 22th National and 11th International Heat and Mass Transfer Conference, Kharagpur, India, December 28-31, 2013*. ІТ, 2013.
35. A brief guide and free tool for the calculation of the thermal mass of building components URL: <https://www.htflux.com/en/free-calculation-tool-for-thermal-mass-of-building-components-iso-13786/?orig=tool> (дата звернення 18.10.2020).

36. ДБН В.2.6-31:2016.Теплова ізоляція будівель. Норми проектування, виготовлення і монтажу: [Чинний від 2017-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінегіонбуд України, 2017. 33 с.
37. Смирнова С. Н. Принципы формирования архитектурных решений энергоэффективных жилых зданий: дис. ... канд. арх.: 18.00.02 / Нижний Новгород, 2009. – 320 с.
38. Коршунов О. В., Зуев В. И. Время тепловой инерции термическое сопротивление слоистых стен. *Энергоресурсосбережение и энергоэффективность*. 2011. №4(40). С.23–26.
39. Impact Estimator for Building URL: <https://calculatelca.com/software/impact-estimator/overview/> ( дата звернення 07.12.2021).
40. Доброноженко О. В. Перспективы возведения экодому в Украине как приоритетное направление по энергосбережению. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Будівництво», 2012. №5 (16). С. 152-156.
41. The Passive House Institute. URL: <https://passivehouse.com/index.html> (Дата звернення 22.10.2020).
42. Дудикевич Ю. Б. Енергоощадні котеджі: методики проектування будинків без газу. Львів: Сполом, 2011. 192 с.
43. Філоненко О.І., Юрін О.І. Будівельна теплофізика огорожувальних конструкцій будівель: навч. посібник. Полтава: Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 2015. 328 с.
44. ДСТУ Б В.2.6-189:2013. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2013. – 51 с.
45. Evrard A. Thermal inertia and moisture regulation of straw bale buildings with earth plasters. URL: [https://www.researchgate.net/publication/283567965\\_Thermal\\_inertia\\_and\\_moisture\\_regulation\\_of\\_straw\\_bale\\_buildings\\_with\\_earth\\_plasters](https://www.researchgate.net/publication/283567965_Thermal_inertia_and_moisture_regulation_of_straw_bale_buildings_with_earth_plasters) (дата звернення: 02.03.2018).



46. Saulles, T. D. Thermal mass explained. МРА: The Concrete Centre, 2015 31 р.
47. Широков Е.И. Дерево, тростник, солома: Строительные материалы для устойчивого развития. *Архитектура и строительство России*. 2007. №2 . С. 2-10.
48. Галкин П. И. Огнестойкие глиняные строительные материалы. Москва - Ленинград: Академия ком. хоз-ва им. К. Д. Памфилова, 1944. 76 с.
49. Рудановский В. Н. Кирпичи, блоки: дешево и быстро. Краснодар: АО «Концерн «Курорт».1993. 64 с.
50. Эванс Я., Смит М. Дж., Смилей Л. Дом из самана. Философия и практика. Київ: Рідна Земля, 2004. 337 с.
51. Наназашвили И. Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции. Ленинград: Стройиздат, 1990. 415 с.
52. Лобанова А. В., Казимагомедов И.Э. Стеновые изделия из арболита на основе костры льна. *Комунальне господарство міст*. 2015, выпуск 124. С. 18-20.
53. Building with Hemp and Lime URL: [https://www.researchgate.net/publication/265450145\\_Building\\_with\\_Hemp\\_and\\_Lime](https://www.researchgate.net/publication/265450145_Building_with_Hemp_and_Lime) (Last accessed:17.12.2018).
54. Pacheco-Torgal F., Jalali S. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 29. P. 512–519.
55. Rajesh Kumar Jain. A study on eco friendly cost effective earthbag house construction. *Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology*. 2013. Vol. 9, No. 1, P. 200 – 211.
56. Особенности малоэтажного энергоэффективного экологического строительства в разных климатических зонах. URL: [http://www.itp.nsc.ru/conferences/mzhz\\_2017/files/Section\\_02.pdf#page=16](http://www.itp.nsc.ru/conferences/mzhz_2017/files/Section_02.pdf#page=16) (дата звернення: 02.03.2018).
57. Критерии энергоэффективности в «зеленом» строительстве. URL: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=5134](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5134) (дата звернення 07.01.2019).
58. Clarke J. A., Yaneske P. P., Pinney A. A. The Harmonisation of Thermal Properties of Building Materials. URL: [http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/89/thermor\\_per.pdf](http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/89/thermor_per.pdf) (дата звернення: 02.03.2018).

59. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий: пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. Москва: Радио и связь, 1993. 278 с.
60. Саати Т. Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети: пер. с англ. Москва: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 360 с.
61. Liu, S., Yang, Y., Forrest, J. Grey data analysis. Singapore: Springer Science+Business Media Singapore, 2017 351 p. DOI: 10.1007/978-981-10-1841-1.
62. Цветков В. Я. Серый реляционный анализ. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. №. 12-1. С. 166-166.
63. Wu W. Grey relational analysis method for group decision making in credit risk analysis. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*. 2017. Vol. 13, №. 12. P. 7913-7920.
64. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and control*. 1965. Vol. 8, №. 3. P. 338-353.
65. Кини, Р. Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. Москва: Радио и связь, 1981. 560 с.
66. Лотов А.В., Поспелова И.И. Многокритериальные задачи принятия решений. Метод достижимых целей. Москва: МАКС Пресс, 2008. 197 с.
67. Макарова И. Л. Анализ методов определения весовых коэффициентов в интегральном показателе общественного здоровья. *Международный научный журнал «Символ науки»* 2015. №7. С. 87-94.
68. Chan J. W. K., Tong T. K. L. Multi-criteria material selections and end-of-life product strategy: Grey relational analysis approach. *Materials & Design*. 2007. Vol. 28. №. 5. P. 1539-1546.
69. Цветков В. Я. Информационная неопределенность и определенность в науках об информации. *Информационные технологии*. 2015. №. 1. С. 3-7.
70. Тихонов А.Н., Цветков В.Я. Методы и системы поддержки принятия решений. Москва: МаксПресс, 2001. 312 с.
71. Daniel S. A. A., Pugazhenthir R., Kumar R., Vijayananth, S. Multi objective prediction and optimization of control parameters in the milling of aluminium hybrid

metal matrix composites using ANN and Taguchi-grey relational analysis. *Defence Technology*. 2019. Vol. 15. № 4. P. 545-556. doi: 10.1016/j.dt.2019.01.001.

72. Sarpkaya C., Sabir E. C. Optimization of the sizing process with grey relational analysis. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 2016. №1(115). P. 49-55. doi: 10.5604/12303666.1172087.

73. Сардыкова А. О., В. П. Мироненко. Історичні передумови формування енергоефективного житла. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2010. №12. С. 43-51.

74. Корниенко С. В. Повышение энергоэффективности зданий за счет совершенствования методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.03 / Волгоград, 2018. – 380 с.

75. Arumi-Noe F., Hamilton K. Thermal inertia of Strawbale walls.– Buildings XII Conference, Florida (December, 2015), USA. URL: [http://web.ornl.gov/sci/buildings/2012/1998%20B7%20papers/063\\_Arumi\\_Noel.pdf](http://web.ornl.gov/sci/buildings/2012/1998%20B7%20papers/063_Arumi_Noel.pdf). (дата звернення:13.03.2018).

76. 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

77. Ezennia I. S., Alibaba H.Z. A Systematic Review Of Thermal And Moisture Performance Of Straw-Bale Houses In Hot And Humid Climates. *International Journal of Scientific & Technology Research*. 2017. Vol. 6, No. 01. P. 13-18.

