

Вінницький національний технічний університет  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра будівництва, міського господарства та архітектури  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

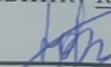
на тему:

**ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТИХ  
МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ УТЕПЛЕННЯ В ЖИТЛОВОМУ БУДІВНИЦТВІ**

Виконав: студент 2-го курсу, групи Б-23мз  
спеціальності 192 – «Будівництво  
та цивільна інженерія»

 Фурман О. І.

Керівник: к.т.н., доцент каф. БМГА

 Бікс Ю. С.

«16» червня 2025 р.

Опонент: к.т.н., доц. каф. ІСБ

 Панкевич О. Д.

«16» червня 2025 р.



Вінницький національний технічний університет  
Факультет Будівництва, цивільної та екологічної інженерії  
Кафедра Будівництва, міського господарства та архітектури  
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)  
Галузь знань 19 – Архітектура та будівництво  
Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія  
Освітньо-професійна програма Промислове та цивільне будівництво



## ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Фурману Олександрю Івановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ УТЕПЛЕННЯ В ЖИТЛОВОМУ БУДІВНИЦТВІ

керівник роботи Бікс Юрій Семенович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "20" березня 2025 року №96.

2. Строк подання магістрантом роботи 30.05.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: нормативна література, результати досліджень, фрагмент ситуативного плану, карта місцевості

4. Зміст текстової частини: Вступ (актуальність та новизна наукових досліджень, об'єкт, предмет, мета і задачі, новизна, практична значимість, апробація). Розділ 1. Екологічна теплоізоляція огорожувальних конструкцій житлових будівель: сучасний стан і тенденції (Аналітичний огляд екологічно чистих теплоізоляційних матеріалів. Нормативні, гігієнічні, екологічні та пожежні вимоги до утеплювачів. Сучасні тенденції в проектуванні енергоефективного житлового будинку. Сучасні утеплюючі матеріали: технічні характеристики, переваги і недоліки. Висновки за розділом 1). Розділ 2. Дослідження властивостей екологічно чистих утеплювачів (Оцінка ефективності застосування соломки як екологічно чистого теплоізоляційного матеріалу, масивної деревини, збірних стінових панелей, CLT-панелей, піногіпсових панелей, теплоізоляційного композиту на основі деревних відходів як ефективного теплоізоляційного та конструктивно-оздоблювального матеріалу. Висновки за розділом 2). Розділ 3. Оцінювання ефективності екологічно чистих матеріалів для утеплення в житловому будівництві (Постановка задачі багатокритеріального аналізу. Вибір критеріїв оцінки та їх характеристика. Результати багатокритеріального аналізу. Математичне моделювання залежності ефективності від ключових параметрів утеплювачів. Висновки за розділом 3). Розділ 4 Технічна частина (Об'ємно-планувальні рішення житлового будинку. Конструктивні рішення житлового будинку з CLT-панелей. Організаційно-технологічні рішення. Галузь застосування технологічної карти. Організація і технологія виконання робіт. Калькуляція трудовитрат. Контроль якості виконання робіт. Охорона праці. Висновки до розділу 4). Розділ 5 Економічна частина. Висновки. Список використаних джерел. Додатки

5. Перелік ілюстративно-графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Науково-дослідний розділ – 5-7 арк. (плакати, що ілюструють результати

науково-дослідної роботи). 2. Архітектурно-будівельні рішення – 2-3 арк. (архітекту будівельні рішення багатоповерхової житлової будівлі). 3. Організаційно-технологічні рішення – 1 арк. (Технологічна карта на зведення житлового будинку. Календарний графік виконання робіт).

### 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконав прийняв
Вступ, науковий розділ 1-3	Бікс Ю.С., к.т.н., доцент кафедри БМГА		
Розділ 4. Технічна частина. Архітектурно-будівельні та конструктивні рішення	Бікс Ю.С., к.т.н., доцент кафедри БМГА		
Розділ 4. Технічна частина. Організаційно-технологічні рішення	Христич О.В., к.т.н., доцент кафедри БМГА		
Розділ 5. Економічна частина	Лялюк О. Г., к.т.н., доцент кафедри БМГА		

7. Дата видачі завдання 02.01.2025 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Приміт
1	Складання вступу до МКР	02.01-15.01.25	виконав
2	Науково-дослідна частина (три розділи)	02.01-14.02.25	виконав
3	Архітектурно-будівельні рішення технічного об'єкту	17.02-15.03.25	виконав
4	Організаційно-технологічні рішення	17.03-12.04.25	виконав
5	Подання роботи на перевірку на наявність текстових запозичень	14.04-19.04.25	виконав
6	Економічна частина	14.04-30.04.25	виконав
7	Оформлення МКР	01.05-12.05.25	виконав
8	Подання МКР на кафедру для перевірки	12.05-16.05.25	виконав
10	Попередній захист	30.05.25	виконав
11	Опонування	02.06-10.06.25	виконав
12	Захист МКР	11.06-24.06.25	виконав

Здобувач   
(підпис) Фурман С  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи   
(підпис) Бікс Ю  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

УДК 69.032.4:699.86

Фурман О. І., Оцінка ефективності застосування екологічно чистих матеріалів для утеплення в житловому будівництві. Магістерська кваліфікаційна робота за спеціальністю 192 – «Будівництво та цивільна інженерія». Вінниця: ВНТУ, 2025. 119 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 62 назви; рис.: 15; табл. 28; арк. граф. част.: 23.

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена оцінці ефективності застосування екологічно чистих теплоізоляційних матеріалів у житловому будівництві. У дослідженні розглянуто проблематику підвищення енергоефективності будівель шляхом заміни традиційних утеплювачів на натуральні матеріали з низьким вуглецевим слідом. Проведено аналіз сучасного стану ринку екологічних утеплювачів, їхніх фізико-механічних, теплотехнічних і експлуатаційних характеристик, а також відповідності вимогам нормативних документів і міжнародних стандартів сталого будівництва (LEED, BREEAM, DGNB).

У роботі виконано багатокритеріальний SMART-аналіз ефективності теплоізоляційних матеріалів за сукупністю параметрів – теплопровідності, довговічності, вартості, екологічності, паропроникності, пожежної безпеки та технологічності монтажу. На основі цього аналізу здійснено порівняльну оцінку різних типів утеплювачів і визначено найбільш раціональні варіанти їх застосування в житловому будівництві.

Розроблено архітектурно-конструктивні рішення житлового будинку з використанням дерев'яних CLT-панелей та екологічних утеплювачів, розроблено технологічну карту на зведення конструкцій і будівельний генеральний план із раціональною організацією будівельного майданчика.

Ключові слова: екологічні матеріали, теплоізоляція, енергоефективність, CLT-панелі, багатокритеріальний аналіз, SMART-метод, сталий розвиток, житлове будівництво, технологія монтажу, будівельний генеральний план.

## ANNOTATION

Furman O. I. Assessment of the Efficiency of Environmentally Friendly Insulation Materials in Residential Construction. Master's Qualification Thesis in specialty 192 – Construction and Civil Engineering. Vinnytsia: Vinnytsia National Technical University, 2025. 119 p.

In Ukrainian. Bibliography: 62 titles; figures: 15; tables: 28; sheets of graphical part: 23.

The master's thesis is devoted to assessing the efficiency of using environmentally friendly insulation materials in residential construction.

The research focuses on improving the energy performance of buildings through the replacement of conventional synthetic insulations with natural materials characterized by low carbon footprints and high vapor permeability. The paper analyzes the current state of the market for eco-friendly insulations, their physical, mechanical, and thermal properties, as well as compliance with national standards and international sustainability certification systems (LEED, BREEAM, DGNB).

A multi-criteria SMART analysis was performed to evaluate the overall efficiency of insulation materials based on a set of parameters including thermal conductivity, durability, cost-effectiveness, environmental impact, vapor permeability, fire safety, and installation feasibility. This approach enabled the comparative assessment of various insulation types and the identification of optimal materials for residential building applications.

Architectural and structural solutions of a multi-storey residential building with CLT (Cross-Laminated Timber) panels and ecological insulation were developed. The thesis also includes a technological chart for the assembly of structural elements and a construction site master plan ensuring efficient organization of works and resource use.

Keywords: environmentally friendly materials, thermal insulation, energy efficiency, CLT panels, multi-criteria analysis, SMART method, sustainable construction, residential buildings, installation technology, construction site master plan.

## ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ЕКОЛОГІЧНА ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЯ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ: СУЧАСНИЙ СТАН І ТЕНДЕНЦІЇ	9
1.1 Аналітичний огляд екологічно чистих теплоізоляційних матеріалів	9
1.2 Адаптація міжнародних стандартів до екологічного утеплення в житловому будівництві України	14
1.2.1 Орієнтири канадського досвіду	14
1.2.2 Порівняння матеріалів за DGCS	15
1.2.3 Потенціал впровадження в Україні	15
1.3 Нормативні вимоги до опору теплопередачі огороджувальних конструкцій	17
1.4 Гігієнічні, екологічні та пожежні вимоги до утеплювачів	18
1.5 Роль теплоізоляції у формуванні енергоефективності житлових будівель	20
1.6 Сучасні тенденції в проектуванні енергоефективного оболонкового контур	21
1.7 Сучасні утеплюючі матеріали: технічні характеристики, переваги і недоліки	23
Висновки за розділом 1	27
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТИХ УТЕПЛЮВАЧІВ	29
2.1 Аналіз ефективності застосування соломи як екологічно чистого теплоізоляційного матеріалу	29
2.2 Аналіз екологічних і конструктивних властивостей масивної деревини як ефективного теплоізоляційного та конструктивно- оздоблювального матеріалу	30

2.3 Аналітичне обґрунтування доцільності застосування збірних стінових панелей в умовах українського будівництва	33
2.3.1 Стінові панелі у каркасному будівництві	33
2.3.2 CLT-панелі	35
2.3.3 Аналіз ефективності арболітових плит як екологічного утеплювача	36
2.3.4 Ефективність древокомпозитних панелей у контексті екологічного утеплення	38
2.3.5 Арболіт з костриці конопель як ефективний екологічний утеплювач	40
2.4 Оцінка ефективності застосування автоклавного газобетону як екологічного утеплювального матеріалу у житловому будівництві	43
2.5 Аналіз ефективності CLT-панелей як енергоефективного матеріалу огорожувальних конструкцій	46
2.6 Оцінка ефективності застосування піногіпсових панелей в утепленні житлових будинків	50
2.7 Оцінка ефективності теплоізоляційного композиту на основі деревних відходів	53
Висновки за розділом 2	55
<b>РОЗДІЛ 3 ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ УТЕПЛЕННЯ В ЖИТЛОВОМУ БУДІВНИЦТВІ</b>	<b>57</b>
3.1 Постановка задачі багатокритеріального аналізу	57
3.2 Вибір критеріїв оцінки та їх характеристика	57
3.3 Результати багатокритеріального аналізу	59
3.4 Порівняльний аналіз інтегральних рейтингів утеплювачів	61
3.5 Диференціація ефективності утеплювачів за типами житлових будівель	63
3.6 Математичне моделювання залежності інтегрального коефіцієнта ефективності від ключових параметрів утеплювачів	67

3.7 Багатокритеріальний аналіз ефективності екологічних утеплювачів із розширеними критеріями оцінювання	71
Висновки за розділом 3	74
<b>РОЗДІЛ 4 ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА</b>	<b>76</b>
4.1 Обґрунтування використання CLT-панелей у житловому будівництві	76
4.2 Архітектурні рішення багатоквартирного житлового будинку	77
4.2.1 Загальна характеристика об'єкта	78
4.2.2 Функціонально-просторова організація	78
4.2.3 Архітектурно-конструктивні рішення	79
4.2.4 Оздоблення, покрівля та звукоізоляція	81
4.3 Інженерне обладнання будівлі	82
4.4 Організаційно-технологічні рішення зведення конструкцій житлового будинку з CLT-панелей	82
4.4.1 Область застосування та вихідні дані	82
4.4.2 Технологія виконання робіт	83
4.4.3 Вимоги до якості виконання робіт	88
4.4.4 Охорона праці та безпека під час виконання робіт	89
4.4.5 Техніко-економічні показники	92
4.5 Розробка будівельного генерального плану	93
4.5.1 Вихідні дані	93
4.5.2 Розміщення основних елементів	93
4.5.3 Тимчасові дороги та транспортна схема	94
4.5.4 Тимчасові інженерні комунікації	95
4.5.5 Техніко-економічні показники будгенплану	96
Висновки за розділом 4	98
<b>РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА</b>	<b>100</b>
5.1 Кошторисна вартість будівництва	100
5.2 Розрахунок техніко-економічних показників проекту	110

	5
Висновки за розділом 5	110
ВИСНОВКИ	111
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	114
ДОДАТКИ	120
Додаток А Протокол перевірки кваліфікаційної роботи	121
Додаток Б Відомість графічної частини МКР	122

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** У сучасному житловому будівництві енергоефективність та екологічна безпека стали ключовими вимогами до матеріалів, зокрема до теплоізоляції. Забезпечення належного теплозахисту споруд без шкоди для довкілля є одним із визначальних факторів сталого розвитку будівельної галузі. Зростаюча вартість енергоносіїв, посилення екологічного законодавства, а також підвищення рівня обізнаності споживачів щодо впливу будівельних матеріалів на здоров'я сприяють активному пошуку альтернативи традиційним синтетичним утеплювачам.

Традиційні матеріали, такі як мінеральна вата чи пінополістирол, мають високі теплоізоляційні характеристики, однак їх виробництво, експлуатація та утилізація супроводжуються значними викидами парникових газів, використанням токсичних компонентів, а також проблемами з вторинною переробкою. Це обумовлює необхідність впровадження натуральних, відновлюваних і безпечних для людини матеріалів, які одночасно демонструють високі теплотехнічні показники.

Одним із перспективних напрямків є використання екологічно чистих утеплювачів: ековати (целюлозного утеплювача), льоноволокна, деревоволокнистих плит, конопляних матів, а також сучасних багатошарових дерев'яних конструкцій типу CLT (Cross-Laminated Timber), які поєднують в собі несучу здатність і теплоізоляцію. Їх використання дозволяє не лише зменшити енергоспоживання житлових будівель, а й значно знизити їх вуглецевий слід протягом життєвого циклу.

У цьому контексті актуальним є системний аналіз ефективності таких матеріалів – з позицій теплотехнічної доцільності, довговічності, санітарно-гігієнічної безпеки, економічної доцільності та екологічної ефективності. Саме така комплексна оцінка стане основою для наукового обґрунтування їх широкого впровадження у практику житлового будівництва в Україні.