78. Asdrubali F., D'Alessandro F., Schiavoni S. A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*. 2015. Vol. 4, P. 1-17.

79. Арболит. URL: <https://prom.ua/p1012667298-arbolit-bloki-kastro.html> (дата звернення 08.11.2020).

80. Продам саман (лампач). URL: <https://www.olx.ua/obyavlenie/prodam-saman-lampach-IDAk1Js.html#273b58da8c> (дата звернення 01.11.2019).

81. Стеновые панели Экобуд. URL: <http://eco-bud.com/stenovye-paneli> (дата звернення 15.11.2020).
82. Фанера 1525\*1525\*10мм. URL: <https://prom.ua/p6763483-fanera-1525152510mm.html> (дата звернення 10.09.2020).
83. Утеплитель эковата. URL: <https://prom.ua/Uteplitel-ekovata.html> (дата звернення 10.10.2020).
84. Известковый раствор. URL: <https://prom.ua/Izvestkovyj-rastvor.html> (дата звернення 10.10.2020).
85. Энергоемкость основных строительных материалов URL: <http://cnb.by/servisy/novosti/pochemu-neobhodimo-normirovat-energoemkost-v-stroitelstve> (дата звернення: 30.09.2020).
86. Савин В. К. Строительная физика: энергоперенос, энергoeffektivность, энергосбережение. Москва: Лазурь, 2005. 432 с.
87. Бадьин Г. М., Сычев С. А. Современные технологии строительства и реконструкции зданий. Санкт- Петербург: БХВ-Петербург, 2013. 288 с.
88. ДСТУ Б В.2.6-100:2010. Методи визначення теплостійкості огорожувальних конструкцій. [Чинний від 2010-01-20]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. – 42 с.
89. Hens H. Building Physics Heat, Air and Moisture: Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises. 2nd Ed. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2012. 324 p.
90. Гоц Х. М. Використання сучасних технологій САПР для проектування енергoeffektivних будівель. Управління розвитком складних систем. 2012. №. 11. С. 100-106.
91. Герасимов Н. А. Моделирование энергопотребления зданий – краеугольный камень зеленого проектирования для инженеров. Энергосбережение .2014. №3. URL: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=5852](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5852) (дата звернення 22.11.2021).
92. Білоус І. Ю. Оцінювання енергoeffektivності будівлі в умовах динамічної зміни характеристик середовища: дис. ... канд. технічних наук: 05.14.01 / Нац.

технічний ун-т України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»  
Київ, 2019. 236 с.

93. Reeves T., Olbina S., Raja R. A. Issa Guidelines for Using Building Information Modeling for Energy Analysis of Buildings. Buildings. 2015. Vol. 5 P. 1361-1388.

94. Jalaei F., Jrade A. Integrating building information modeling (bim) and energy analysis tools with green building certification system to conceptually design sustainable buildings. Journal of Information Technology in Construction. 2014. Vol. 19. P. 494-519.

95. Harish V.S.K.V., Kumar A. A review on modeling and simulation of building energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 56. P.1272-1292. 31.

96. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Математичні моделі будівель для оцінки енергоспоживання. Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць. 2014. № 80. С. 68–72.

97. Energy Plus URL: <https://energyplus.net/> (Дата звернення 20.11.2021).

98. TRNSYS URL: <http://www.trnsys.com/index.html> (Дата звернення 20.11.2021).

99. eQUESTthe QUick Energy Simulation Tool. URL: <http://doe2.com/eQUEST/> (Дата звернення 20.11.2021).

100. Open source library for building energy and control systems URL: <https://simulationresearch.lbl.gov/modelica/> (Дата звернення 20.11.2021).

101. ДСТУ-Н Б А.2.2.5:2007. Проектування. Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорта будинків при новому будівництві та реконструкції. [Чинний від 2008-07-01.]. К.: Мінрегіонбуд України, 2008. 44 с.

102. International Weather for Energy Calculations: [https://energyplus.net/weather-location/europe\\_wmo\\_region\\_6/UKR](https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR). (Дата звернення 20.11.2021).

103. ArchiPHYSIK URL: <https://www.archiphysik.at/> (Дата звернення 20.11.2021).

104. Hottgenroth Software URL: <https://www.hottgenroth.de/index.html> (Дата звернення 20.11.2021).

105. GRAPHISOFT EcoDesignerSTAR URL:  
[https://www.graphisoft.com/archicad/ecodesigner\\_star/](https://www.graphisoft.com/archicad/ecodesigner_star/) (Дата звернення 10.11.202)
106. Расчет теплотерь помещений и тепловых нагрузок на систему отопления жилых и общественных зданий. URL:  
<https://soft.abok.ru/programms/teplopoteri> (Дата звернення 12.11.2021).
107. Болгарова Н. М. Геометрична модель формування раціональної структури архітектурного об'єкту за параметрами енергоефективності: дис. ... канд. технічних наук: 05.01.01 / Київський нац. ун-т буд-ва ат архітек-тури. Київ, 2018. 174 с.
108. Мусорина Т. А., Гамаюнова О. С., Петриченко М. Р. Обоснование конструктивных мероприятий по увеличению энергоэффективности стеновых ограждений. *Вестник МГСУ*. 2017. Том 12 Выпуск 11 (110). С. 1269-1277.
109. Заборова Д. Д., Куколев М. И., Мусорина Т. А., Петриченко М. Р. Математическая модель энергетической эффективности слоистых строительных ограждений. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2016. №4(254). С. 28-33.
110. Ливчак В. И. Градусо-сутки отопительного периода как инструмент сравнения уровня энергоэффективности зданий в России и в других странах. *Энергосбережение*. 2015. №6. С. 20–26.
111. Гагарин В. Г. Методы экономического анализа повышения уровня теплозащиты зданий. Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК). 2009. №2. С. 10–18.
112. Ратушняк Г. С., Ратушняк О. Г. Управління енергозберігаючими проектами термореновації будівель: монографія. Вінниця: Універсум-Вінниця, 2009. 131с.
113. Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Оцінка ризиків енергозберігаючого проекту. *XLVII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (березень 2018)*, Вінниця: 2018.
114. Г. С. Ратушняк, А. М. Очеретний. Оцінка доцільності підвищення термічного опору огорожувальних конструкцій багатоповерхових житлових

будинків. *Вісник ВПІ*, вип. 6, 2017. с. 11–16.

115. ДСТУ-Н Б В.3.2-3-2014 Настанова з виконання термомодернізації житлових будинків [Чинний від 2015-10-01]. Вид. офіц. Київ, Мінрегіонбуд України. 2014. 70 с.

116. Лялюк О. Г., Ратушняк О. Г., Лялюк А. О., Панкевич В. В. Управління факторами, які впливають на вибір фінансового механізму енергозберігаючого проекту. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2018. № 1. С. 87-94.

117. С. Ф. Пічугін В. О. Семко. Імовірність теплової відмови огорожувальних конструкцій із сталевих холодноформованих елементів за критерієм зниження локальних значень температур. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. Вип. 160. С. 25-34.

118. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Алгоритм реалізації проекту управління імовірністю теплової відмови теплоізоляційної оболонки будівлі. *Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві*. 2019. № 1. С. 140-146.

119. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии индентификации. Нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. Винница: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 1999. 320 с.

120. Петренко В. О., Петренко А. О., Голякова І .В., Петренко В. В. Прогнозування температури внутрішнього повітря в приміщеннях з *Енергетика, екологія, комп'ютерні технології, безпека життєдіяльності в будівництві*: колективна монографія. 2018/4. Дніпро: ПДАБА С. 70-78.