**Мета дослідження:** оцінка ефективності екологічно чистих утеплювачів у житловому будівництві з урахуванням: теплофізичних характеристик, економічних витрат, впливу на довкілля, безпеки для здоров'я людини.

**Завдання дослідження:**

1. Провести огляд сучасного ринку екологічних утеплювачів в Україні та ЄС.
2. Порівняти фізико-механічні, теплотехнічні та гігієнічні властивості матеріалів.
3. Визначити доцільність застосування екологічних утеплювачів у житловому будівництві.
4. Розробити інтегральну систему оцінки ефективності із використанням SMART-аналізу.

**Об'єкт дослідження** – процес утеплення житлових будівель із використанням екологічно чистих матеріалів.

**Предмет дослідження** – техніко-економічні, екологічні та теплотехнічні властивості натуральних утеплювачів і CLT-панелей у контексті їх ефективності в житловому будівництві та у порівнянні з традиційними матеріалами.

**Інноваційність та новизна дослідження** полягає у всебічному дослідженні ефективності застосування екологічно чистих утеплювачів у контексті українських умов житлового будівництва. У роботі вперше систематизовано сучасні типи природних матеріалів, включаючи CLT-панелі, у порівнянні з традиційними утеплювачами на основі їх теплотехнічних, екологічних, економічних та гігієнічних характеристик. Запропоновано інтегральний критерій оцінки ефективності з урахуванням впливу на здоров'я людини та довкілля, що може бути використано у проектній практиці. Дослідження також базується на аналізі актуальних європейських тенденцій та практик сталого будівництва, адаптованих до національних нормативів.

**Практична цінність** полягає в можливості використання отриманих результатів для прийняття рішень щодо вибору теплоізоляційних матеріалів у

проектуванні та реалізації енергоефективних житлових будинків. Запропонована методика оцінки може бути адаптована для використання у професійній діяльності проєктувальників, енергоменеджерів та девелоперів при впровадженні рішень, що відповідають принципам зеленого будівництва.

**Апробація результатів роботи.** За результатами магістерської кваліфікаційної роботи опубліковано 1 тезу конференції [1] та підготовлено виступ на Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)», яка відбулася у ВНТУ 15.06.2025 – 16.06.2025.

**Публікації:**

За результатами магістерської кваліфікаційної роботи опубліковано 1 тезу конференцій:

1. Фурман О. І., Бікс Ю. С. Застосування екологічно чистих матеріалів для утеплення в житловому будівництві. Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)», Вінниця, Вінницький національний технічний університет, 15.06.2025 – 16.06.2025. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/viewFile/24722/2099>

## РОЗДІЛ 1

### ЕКОЛОГІЧНА ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЯ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ: СУЧАСНИЙ СТАН І ТЕНДЕНЦІЇ

#### 1.1 Аналітичний огляд екологічно чистих теплоізоляційних матеріалів

У сучасних умовах розвитку сталого будівництва екологічні показники теплоізоляційних матеріалів набувають вирішального значення. З метою формування збалансованої системи оцінки ефективності утеплювачів було проведено аналітичний огляд екологічно чистих теплоізоляційних матеріалів, які вже знаходять застосування в житловому будівництві України та країн ЄС.

До найбільш поширених екологічно чистих утеплювачів належать [1-7]:

1) Целюлозна ековата – виготовляється з переробленого газетного паперу з додаванням антисептичних і антипіренових речовин. Має високий рівень паропроникності, низьку теплопровідність ( $\lambda \approx 0,038-0,042$  Вт/м·К). Ековата є прикладом матеріалу з низьким вуглецевим слідом: її виробництво не потребує значних енерговитрат, а переробка вторинної сировини зменшує навантаження на сміттєві полігони. Ековата наноситься шляхом напилення або засипання з ущільненням, заповнюючи всі порожнини, що виключає утворення містків холоду. Клас вогнестійкості: Г2–Г3 (самозатухаючий). Довговічність – до 50 років.

2) Льняний утеплювач – виготовляється з волокон льону, які зшиваються або склеюються природними полімерними зв'язками. Склеювання здійснюється з допомогою натуральних або термопластичних волокон, які активуються при пресуванні. Льон має добрі звукоізоляційні та теплоізоляційні властивості, коефіцієнт теплопровідності  $\lambda \approx 0,038-0,040$  Вт/м·К, відзначається антистатичністю, високою паропроникністю та біостійкістю. Паропроникність: висока, сприяє «диханню» конструкцій. Клас

горючості: Г2. Матеріал легко монтується, не викликає алергічних реакцій, не пилить та не потребує спеціального захисту при роботі.

3) Конопляний утеплювач – відновлюваний та біорозкладний матеріал, що демонструє теплоізоляційні властивості на рівні  $\lambda \approx 0,039\text{--}0,045$  Вт/м·К. Окрім ізоляційних якостей, має природні бактерицидні властивості (висока стійкість до плісняви і шкідників) та позитивно впливає на мікроклімат приміщення. Вологопоглинання: високе, але з хорошими висихаючими властивостями. Клас горючості: Г2–Г3. Має добрий мікрокліматичний вплив у приміщеннях, знижуючи концентрацію летких органічних речовин (VOC).

4) Деревоволокнисті панелі та плити – виготовляються з деревних відходів, зокрема тирси, склеєних під тиском із додаванням натуральних смол. Використовуються як утеплювач і одночасно конструктивний елемент. Показники теплопровідності коливаються в межах  $\lambda = 0,040\text{--}0,050$  Вт/м·К. Окрім термоізоляції, мають добрі акустичні властивості. ДВП часто використовують для зовнішньої або внутрішньої ізоляції, особливо в конструкціях типу "дихаючої стіни" (мають високу паропроникність). Горючість: Г2. Матеріал також регулює вологість у приміщенні, адсорбуючи надлишок водяної пари.

5) Масивна деревина, зокрема у вигляді клеєних конструкцій, дедалі активніше використовується в енергоефективному та екологічному житловому будівництві як універсальний конструктивно-ізоляційний матеріал. Вона має високі теплоізоляційні властивості, низький коефіцієнт теплопровідності ( $\lambda \approx 0,13\text{--}0,16$  Вт/м·К), що є кращим за цеглу та бетон, але гіршим за спеціалізовані утеплювачі (наприклад, мінеральну вату чи пінополістирол). Масивна деревина володіє високою теплоаккумуляційною здатністю, забезпечуючи стабільний мікроклімат у приміщенні за рахунок інерційності температурних коливань [8-9].

6) CLT-панелі (Cross-Laminated Timber) – конструктивний матеріал, що поєднує функції несучої конструкції та базової теплоізоляції. Складаються з кількох шарів деревини, склеєних перехресно, що підвищує міцність у двох

напрямах до 24 МПа та жорсткість [10]. Показник  $\lambda \approx 0,120$  Вт/м·К, тому потребують додаткового утеплення в регіонах з холодним кліматом. Товщина CLT-панелі в 100–120 мм здатна забезпечити тепловий опір  $R \approx 0,7–0,9$  м<sup>2</sup>·К/Вт, що у поєднанні з додатковим утепленням (ляним, деревоволокнистим чи ековатою) із зовнішнього боку дозволяє досягати рівня NZEB або пасивного будинку [11]. Вологість: 8–12%.

CLT-панелі виготовляються без токсичних сполук, клеї часто мають екологічні сертифікати (наприклад, E1, E0, LEED). Вони є вуглецево-нейтральними, оскільки деревина протягом свого життя абсорбує CO<sub>2</sub>. У процесі утилізації CLT-панелі можна переробити або використати як біопаливо [11-12]. Вогнестійкість: висока завдяки обвугленню.

Переваги використання: суміщення конструктивної та утеплювальної функції; можливість зменшення товщини стін порівняно з мінераловатним або пінополістирольним утепленням на цегляній кладці; зменшення термальних містків завдяки монолітності панелей; позитивний вплив на мікроклімат: деревина регулює вологість повітря, запобігаючи утворенню конденсату.

Однак, CLT-панелі мають вищу вартість у порівнянні з мінеральними або органічними утеплювачами ( $\approx 5000–7000$  грн/м<sup>3</sup>) [10-14].

б) Мінераловатні утеплювачі – це волокнистий теплоізоляційний матеріал, який виготовляється з розплаву гірських порід (базальт, діабаз, габро), доменних шлаків або склобою. У будівництві найчастіше застосовується базальтова кам'яна вата [6, 15-16]. Її основною перевагою є комбінація високих теплоізоляційних, акустичних та вогнестійких властивостей. Коефіцієнт теплопровідності – 0,035–0,045 Вт/м·К. Клас горючості – НГ (негорючий матеріал), витримує температури до 1000 °С. Термін експлуатації понад 50 років.

Завдяки низькій теплопровідності мінеральна вата ефективно зменшує тепловтрати через зовнішні огорожувальні конструкції. Наприклад, шар товщиною 150 мм забезпечує опір теплопередачі  $R \approx 3,33$  м<sup>2</sup>·К/Вт, що

відповідає вимогам до утеплення зовнішніх стін згідно ДБН В.2.6-31:2021 для II температурної зони України [17].

У каркасному будівництві та при утепленні фасадів мінеральна вата часто застосовується у вигляді плит щільністю 90–135 кг/м<sup>3</sup>, які забезпечують достатню жорсткість, стійкість до вітрового навантаження і збереження форми без усадки. У дахових конструкціях та перекриттях використовують рулонні або матові варіанти утеплювача з меншою щільністю (до 50 кг/м<sup>3</sup>) [18].

Завдяки високій паропроникності, матеріал не перешкоджає виведенню вологи з конструкції, що позитивно впливає на мікроклімат у приміщеннях. Водночас необхідне застосування пароізоляційних і гідрозахисних мембран для запобігання зволоженню утеплювача, яке значно знижує його ефективність.

З точки зору екологічної безпеки, сучасні зразки мінеральної вати виготовляються з використанням біостійких зв'язувальних речовин без формальдегідів, що робить їх придатними для утеплення житлових приміщень. Утилізація відходів можлива як ізоляційний наповнювач або з поверненням до вторинної переробки.

Мінераловатні утеплювачі добре поєднуються з іншими екологічними будівельними матеріалами, такими як CLT-панелі, масивна деревина, арболіт та солом'яні панелі. Таким чином, вони є універсальним рішенням як для нових енергоефективних будівель, так і для реконструкції існуючого житлового фонду.

7) Солом'яні панелі є сучасною формою відроджених традиційних технологій. Вони складаються з щільно спресованої соломи, що фіксується дерев'яним каркасом і додатково обробляється вогне- та біозахистом. Такі панелі можуть бути несучими або заповнюючими й відзначаються високою паропроникністю та теплоізоляційними властивостями ( $\lambda \approx 0,045\text{--}0,055 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ) [1, 2, 19]. Завдяки природному походженню, матеріал є абсолютно екологічним і придатний для будівництва енергоефективних малоповерхових будинків.

8) Арболіт – легкий бетон на основі дерев'яної тріски (щепи), змішаної з цементним в'язучим. Має добрі теплоізоляційні та звукоізоляційні властивості ( $\lambda \approx 0,07\text{--}0,09$  Вт/м·К), щільність – 500–900 кг/м<sup>3</sup>. Матеріал паропроникний, біологічно стійкий, але потребує захисту від вологи [2, 4].

9) Фіброліт – суміш деревинної стружки з цементом та іноді мінеральними добавками. Він має меншу щільність і жорсткість порівняно з арболітом, проте краще піддається обробці та має добру звукоізоляцію. Його часто застосовують як утеплювач або шумоізоляційний шар у конструкціях стін [6].

10) Монолітний пінобетон – це ніздрюватий бетон з пористою структурою, що виготовляється без використання автоклавного тверднення. Його щільність варіюється від 300 до 1200 кг/м<sup>3</sup> залежно від призначення. Має низьку теплопровідність ( $\lambda \approx 0,06\text{--}0,12$  Вт/м·К), добру пожежну безпеку та високу технологічність при влаштуванні безшовних стін або плит [3-4].

11) Автоклавний газобетон – популярний блоковий матеріал, що поєднує легкість, високу несучу здатність і теплоізоляційні властивості. Типові показники:  $\lambda = 0,09\text{--}0,13$  Вт/м·К, щільність – 400–700 кг/м<sup>3</sup> [6, 16]. Завдяки точним геометричним розмірам і простоті укладання, його широко застосовують у каркасно-блочному та малоповерховому будівництві.

12) Керамзитобетон виготовляється з цементного в'язучого та керамзитового заповнювача – спученої обпаленої глини. Цей матеріал має щільність 800–1400 кг/м<sup>3</sup>, високу морозостійкість, низьке водопоглинання та стійкість до біологічного впливу [6, 7]. Його застосовують для зовнішніх стін, перемичок і перегородок у житловому будівництві.

Усі згадані матеріали були проаналізовані з урахуванням таких критеріїв: теплопровідність, вуглецевий слід, екологічність, пожежна безпека, паропроникність, довговічність і технологічність монтажу. Результати цього аналізу відображені у подальших графіках у ГЧ, а також узагальнені в SMART-оцінці ефективності (розділ 3).

З проведеного аналізу випливає, що найбільш збалансованими теплоізоляційними матеріалами з точки зору сталого будівництва є целюозна ековата, солома, деревоволокнисті панелі та утеплювачі з волокон льону і коноплі. Вони поєднують у собі прийнятні теплотехнічні властивості, екологічну чистоту, біорозкладність і сприятливий вплив на мікроклімат житла.

Таким чином, впровадження натуральних утеплювачів у житлове будівництво є перспективним напрямом з огляду на цілі декарбонізації, зменшення екологічного сліду будівель та підвищення енергоефективності житлового фонду України.

## 1.2 Адаптація міжнародних стандартів до екологічного утеплення в житловому будівництві України

### 1.2.1 Орієнтири канадського досвіду

Канадські Design Guidelines & Construction Standards (далі – DGCS) містять цілий розділ, присвячений енергоефективності, стійкості до вологи, теплоізоляції та вибору матеріалів із низьким вуглецевим слідом (розділи: Envelope Performance, Thermal Insulation, Low-Carbon Materials) [20]. Основною вимогою є забезпечення мінімального опору теплопередачі  $R = 3,5\text{--}5,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  для зовнішніх стін житлових об'єктів. Це відповідає або перевищує норми ДБН В.2.6-31:2021 для першої температурної зони України [17].