121. Ротштейн А.П. Надежность и интеллектуальные вычисления. Избранные статьи. Винница: ООО «Нилан-ЛТД», 2018. 382 с.

122. Енергозбереження в будівлях. URL: <http://www.patriot-nrg.ua/ukr/savings/view/24> (дата звернення 06.01.2019 р).

123. Европейские стандарты энергоэффективности зданий. URL: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=5089](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5089) (дата звернення 07.12.2021).

124. LEED. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/LEED> (дата звернення 07.12.2021)
125. DGNB. <https://www.dgnb.de/en/index.php> (дата звернення 08.10.2021).
126. BREAM..URL: <https://www.breeam.com> (дата звернення 15.10.2021).
127. СТО НОСТРОЙ 2.35.4-2011. «Зеленое строительство». Здания жилые и общественные. Рейтинговая система оценки устойчивости среды обитания. [Действующий от 11-11-2011]. Изд. офиц. Москва: Некоммерческое партнерство «АВОК», ООО Издательство «БСТ», 2011. 65 с.
128. BEHQE URL: <https://www.behqe.com/home> (дата звернення 22.11.2019).
129. Зелені інновації – реалії та перспективи. Зелене будівництво в Україні. URL: <https://ns-plus.com.ua/2017/08/05/zeleni-innovatsiyi-realiyi-ta-perspektyvy-zelene-budivnytstvo-v-ukrayini/>
130. Bläsi W. Bauphysik. Bibliothek des technischen Wissens. 3 Auflage. Naan: Verlag Europa Lehrmittel, 2001. 536 p.
131. Клименко Л. П., Воскобойнікова Н. О. Аналіз систем сертифікації «зелених» будівель з точки зору оцінки ними екологічної безпеки. *Наукові праці. Серія: Техногенна безпека*. 2014. Т. 233. №. 221. С.114-119.
132. . Козловський В. О. Методичні вказівки до виконання студентами-магістрантами економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт. Вінниця: ВНТУ, 2012. 22 с.
133. Labat M., Magniont C., Oudhof N., Aubert J.-E. From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential. *Building and Environment*. 2016. Vol. 97. P. 69–81.
134. Огляд методик для оцінки енергоефективності огорожувальних конструкцій стін. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2019/paper/viewfile/8374/6986> (дата звернення 15.10.2020).
135. Liu S., Yang Y., Forrest J. Grey data analysis. *Springer Singapore*. Singapore, 2017. Vol. 10. №1007. P. 978-981.



136. Clarke J. A., Yaneske P. P., Pinney A. A. The Harmonisation of Thermal Properties of Building Materials. URL: [http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/89/thermal\\_rep.pdf](http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/89/thermal_rep.pdf) (дата звернення 26.09.2020).
137. De Saulles T. Thermal mass explained. Concrete Centre, 2009.
138. Daniel S. A. A., Pugazhenthir R., Kumar R., Vijayananth, S. Multi-objective prediction and optimization of control parameters in the milling of aluminium hybrid metal matrix composites using ANN and Taguchi-grey relational analysis. *Defence Technology*. 2019. Vol. 15. № 4. P. 545-556. doi: 10.1016/j.dt.2019.01.001.
139. Sarpkaya C., Sabir E. C. Optimization of the sizing process with grey relational analysis. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 2016. №1(115). P. 49-55. doi: 10.5604/12303666.1172087.
140. Lin Y., Liu S. A historical introduction to grey systems theory. 2004 *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (IEEE Cat. No. 04CH37583). IEEE, 2004. Vol. 3. P. 2403-2408.
141. Basińska M. The use of multi-criteria optimization to choose solutions for energy-efficient buildings. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*. 2017. Vol. 65, №. 6. P. 815-826. DOI: 10.1515/bpasts-2017-0084.

## ДОДАТОК А

### ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Комплексна оцінка огороджувальних конструкцій будівель з  
урахуванням їх теплотехнічного потенціалу

Тип роботи: кваліфікаційна робота / МКР  
(кваліфікаційна робота, курсовий проект (робота), реферат, аналітичний огляд, інше  
(вказати))

Підрозділ: кафедра БМГА, ФБТЕГП, гр. Б-20мі  
(кафедра, факультет (інститут), навчальна група)

Науковий керівник: Бікс Ю.С., доцент  
(прізвище, ініціали, посада)

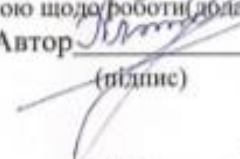
#### Показники звіту подібності

Plagiat.pl (StrikePlagiarism)		Unicheck	
КП1		Оригінальність	78,9%
КП2		Схожість	21,1%
Тривога/Білі знаки	/		

#### Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)


- Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (зна) з цим звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи (додається)

Автор  Лялюк А.О.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

#### Опис прийнятого рішення

допустити до захисту МКР  
Допустити до захисту МКР

Особа, відповідальна за перевірку  Блащук Н.В.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Експерт \_\_\_\_\_  
(за потреби) (підпис) (прізвище, ініціали, посада)

# Мета роботи

Метою даної роботи є теоретичне обґрунтування механізму підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій стін та вирішення науково-технічної задачі багатокритеріальної оцінки комплексу різно-розмірних теплотехнічних, фізико-механічних та економічних показників багат шарових стінових конструкцій стін з альтернативних матеріалів природного походження та їх порівняння з традиційним варіантом влаштування зовнішніх стін. Вищесказане є основою для проведення комплексного чисельного моделювання що має на меті вибір раціонального, в контексті обраних критеріїв впливу, варіанту багат шарової стіни.

# Задачі дослідження

- Обрати вагомí показники для сукупного оцінювання теплотехнічних та економічних показників багат шарових стінових конструкцій при врахуванні особливостей їх нестаціонарних теплотехнічних характеристик влітку та взимку;
- Провести комплексне чисельне моделювання з визначенням наступних показників:
  - Критеріального числа Савіна ;
  - Коефіцієнт теплопередачі ( $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$ ), який є величиною, оберненою до загального термічного опору  $R_z$  стінового огородження за ДБН В.2.6-31:2016 ;
  - Час теплової інерції
  - Коефіцієнт затухання (англ. *decrement factor f*) за за ISO 13786:2017 ;
  - Внутрішня питома теплоємність (англ. *the internal area heat capacity*,  $\text{кДж} / \text{м}^2\text{К}$ ) ;
  - Показник теплової інерції  $D$  для стін для запропонованих варіантів;
  - Аналітично розрахувати величину комплексної оцінка огорожувальних конструкцій будівель з урахуванням їх теплотехнічного потенціалу з використанням різних методик з урахуванням ваги критеріїв оцінювання;
  - Провести аналіз результатів для запропонованих типів стін;
  - Виконати розрахунок економічного ефекту для запропонованих оптимальних типів стін, з огляду на результати моделювання в контексті комплексної оцінки для наведених огорожувальних стінових конструкцій.

## Об'єкт дослідження

Об'єктом даного дослідження є комплекс теплофізичних, фізико-механічних а також економічних показників огороджувальних стінових конструкцій.

## Предмет дослідження

Предметом дослідження є комплексна оцінка енергоефективності багат шарових огороджувальних конструкцій з урахуванням їх теплотехнічного потенціалу.

## СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ

Проблема прийняття рішення при проектуванні огорожувальних конструкцій для теплозахисту будівлі, тобто вибір однієї з можливих альтернатив, є складною з точки зору різномаяття факторів, що впливають на цей вибір

Кожна альтернатива володіє як перевагами так і недоліками, причому, за великої кількості та різномаяття факторів, що підлягають аналізу, не відразу зрозуміло, який з варіантів краще (переважніше) інших та чому.