Документ рекомендує використовувати модульні дерев'яні панелі, целюозну ізоляцію, CLT (cross-laminated timber) у поєднанні з природними утеплювачами (льон, конопля, солома). При цьому підкреслюється важливість пароізоляції та відведення конденсату, що є критичним фактором довговічності утеплювача.

### 1.2.2 Порівняння матеріалів за DGCS

За канадськими нормами теплоізоляційні матеріали оцінюються за такими критеріями:

- R-value (загальний опір теплопередачі на товщину 1 дюйм / 25.4 мм);
- екологічність походження (поновлювані, перероблені, біодеградовані);
- вогнестійкість (не нижче Class B або еквівалент європейському B-s2, d0);
- тривалість життєвого циклу (мінімум 50 років).

У таблиці 1.1 нижче наведено порівняння типових утеплювачів з точки зору стандартів DGCS.

Таблиця 1.1 – Порівняння типових утеплювачів за стандартом DGCS

Матеріал	R-Value (дюйм)	$\lambda$ , Вт/м·К	Клас вогнестійкості	Стійкість до вологи	Екологічність
Целюлоза	3.2–3.7	0.040–0.048	B	середня	дуже висока
Льон	3.5	0.042	B	середня	висока
Конопля	3.0–3.3	0.045–0.050	B	середня	висока
Мінеральна вата	3.7–4.3	0.035–0.045	A1 / B-s1, d0	висока	середня
Пінополістирол	4.0–5.0	0.030–0.033	B–C	висока	низька

### 1.2.3 Потенціал впровадження в Україні

Впровадження подібних стандартів у житлове будівництво України потребує:

- адаптації конструктивних рішень для CLT і каркасних стін із природними утеплювачами;
- узгодження з нормами вогнестійкості згідно з ДСТУ EN 13501-1:2024 [21];
- перегляду методів монтажу і пароізоляції в умовах континентального клімату;
- субсидіювання місцевого виробництва екоутеплювачів (льон, солома, костриця).

З огляду на регіональні потреби, найбільш доцільним є застосування модульних систем з древокомпозитних панелей або арболіту з конопляною основою, що відповідають принципам low-carbon building і рекомендовані в DGCS.

На рисунку 1.1 наведено порівняння теплоізоляційних властивостей різних матеріалів згідно з міжнародними будівельними стандартами, зокрема Design Guidelines & Construction Standards (DGCS), що діють у Канаді. Показник R-Value, який використовується в цих стандартах, відображає опір теплопередачі матеріалу при товщині 1 дюйм (25,4 мм). Чим вищий цей показник, тим ефективніше матеріал зберігає тепло в огорожувальній конструкції.

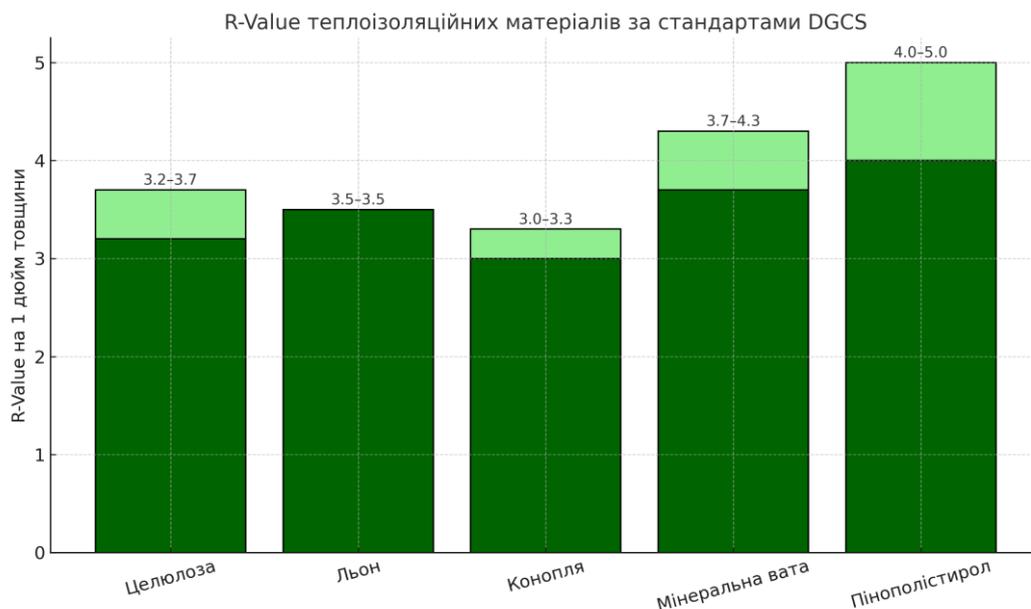


Рисунок 1.1 – Діапазони R-Value теплоізоляційних матеріалів згідно з канадськими стандартами DGCS

Як видно з графіка 1.1:

- Пінополістирол має найвищий діапазон R-Value (4.0–5.0), однак його екологічність низька через нафтове походження та складність утилізації.

- Мінеральна вата демонструє також високі показники (3.7–4.3), але може втрачати ефективність за високої вологості.
- Целюлоза, льон та конопля мають дещо нижчі значення R-Value (в межах 3.0–3.7), однак суттєво перевершують інші матеріали за екологічністю та біобезпекою.

Ці показники підтверджують доцільність використання натуральних утеплювачів в українському житловому будівництві як ефективної та сталої альтернативи синтетичним теплоізоляційним матеріалам. Особливо це актуально в умовах децентралізованого теплозабезпечення, підвищення тарифів на енергоносії та стратегічного курсу на енергоефективність.

Таким чином, застосування утеплювачів на основі коноплі, соломи чи древокомпозитів здатне забезпечити необхідні теплотехнічні показники при збереженні екологічного балансу та довгострокової енергоекономії.

### 1.3 Нормативні вимоги до опору теплопередачі огорожувальних конструкцій

У системі енергозбереження житлових будівель одним із ключових параметрів є опір теплопередачі огорожувальних конструкцій, який визначає здатність стіни, даху, перекриття або підлоги протидіяти тепловтратам. Відповідно до вимог ДБН В.2.6-31:2021, мінімально допустимі значення R мають забезпечувати нормативний рівень теплозахисту залежно від кліматичного району, функціонального призначення будівлі та режиму її експлуатації. Згідно з п. 5.2 ДБН В.2.6-31:2021, ці значення можуть бути збільшені при реконструкції або будівництві енергоефективного або пасивного будинку [17]. Зниження вимог можливе лише в обґрунтованих випадках (наприклад, при монолітному фасаді з високою інерційністю), і за умови компенсації втрат іншими заходами з енергоефективності.

Для досягнення нормативного рівня, необхідно правильно підібрати утеплювач із низьким значенням  $\lambda$  (теплопровідність  $\leq 0,040$  Вт/м·К) та

забезпечити достатню товщину шару. Наприклад, щоб досягти  $R = 3,3 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  при використанні матеріалу з  $\lambda = 0,04 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$ , товщина утеплювача має становити не менше 132 мм.

Невідповідність нормам опору теплопередачі призводить до перевищення гранично допустимих тепловтрат, збільшення витрат на опалення та не дозволяє будівлі відповідати критеріям енергетичної ефективності згідно з Законом України «Про енергетичну ефективність будівель» [22].

Таким чином, правильний вибір теплоізоляційного матеріалу є вирішальним чинником не лише для забезпечення нормативних значень  $R$ , але і для досягнення загальної енергоефективності будівлі.

#### 1.4 Гігієнічні, екологічні та пожежні вимоги до утеплювачів

Згідно з чинною нормативною базою України, до теплоізоляційних матеріалів, що застосовуються в житловому будівництві, висуваються не лише теплотехнічні, а й гігієнічні, екологічні та протипожежні вимоги, які забезпечують безпеку експлуатації будівель для мешканців.

##### *Гігієнічні вимоги*

Відповідно до Державних санітарних норм і правил (ДСанПіН 2.2.4-171-10), утеплювачі не повинні містити речовини, що виділяють токсичні чи канцерогенні сполуки у внутрішнє повітря. Основними показниками безпеки є [23]:

- відсутність формальдегіду, фенолформальдегідних смол, аміаку;
- низький рівень виділення летких органічних сполук (VOC);
- пилова емісія при монтажі та експлуатації;
- нейтральність до органів дихання та шкіри.

Для нових матеріалів також рекомендується наявність сертифікатів екологічної безпеки, таких як «Blue Angel», «Ecomaterial», «Cradle to Cradle» тощо.

### *Екологічні вимоги*

На етапі життєвого циклу матеріалу оцінюється [1]:

- енерговитрати на виробництво (індекс embodied energy, MJ/kg);
- вуглецевий слід ( $\text{g CO}_2/\text{m}^2$ );
- можливість переробки або біодеградації після виведення з експлуатації;
- використання вторинної сировини.

Матеріали, виготовлені з натуральних відновлюваних ресурсів (ековата, солома, льон, деревоволокнисті плити), мають низький екологічний вплив та швидко утилізуються без шкоди для довкілля.

### *Пожежні вимоги*

Пожежна безпека теплоізоляційних матеріалів регламентується ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» та ДСТУ EN 13501-1:2024, згідно з якими утеплювачі класифікуються за групами горючості (від А1 – негорючі, до F – сильно горючі). Основні показники [21, 24]:

- група горючості (Г1–Г4);
- димоутворювальна здатність (Д1–Д3);
- токсичність продуктів горіння (Т1–Т4).

Найбезпечнішими є матеріали класу А1–А2 (мінеральна вата, деревоволокнисті утеплювачі з антипіренами). Пінополістирол та інші полімерні утеплювачі мають низький клас вогнестійкості (В2–В3, Г3–Г4) і вимагають додаткових протипожежних заходів.

Таким чином, для житлових будинків рекомендованими є екологічно безпечні, низькотоксичні та помірно вогнестійкі матеріали, які забезпечують комфорт та безпеку мешканців, мінімізуючи ризики при монтажі та експлуатації.

1.5 Роль теплоізоляції у формуванні енергоефективності житлових будівель

Енергоефективність будівель є одним із пріоритетних напрямів сучасного будівництва, особливо в умовах зростання цін на енергоносії та вимог до зниження викидів парникових газів. Згідно з Законом України «Про енергетичну ефективність будівель» (2017 р.), теплова модернізація огороджувальних конструкцій є ключовим елементом для досягнення класів енергетичної ефективності «В» і вище.

Теплоізоляція огороджувальних конструкцій (стіни, покрівля, перекриття, підлога) має прямий вплив на:

- зниження тепловтрат в опалювальний період;
- зменшення навантаження на інженерні системи опалення та вентиляції;
- підвищення температурного комфорту у приміщеннях;
- зниження експлуатаційних витрат на енергію;
- покращення мікроклімату та якості повітря в приміщеннях.

За даними Державного агентства з енергоефективності, частка тепловтрат через неналежно утеплені стіни, покрівлю та вікна може сягати до 70 % загальних втрат енергії в житлових будівлях. Саме тому утеплення з використанням ефективних матеріалів є найбільш економічно доцільним способом зниження витрат на опалення.

Енергоефективні будівлі також мають підвищену ринкову вартість та забезпечують триваліший термін експлуатації конструкцій завдяки стабілізації температурно-вологісного режиму.

Слід відзначити, що відповідний рівень теплоізоляції є обов'язковим компонентом для отримання сертифікату енергоефективності будівлі, що передбачає:

- відповідність нормативам опору теплопередачі;
- забезпечення повітропроникності та паропроникності огороджувальних елементів;
- оптимальну товщину та якість монтажу утеплювача.

У міжнародній практиці (програми EU Green Deal, Passive House, NZEB) акцент робиться не лише на зменшенні теплопровідності, а й на виборі екологічно нейтральних або позитивних утеплювачів, які сприяють зменшенню вуглецевого сліду будівлі впродовж усього життєвого циклу.

Отже, раціональний вибір теплоізоляційного матеріалу визначає ефективність енергоспоживання, комфорт, довговічність і ступінь екологічної відповідальності проєкту житлового будівництва.

## 1.6 Сучасні тенденції в проєктуванні енергоефективного оболонкового контуру

Оболонковий контур будівлі – це сукупність усіх огорожувальних конструкцій, що розділяють внутрішній об'єм із зовнішнім середовищем: зовнішні стіни, покрівлі, віконні та дверні прорізи, перекриття над підвалом та підлога по ґрунту. Його теплозахисні характеристики визначають загальну ефективність споживання енергії в будівлі.

У сучасній архітектурі та будівництві сформувались кілька ключових тенденцій у проєктуванні енергоефективного оболонкового контуру [17-18, 25-26]:

### *1. Інтеграція високоефективної теплоізоляції*

Застосування матеріалів з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda \leq 0,040$  Вт/(м·К) є стандартом для забезпечення необхідного опору теплопередачі. Товщина шару утеплювача проєктується з урахуванням кліматичних умов та вимог ДБН. Перевага надається натуральним утеплювачам з низькою теплопровідністю та високою паропроникністю (ековата, льон, деревоволокно).

### *2. Забезпечення герметичності та вологорегуляції*

Досягається шляхом застосування пароізоляційних плівок, вітрозахисних мембран, багатошарових конструкцій з безперервним шаром

утеплювача. Герметичний контур дозволяє зменшити тепловтрати за рахунок неконтрольованої інфільтрації повітря, особливо у зоні примикань та стиків.

### *3. Мінімізація теплових містків*

Сучасне проєктування передбачає виключення лінійних теплових втрат у зоні стиків фундаментів, віконних перемичок, балконів, анкерів та кріплень. Це реалізується через:

- безперервність теплоізоляційного шару по периметру будівлі;
- застосування ізоляційних елементів на вузлах примикання;
- розробку індивідуальних вузлів з перевіркою теплотехнічної однорідності ( $\Psi$ -коефіцієнт).

### *4. Використання пасивних сонячних надходжень*

У проєктуванні фасадів враховується орієнтація по сторонах світу, розміщення прозорих конструкцій для максимальної інсоляції у зимовий період. Водночас, передбачаються засоби сонцезахисту для зниження ризику перегріву влітку.

### *5. Застосування природних матеріалів із низьким вуглецевим слідом*

Згідно з принципами зеленого будівництва, перевага надається матеріалам, що виготовляються з відновлюваних або вторинних ресурсів, легко утилізуються, не потребують великої кількості енергії при виробництві. Такими є солом'яні панелі, арболіт, льоноволокнисті утеплювачі, дерев'яні CLT-панелі.