Як правило, у фахівців часто виникають сумніви в тому, що прийняте рішення є «найкращим». У цьому випадку виникає необхідність у використанні такого наукового методу, який дозволяє вести пошук «найкращого рішення»

## МСДА ЯК ІНСТРУМЕНТАРІЙ

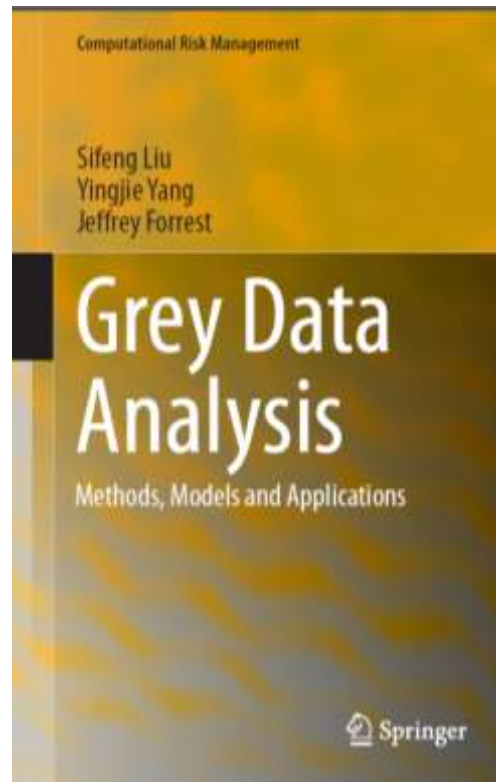
У сучасній науці дисципліною, що займається проблемами прийняття рішення в умовах, коли вибір альтернативи вимагає аналізу складної інформації різної фізичної природи при пошуці найкращого рішення є «системний аналіз». Суттю системного аналізу є багатокритеріальний аналіз (англ. *Multicriteria Decision Analysis, MCDA*).

Обґрунтований вибір найкращого варіанту огороджувальних конструкцій для енергоефективного будівництва при виконанні порівняння за багатьма критеріями можливий лише за умови використання методів саме багатокритеріального аналізу (МСДА).



## ВИКОРИСТАНІ В РОБОТІ МЕТОДИ МСДА АНАЛІЗУ

- Метод аналізу ієрархій (АНР)
- Метод сірого реляційного аналізу (GRA)
- Метод латентних змінних (МЛЗ)





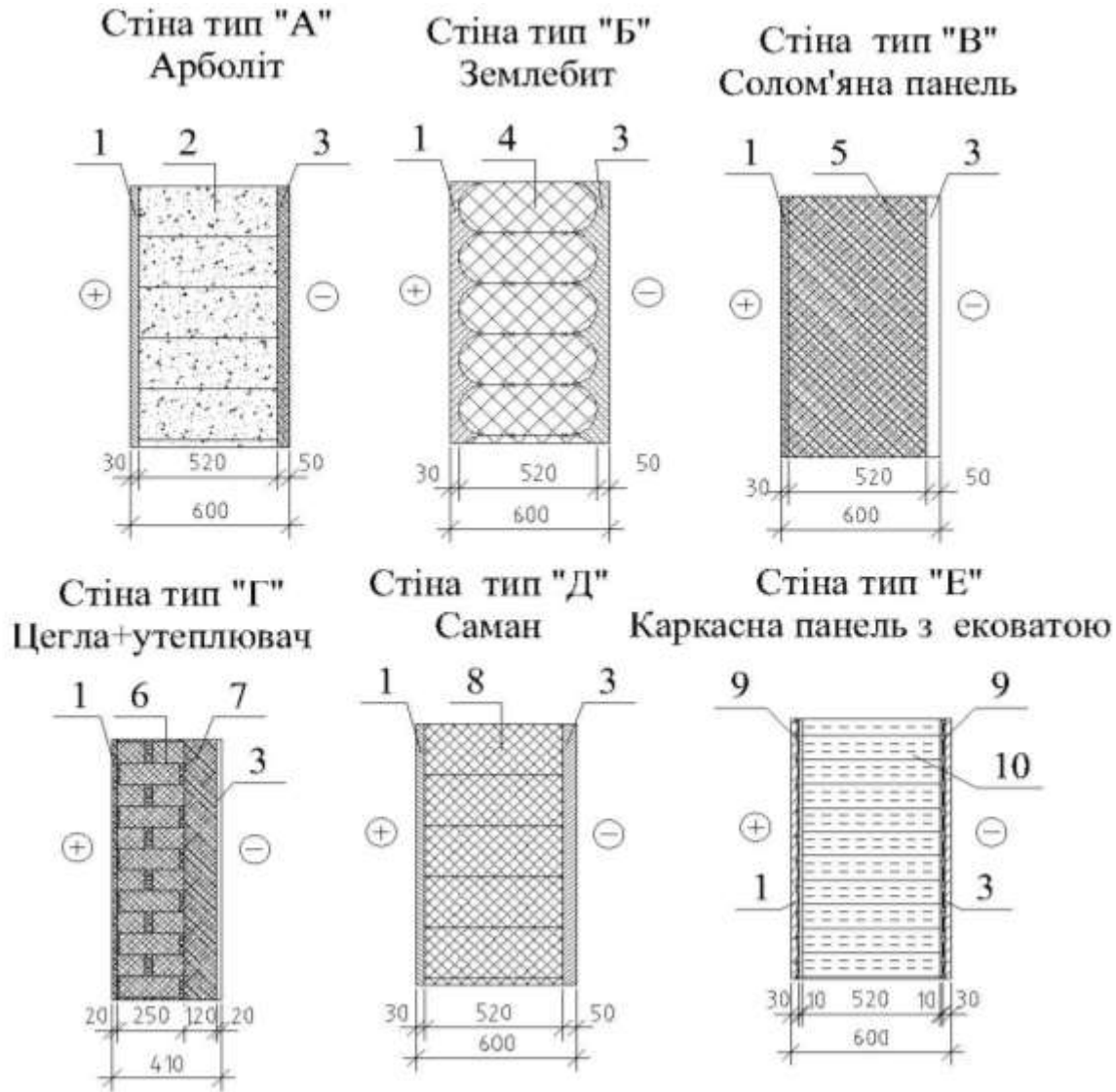
## ВИХІДНІ ВАРІАНТИ БАГАТОШАРОВИХ СТІН ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

- Стіна з арболіту (тип «А»);
- Стіна з землєбиту (тип «Б»);
- Стіна з солом'яних панелей (тип «В»);
- Стіна із цегли+утеплювач (тип «Г»);
- Стіна з саману (тип «Д»);
- Каркасна панель з ековатою (тип «Е»);

## КРИТЕРІЇ, ЯКІ ОБРАНО ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ

- Критеріальне число Савіна ;
- Коефіцієнт теплопередачі ( $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$ ), який є величиною, оберненою до загального термічного опору  $R_{\Sigma}$  стінового огородження за ДБН В.2.6-31:2016;
- Час теплової інерції
- Коефіцієнт затухання (англ. *decrement factor f*) за ISO 13786:2017;
- Внутрішня питома теплоємність (англ. *the internal area heat capacity*,  $\text{кДж} / \text{м}^2\text{К}$ )
- Показник теплової інерції  $D$  для запропонованих стін