### *6. BIM-проєктування і енергоаудит*

Використання інформаційного моделювання будівель (BIM) дозволяє проєктувати теплові оболонки з точним урахуванням втрат, виконувати теплотехнічні розрахунки в динаміці, моделювати сценарії експлуатації. У практиці країн ЄС є обов'язковим проведення енергоаудиту ще на етапі проєктування.

Таким чином, сучасні тенденції формують підхід до оболонкового контуру як до цілісної, енергоефективної, паропроникної та екологічно

збалансованої системи, де теплоізоляція відіграє базову роль у зниженні енергоспоживання та підвищенні комфортності проживання.

1.7 Сучасні утеплюючі матеріали: технічні характеристики, переваги і недоліки

Мінераловатні утеплювачі є найбільш поширеною групою теплоізоляційних матеріалів, які отримують шляхом плавлення гірських порід або скляних відходів із подальшим витягуванням волокон. Переваги [1-7]:

- Висока вогнестійкість – матеріал не підтримує горіння, витримує температуру понад 1000 °С, що забезпечує пожежну безпеку конструкцій;
- Добра теплоізоляція – стабільні значення  $\lambda$  дозволяють ефективно знижувати тепловтрати;
- Паропроникність – забезпечує "дихаючі" конструкції та сприяє регулюванню вологості;
- Звукоізоляційні властивості – волокниста структура поглинає акустичні хвилі;
- Стійкість до хімічних речовин – не вступає в реакцію з бетоном, деревиною, металами.

Недоліки:

- Пиління та подразнення шкіри при монтажі – потребує використання засобів індивідуального захисту;
- Низька водостійкість – при зволоженні втрачає теплоізоляційні властивості;
- Потреба у пароізоляції – необхідна додаткова обробка для запобігання накопиченню вологи;
- Частково синтетичні сполучні – фенолформальдегідні смоли, що можуть виділяти VOC;
- Відносно висока енергоємність виробництва – базальтове волокно вимагає температур понад 1400 °С.

Полімерні утеплювачі – це група теплоізоляційних матеріалів, які виготовляються на основі синтетичних полімерів. Найпоширенішими з них є:

- Пінополістирол (ППС) – як у вигляді пінопласту (експандованого), так і у вигляді екструдованого ППС (XPS);
- Пінополіуретан (ППУ) – жорсткий або напилюваний;
- Пінополіетилен (ППЕ) – з попереднім хімічним зшиванням або без нього;
- ПІР-плити (поліізоціанурат) – модифікація ППУ з покращеною вогнестійкістю.

Технічні характеристики найбільш поширених полімерних утеплювачів наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики полімерних утеплювачів

Матеріал	$\lambda$ , Вт/(м·К)	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Група горючості	Водопоглинання, %	Паропроникність, мг/(м·год·Па)
ППС (пінопласт)	0,038–0,045	10–25	Г3–Г4 (горючий)	до 4	~0,05
XPS	0,030–0,036	28–45	Г1–Г4	$\leq 1$	<0,01
ППУ	0,022–0,030	30–60	Г2–Г3	$\leq 1$	майже нульова

Переваги полімерних утеплювачів [1-7]:

- Низький коефіцієнт теплопровідності – до 0,022 Вт/(м·К), що дозволяє досягати високих значень опору теплопередачі при малій товщині;
- Малий об'ємна вага – знижує навантаження на конструкцію;
- Висока водостійкість – не поглинають вологу, підходять для цоколів, фундаментів, дахів;
- Простий монтаж – матеріали легко ріжуться, фіксуються та можуть напилюватися (ППУ);
- Довговічність – термін служби до 30–50 років без значної втрати властивостей.

Недоліки та ризики експлуатації:

- Горючість – основна проблема. Полімерні утеплювачі підтримують горіння, при нагріванні виділяють токсичні речовини (стирол, ізоціанати, ціанистий водень);
- Низька паропроникність – матеріали «не дихають», що може спричиняти накопичення вологи у несучих стінах;
- Токсичність при згорянні – продукти термічного розкладу становлять небезпеку для здоров'я;
- Нестійкість до УФ-випромінювання – потребують захисного шару;
- Низька екологічність – виготовляються з нафтохімічної сировини, не розкладаються в природі, утилізація складна;
- Нестабільність при тривалому температурному впливі – можуть змінювати геометрію та характеристики.

До комбінованих або конструкційно-теплоізоляційних матеріалів належать ті, що поєднують несучу здатність з теплоізоляційними властивостями. Це дозволяє одночасно виконувати функцію конструкції та утеплювача. У контексті житлового будівництва особливу увагу приділяють наступним матеріалам: пінобетон, газобетон, вермикуліт, перліт, а також арболіт і фіброліт (розглядаються в п. 1.1).

Пінобетон – це пористий бетон, отриманий шляхом введення у цементно-піщану суміш піноутворювача, що утворює дрібнопористу структуру. Переваги: легкість, доступність, вогнестійкість, відносна екологічність, можливість виготовлення на місці. Недоліки: усадка, крихкість, високе водопоглинання при низькій щільності [5].

Газобетон – автоклавний пористий бетон з рівномірною структурою завдяки хімічному реагуванню алюмінієвого порошку в суміші. Переваги: точна геометрія блоків, швидке зведення, низьке навантаження на фундамент. Недоліки: крихкість, потреба в армуванні, втрата властивостей при зволоженні, промислова енергоємність [5].

Вермикуліт – це розширений природний мінерал (силікат магнею), який після термообробки набуває пухкої структури. Використовується як наповнювач або насипний утеплювач. Теплопровідність – 0,05–0,08 Вт/(м·К). Переваги: екологічність, негорючість, біостійкість. Недоліки: пилення, складність фіксації в конструкціях, низька механічна міцність [6].

Перліт – вулканічне скло, яке після спучування стає легким, пористим утеплювачем. Теплопровідність – 0,04–0,07 Вт/(м·К). Переваги: висока теплостійкість, екологічність, звукоізоляційні властивості. Недоліки: пил, потреба в захисті від зволоження, немає конструктивної міцності [6].

Для обґрунтованого вибору теплоізоляційного матеріалу у житловому будівництві важливо порівняти найбільш поширені варіанти за ключовими характеристиками: теплопровідністю, вологопоглинанням, паропроникністю, вогнестійкістю, довговічністю, екологічністю та економічною доцільністю.

У таблиці 1.3 наведено узагальнені показники для мінеральних, полімерних і комбінованих утеплювачів.

Таблиця 1.3 – Порівняння основних характеристик традиційних утеплювачів

Показник / Матеріал	Мінеральна вата	Пінополістирол (ППС)	Екструдований ППС (XPS)	Газобетон	Перліт
1	2	3	4	5	6
Теплопровідність, Вт/(м·К)	0,035–0,045	0,038–0,045	0,030–0,036	0,09–0,14	0,05–0,07
Щільність, кг/м <sup>3</sup>	30–200	10–25	28–45	400–600	60–120
Паропроникність, мг/(м·год·Па)	0,3–0,5	~0,05	<0,01	висока	висока
Водопоглинання, %	до 2	до 4	≤ 1	високе	середнє
Горючість	Негорючий	Г3–Г4 (горючий)	Г1–Г4	НГ	НГ
Токсичність при згорянні	Немає	Висока	Висока	Відсутня	Відсутня
Довговічність, років	30–50	до 30	до 40	50+	30+
Екологічність	Помірна	Низька	Низька	Помірна	Висока
Вартість, грн/м <sup>3</sup>	2000–3500	1200–1800	1800–2500	1500–2500	2500–3500
Рекомендована зона застосування	стіни, дахи, фасади	фасади, підлоги	фундаменти, плоскі дахи	стіни	міжповерхові перегородки, заповнення

Отже:

- Найменша теплопровідність – у XPS та пінополіуретану, що забезпечує найменшу товщину утеплювача при однаковому R.
- Найбільшу екологічність і вогнестійкість демонструє перліт і мінеральна вата.
- Газобетон дозволяє сполучати теплоізоляційні властивості з конструктивними функціями.
- Низька паропроникність та горючість пінополістиролу вимагає обмеженого застосування та ретельного монтажу.