# БАГАТОШАРОВІ ОГОРОДЖУВАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ СТІН



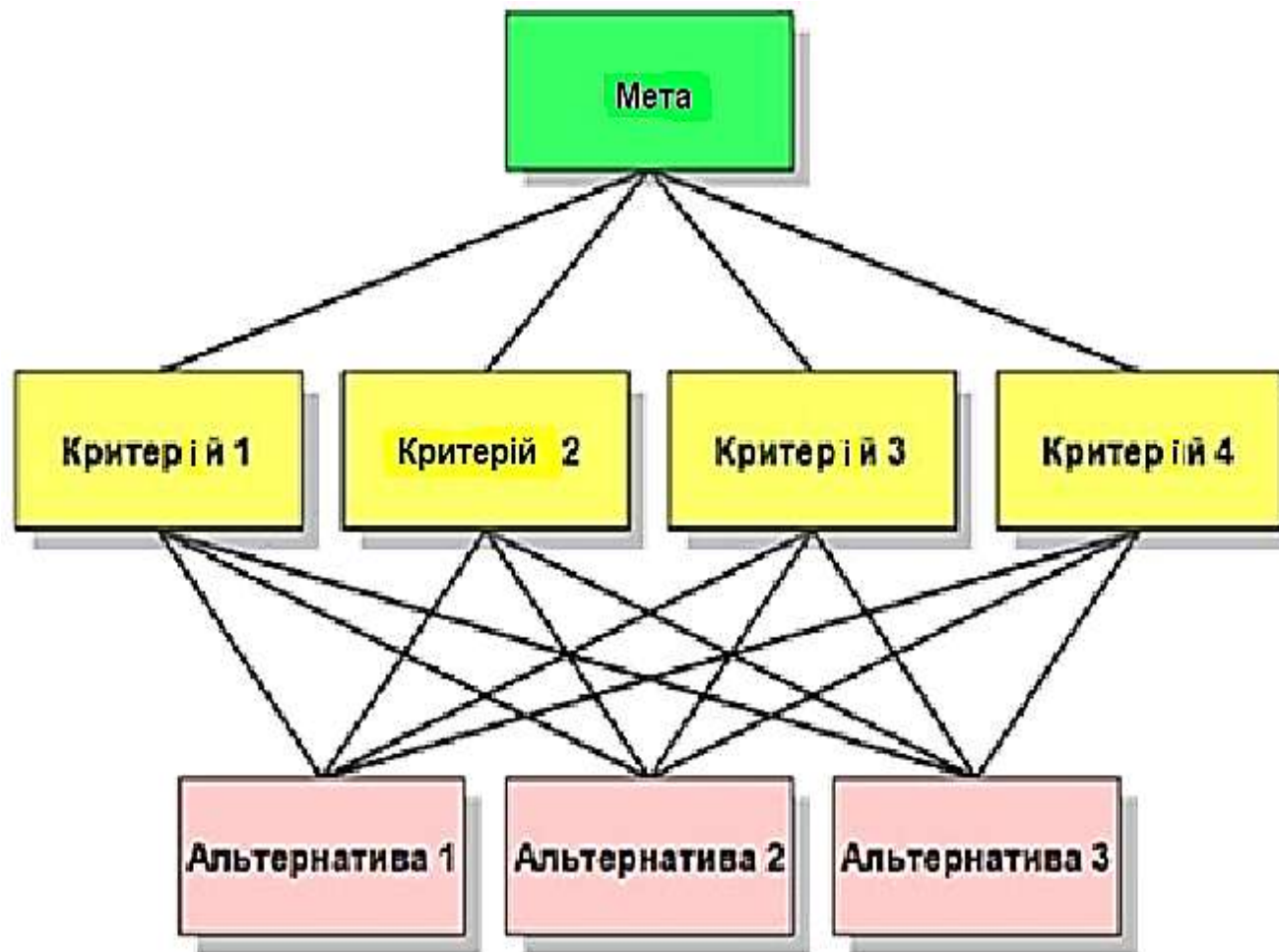
Схеми поперечного перерізу стін:

- 1- внутрішня вапняно-піщана штукатурка;
- 2-арболітовий блок;
- 3-зовнішня вапняно-піщана штукатурка;
- 4-щільно утрамбований ґрунт;
- 5- панель зі спресованої соломи;
- 6- кладка з керамічної цегли;
- 7 -утеплювач (мінеральна вата);
- 8 - саманний блок;
- 9 - фанера;
- 10 - екофібра (ековата).

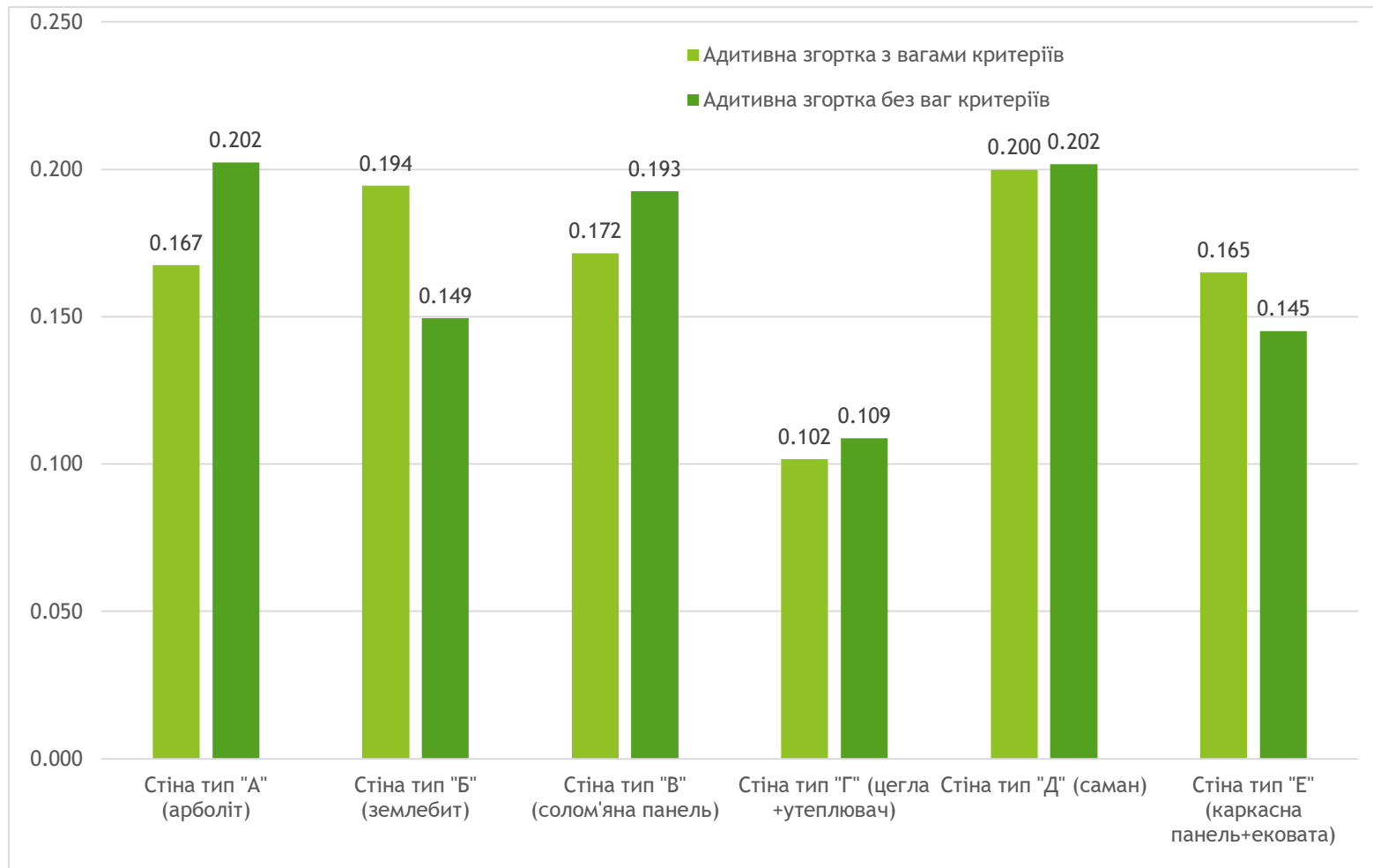
## ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ

□	Критерій Са-віна $Sa$ □	Сумарна теплова інерція багатошарової стіни $\Sigma I$ (год) □	Коефіцієнт теплопередачі $u$ -value зовнішніх стінових оболонок, Вт/м <sup>2</sup> К □	Коефіцієнт зату-хання, $f$ □	Внутрішня питома теплоємність, кДж/м <sup>2</sup> К □	Показник теплової інерції $D$ □
Стінова конструкція "А" ¶ (арболіт) □	1.81 □	67.43 □	0.149 □	0.003 □	46.401 □	12.97 □
Стінова конструкція "Б" ¶ (землебит) □	0.64 □	60.60 □	1.329 □	0.068 □	68.268 □	6.19 □
Стінова конструкція "В" ¶ (солом'яна панель) □	2.18 □	146.99 □	0.130 □	0.027 □	43.258 □	9.56 □
Стінова конструкція "Г" ¶ (цегла+утеплювач) □	1.73 □	54.73 □	0.266 □	0.117 □	60.737 □	5.66 □
Стінова конструкція "Д" ¶ (саман) □	1.54 □	110.79 □	0.642 □	0.024 □	59.583 □	8.66 □
Стінова конструкція "Е" ¶ (каркасна панель+ековата) □	1.24 □	80.41 □	0.111 □	0.106 □	49.735 □	7.47 □

# ІЄРАРХІЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОЦІНКИ ЗА МЕТОДОМ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ

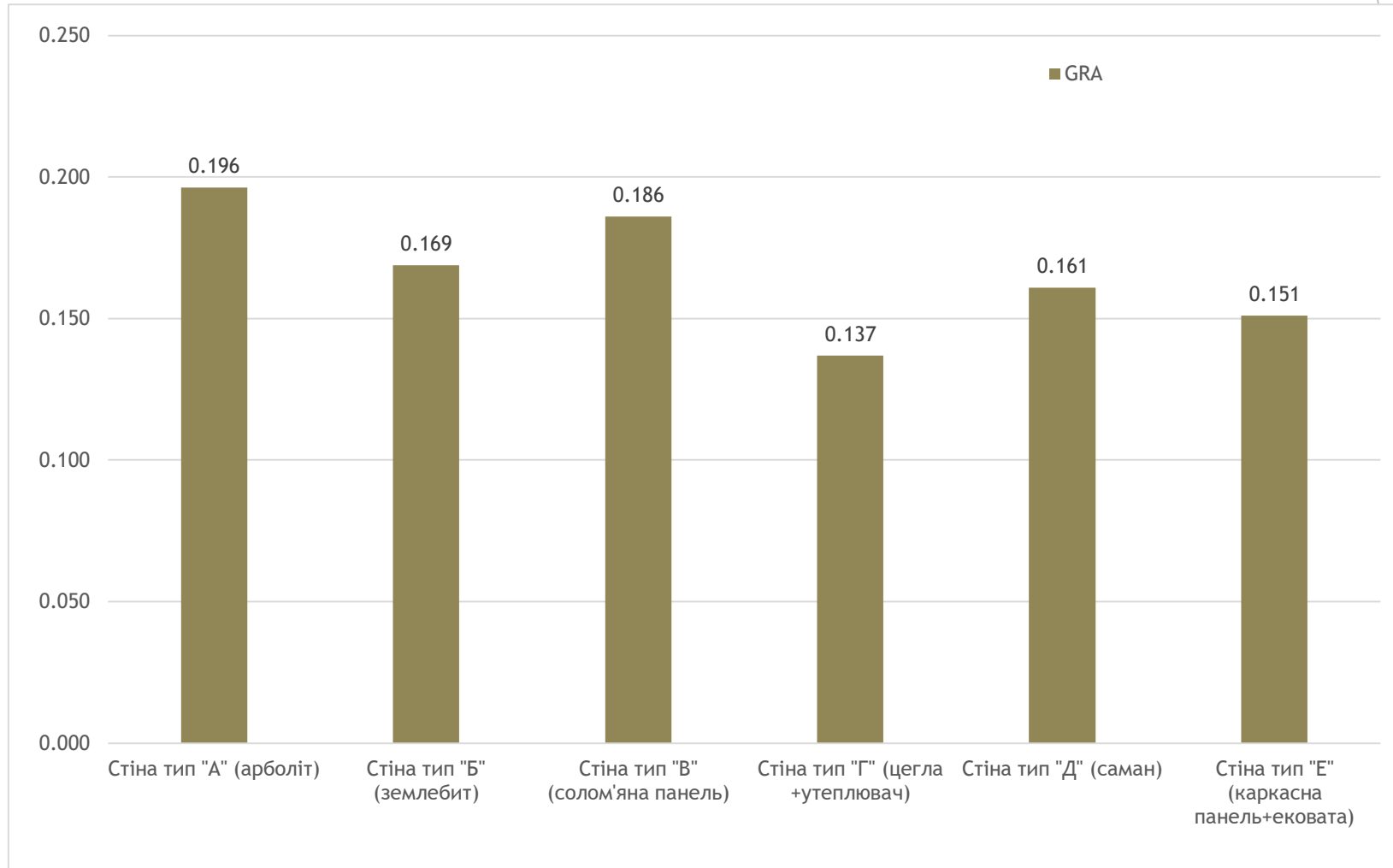


# РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОЦІНКИ



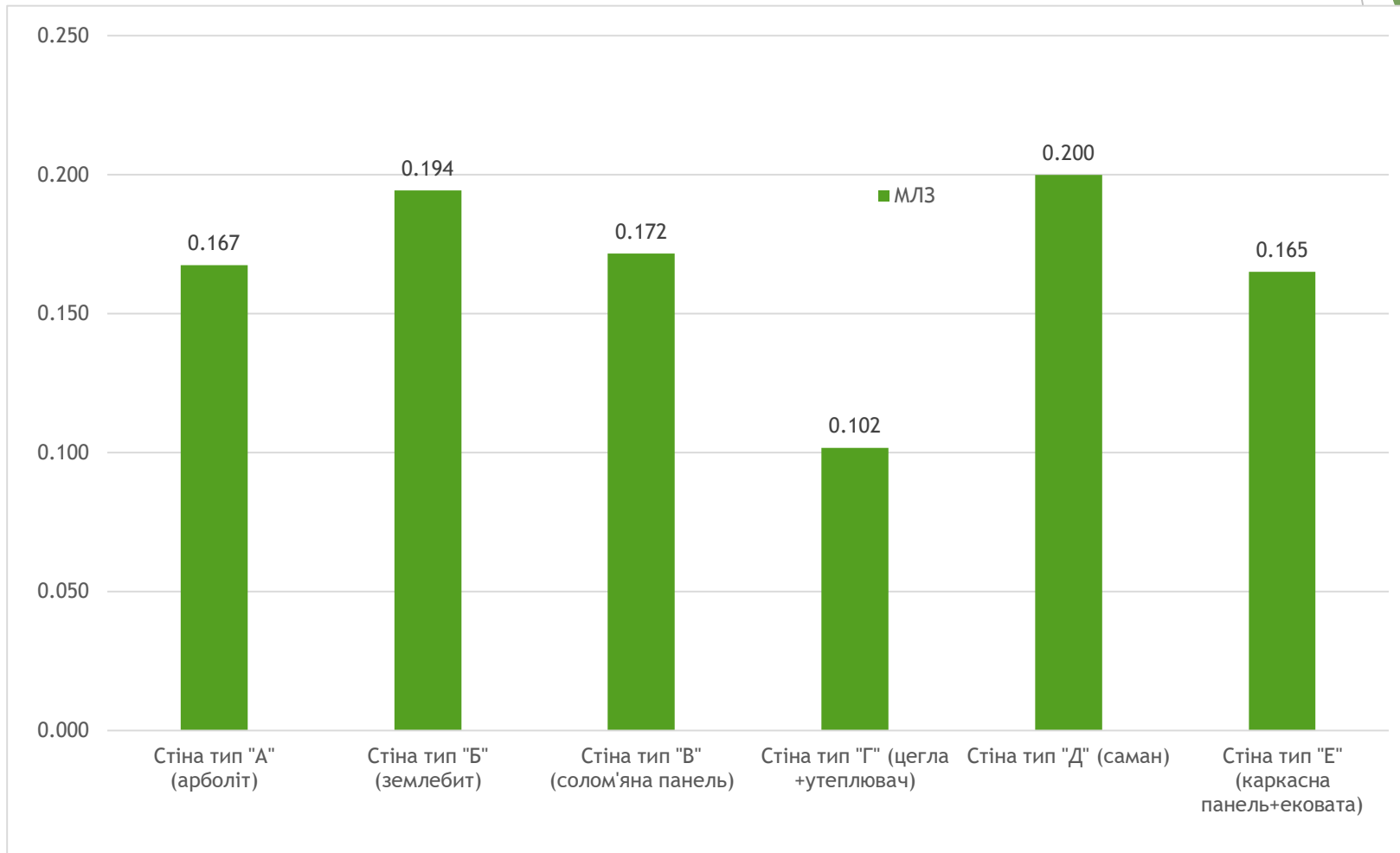
За методом аналізу ієрархій АНР

# РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОЦІНКИ



За методом сірого реляційного аналізу GRA

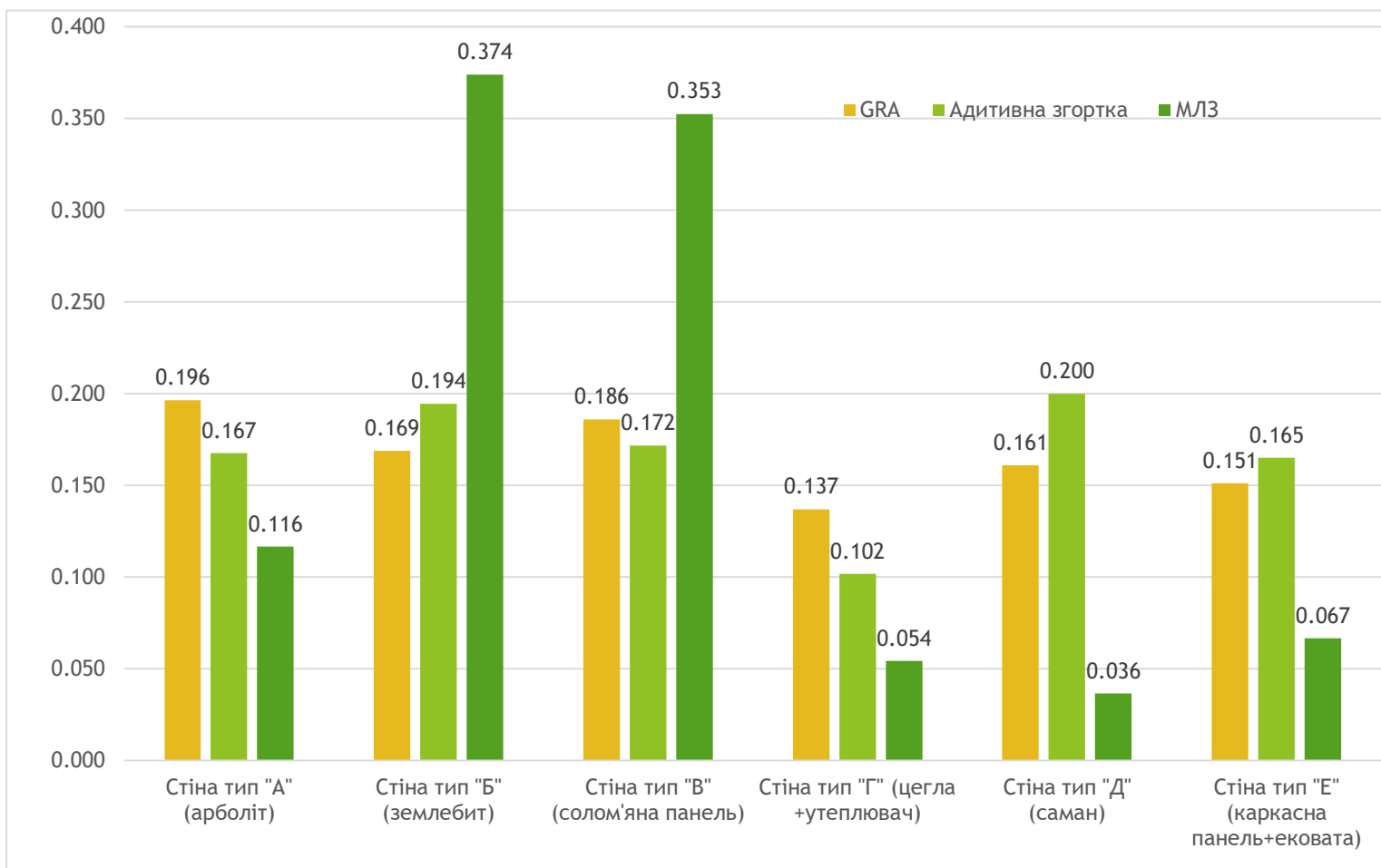
# РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОЦІНКИ



За методом латентних змінних



# РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОЦІНКИ



Порівняння потенціалу енергоефективності стін за методиками адитивної згортки, сірого реляційного аналізу та методу латентної змінної

## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження з визначення багатокритеріального показника потенціалу енергоефективності багатошарових огорожувальних конструкцій стін. До основних результатів роботи можна віднести:

- Об'єктивний аналіз при проектуванні енергоефективних огорожувальних конструкцій та прийняття рішень про вибір «найкращого варіанту» з поміж декількох порівнюваних можливий лише за залучення методів багатокритеріальної аналізу для оцінки альтернатив (MCDA).
- В якості критеріїв для проведення чисельного порівняння обрано теплофізичні показники які є ключовими для літнього та зимнього періоду експлуатації огорожувальних конструкцій - коефіцієнт затухання (*англ. decrement factor*)  $f$  та внутрішня питома теплоємність стіни,  $\text{кДж/м}^2\text{К}$  (*англ. the internal area heat capacity*), а також прямі (вартість матеріалу стіни,  $\text{грн/м}^2$ ) та непрямі (маса стіни,  $\text{кг/м}^2$ ) економічні показники, які можна легко обчислити для будь-якої багатошарової огорожувальної конструкції.
- Метою всіх розрахунків, що стосуються енергоефективності  $\epsilon$ , у тому числі, потенціальне зменшення негативного антропогенного навантаження від «вуглецевого сліду» при видобутку, транспортуванні, виготовленні та утилізації будівельного матеріалу з однієї сторони, та максимальне гармонічне використання натуральних матеріалів, що можуть бути гідною альтернативою сучасних, високотехнологічних та дорогих у всіх відношеннях конструкційно-ізоляційних матеріалів.

# ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

- Запропоновані критерії оцінки потенціалу енергоефективності можуть бути застосовані при прийнятті рішень щодо оцінки впливу економічних, теплофізичних, тощо.
- Порівняння результатів розрахунків потенціалу енергоефективності за всіма методиками показало, що однозначної альтернативи, яка була б кращою за всіма методиками немає. Це можна пояснити різним математичним апаратом, що реалізований у наведених методиках.
- Очевидно, що для остаточного та обґрунованого вибору оптимального варіанту багат шарового огородження, є потреба у ітераційному перерахунку величини потенціалу енергоефективності за різними методиками до тих пір, поки похибка між оцінками потенціалу енергоефективності, що обчислена за різними методиками MCDA не буде перевищувати допустиму величину.
- Економічний розрахунок, що виконано для трьох типів стін, які виявлено кращими у результаті багатокритеріального порівняння за декількома методиками MCDA, показав, що умовна стіна із землебіту об'ємом 100 м<sup>3</sup> (Кошторисна вартість становить - 75,15 тис. грн.) за показником приведених витрат виявилась дешевшою на 66,56 тис. грн від стіни - каркасна панель з ековатою. землебіт.

## ВІДГУК

### керівника магістерської кваліфікаційної роботи

студента Лялюка Андрія Олександровича  
(прізвище, ім'я, по батькові)

групи Б-20м

на тему: «Комплексна оцінка огороджувальних конструкцій будівель з урахуванням їх теплотехнічного потенціалу»

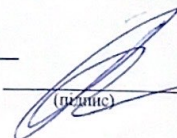
Актуальність теми зв'язана з об'єктивним та виваженим вибором найліпшої альтернативи стінового огородження при будівництві з енергоефективних будівельних матеріалів. Тема роботи відповідає виданому завданню кафедри і буде сприяти стратегічному розвитку державних програм з енергоефективності. При виконанні кожного розділу студент проявив самостійність, ерудицію, показав достатній рівень теоретичної та практичної підготовки, знання та вміння аналізувати і використовувати сучасні досягнення науки, техніки, виробництва. Студент для виконання багатокритеріального аналізу, розуміння причинно-наслідкових зв'язків між параметрами використовував адитивну згортку критеріїв з урахуванням ваги параметрів за методом аналізу ієрархій, отримав комплексну оцінку теплотехнічного потенціалу стінових конструкцій будівель за методом сірого реляційного аналізу GRA та методу, що засновано на латентних змінних. В роботі проведене чисельне моделювання та аналіз при визначенні комплексної оцінки стінових конструкцій будівель. За допомогою кошторисної програми АВК виконано техніко-економічне порівняння різних конструктивних варіантів стін. Оформлення роботи відповідає вимогам діючих стандартів. Результати апробовані: на міжнародних конференціях, у вітчизняних та західних фахових статтях, отриманий патент. Недоліки роботи – є незначні помилки в оформленні роботи.

Висновки: якість підготовки студента відповідає вимогам освітньої програми і дипломник заслуговує присвоєння ступеня магістра та на оцінку «А».

#### Опонент

К.Т.Н., доцент

(посада, науковий ступінь, вчене звання)



(підпис)

Панкевич О. Д.

(ініціали, прізвище)



## ВІДГУК

### керівника магістерської кваліфікаційної роботи

студента (-ки) \_\_\_\_\_ Лялюка Андрія Олександровича \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

на тему Комплексна оцінка огорожувальних конструкцій будівель з  
урахуванням їх теплотехнічного потенціалу

Робота магістра Лялюка Андрія Олександровича присвячена вирішенню важливої науково-практичної задачі – спробі оцінити комплексно та врахувати багатокритеріально низку різнорозмірних, значущих з точки зору теплотехнічних, економічних та теплофізичних параметрів багатoshарових огорожувальних конструкцій стін в контексті їх енергоефективного використання, на прикладі шести різних типів багатoshарових стінових конструкцій.

Робота є актуальною, цілком відповідає поставленому завданню. Робота містить чотири основні розділи.

Перший розділ присвячено аналізу впливових факторів фізико-механічної природи матеріалу стін, економічні показники, а також виявлений критерій, що пов'язує в одній залежності енергозатратність зовнішніх стінових оболонок, їх теплотехнічні характеристики, суворість клімату району будівництва та інтегральну характеристику довговічності. Виявлено, що на енергоефективність конструкції стіни та на комфорт у приміщенні впливає не тільки фізико-механічні та теплофізичні параметри матеріалів стін, але й їхня послідовність у конструкції відносно внутрішньої стінової поверхні приміщення.

У другому розділі наведено математичні методи аналізу багатокритеріальних задач – метод оцінки вагових коефіцієнтів, метод адитивної згортки критеріїв, метод сірого реляційного аналізу. Всі методи мають свої переваги та недоліки та можуть бути використані для вирішення прикладної задачі досліджень у даній роботі.

У третьому розділі магістр провів комплексне чисельне моделювання з визначення комплексного показника, який враховує час теплової інерції, показник теплової інерції, коефіцієнт теплопровідності багатoshарової конструкції стіни, коефіцієнт затухання, питому внутрішню теплоємність стіни та критеріальне число Савіна.

Четвертий розділ присвячено економічній оцінці рішень в контексті отриманих результатів.

Вище наведені критерії обрані автором в результаті аналізу літературних джерел, та є оригінальними в контексті набору показників для комплексної оцінки теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій стін. Практична цінність роботи полягає у тому, що методика оцінювання та критерії оцінювання можуть бути взяті на озброєння особою, що приймає рішення при виборі проекту реалізації енергоефективного будівництва, в якості додаткового критерію при прийнятті рішення.

Самостійність студента при написанні магістерської роботи полягала у опрацюванні рекомендованої літератури, проведенні змістовного аналізу джерел та проведенні числового експерименту з опрацюванням вищезазначених критеріїв оцінювання.

Окрім цього, напрацювання у галузі енергоефективності будівництва дозволили студенту стати співавтором багатьох публікацій та патентів на корисну модель, які додають до цілісності підготовленої дисертації роботи.

Недоліком роботи можна назвати обмежене використання сучасних програмних продуктів з моделювання енергоефективності будівлі в цілому, а не лише конструкції стіни та відсутність натурального експерименту. На думку керівника, це б значно підсилило практичну цінність проведеної роботи.

Необхідно зазначити, що зроблені зауваження мають рекомендаційний характер для продовження роботи дисертанта над актуальною тематикою, не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи і не зменшують ступеня обґрунтованості та достовірності основних результатів і висновків.

За актуальністю теми, обсягом виконаних досліджень, новизною, теоретичною і практичною цінністю результатів магістерська кваліфікаційна робота Лялюка Андрія Олександровича "Комплексна оцінка огорожувальних конструкцій будівель з урахуванням їх теплотехнічного потенціалу" є завершеною науковою роботою, відповідає вимогам до кваліфікаційних робіт на здобуття наукового ступеня магістра зі спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія за освітньо- професійною програмою підготовки «Промислове та цивільне будівництво», а її автор заслуговує на оцінку «А» – відмінно.

**Керівник магістерської  
кваліфікаційної роботи**

Доцент, к.т.н., доцент  
(посада, науковий ступінь, вчене звання)



Бікс Ю. С.  
(ініціал, прізвище)