### Висновки за розділом 1

Проведений аналіз свідчить, що солома є ефективним теплоізоляційним матеріалом з точки зору як енергоощадності, так і вартості. В умовах українського ринку її застосування в системах житлового будівництва є технічно доцільним і економічно вигідним, особливо в регіонах із високим сільськогосподарським потенціалом. Використання солом'яних панелей сприяє зменшенню вуглецевого сліду будівництва, знижує експлуатаційні витрати й забезпечує комфортні умови проживання протягом року.

Мінераловатні утеплювачі залишаються ефективним рішенням для теплоізоляції стін, перекриттів, вентиляованих фасадів та скатних дахів. Проте, через вплив на здоров'я при монтажі, погіршення теплоізоляційних властивостей при зволоженні та часткову екологічну невідповідність, вони не можуть бути визнані повністю екологічно чистими. Водночас вони часто поєднуються з натуральними утеплювачами в комбінованих системах для оптимізації вартості та ефективності.

Полімерні утеплювачі демонструють найвищу теплоефективність серед промислових рішень, проте значно поступаються в екологічності, пожежній безпеці та паропроникності. Їх доцільно застосовувати лише у тих випадках, коли потрібна тонка, легка та вологостійка ізоляція (цоколь, дах, фундамент),

але з обов'язковим урахуванням заходів протипожежного захисту та герметичного монтажу.

Комбіновані матеріали дають можливість поєднувати теплоізоляцію і несучу здатність, що спрощує конструкцію і знижує загальні витрати на будівництво. Водночас більшість із них мають обмежену сферу застосування через крихкість, водопоглинання та низьку довготривалу міцність, тому потребують додаткового захисту та чітких умов експлуатації. У контексті екологічності вермикуліт і перліт є безпечними природними матеріалами, тоді як газо- та пінобетон мають промислове походження, але є енергоефективними та придатними для пасивного будівництва.

Жоден із традиційних матеріалів не є універсальним. Вибір повинен здійснюватися на основі балансу теплотехнічних, економічних, екологічних та пожежних показників з урахуванням конкретних умов будівництва. Для екологічно орієнтованих проєктів перевага має надаватися матеріалам з природної сировини, високою паропроникністю і низьким вуглецевим слідом, що буде детально розглянуто в наступному розділі.

## РОЗДІЛ 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТИХ УТЕПЛЮВАЧІВ

2.1 Аналіз ефективності застосування соломи як екологічно чистого теплоізоляційного матеріалу

У сучасному житловому будівництві зростає потреба у матеріалах, які поєднують теплоізоляційні властивості, економічну доцільність і екологічну безпечність. Одним із таких матеріалів є солома, яка, будучи побічним продуктом аграрного виробництва, не лише доступна та відновлювана, а й придатна для створення ефективних теплозахисних оболонок будівель. Водночас технологія її використання не потребує значних енергозатрат або спеціалізованого обладнання, що робить її особливо привабливою для локального малоповерхового будівництва.

Солома як теплоізоляційний матеріал має низький коефіцієнт теплопровідності ( $\lambda = 0,045$  Вт/м·К), що дозволяє досягати високого термічного опору при товщині стіни 45–50 см. Такий шар забезпечує опір теплопередачі в межах  $R = 6–7$  м<sup>2</sup>·К/Вт, що відповідає класу енергоефективності «А» [1, 7, 19]. Важливо, що при належному ущільненні та паробар'єрному захисті цей показник є стабільним у довгостроковій експлуатації.

Згідно з проведеним економічним аналізом, вартість спорудження житлового будинку площею 150 м<sup>2</sup> із солом'яним наповненням становить близько 1,32 млн рублів, що суттєво нижче у порівнянні з будівлями з традиційних матеріалів (наприклад, з цегли – 2,7 млн, з дерева – 3,0 млн рублів). Основними джерелами економії є:

- зменшене навантаження на фундамент (через легкість конструкції);
- мінімальні витрати на матеріали та оздоблення;
- відсутність необхідності в складній техніці;

- менша кількість робочих днів.

Частка витрат на матеріали в загальній структурі собівартості становить 57%, що свідчить про низький рівень залежності від вартості праці та енергоресурсів.

Солома є біорозкладним, нетоксичним матеріалом, який не виділяє шкідливих летких речовин і має нульовий вуглецевий слід у виробництві. У порівнянні з синтетичними утеплювачами, вона не потребує значних енергозатрат на виготовлення й транспортування. При правильному монтажі солом'яні панелі не створюють «містків холоду» та мають тривалий термін служби без втрати властивостей.

## 2.2 Аналіз екологічних і конструктивних властивостей масивної деревини як ефективного теплоізоляційного та конструктивно-оздоблювального матеріалу

Одним із ключових напрямів сталого розвитку в будівництві є впровадження екологічно чистих матеріалів, які одночасно забезпечують енергоефективність, зменшення викидів вуглецю та високу функціональну придатність протягом усього життєвого циклу будівлі. В цьому контексті масивна деревина, зокрема кросламінована деревина (CLT), клеєні бруси (GLT), дюбельовані (DLT) або цвяховані панелі (NLT), розглядається не лише як несучий матеріал, а і як ефективний теплоізолюючий елемент у багатофункціональних огорожувальних конструкціях [8-15].

Матеріали на основі масивної деревини мають низький коефіцієнт теплопровідності ( $\lambda \approx 0,10\text{--}0,13$  Вт/м·К), який, у поєднанні з багатошаровою структурою панелей та можливістю інтеграції додаткових теплоізоляційних шарів, дозволяє досягти високих показників термічного опору огорожувальних конструкцій. Зокрема, за даними європейських досліджень, стіна з CLT-панелі товщиною 100–120 мм у поєднанні з шаром целюлозного

утеплювача або мінеральної вати товщиною 150–200 мм може відповідати вимогам енергоефективності для пасивного будинку ( $R \geq 6 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ).

Окрім теплофізичних властивостей, важливе значення має також вібраційна поведінка та якість стикових з'єднань дерев'яних панелей, оскільки вони безпосередньо впливають на повітропроникність, звукоізоляцію та довговічність конструкції. Відповідно до Mass Timber Vibration Guide [8-9], правильно спроектовані масивні дерев'яні перекриття можуть забезпечити комфортне середовище проживання без помітних вібрацій, навіть у багатоповерхових будинках. При цьому монтаж панелей із заводською точністю сприяє зниженню містків холоду та забезпечує герметичність на рівні, співставному або вищому, ніж при використанні традиційних систем із бетонними чи цегляними елементами.

Додатковий аспект, що визначає ефективність застосування масивної деревини, - це якість і тип з'єднань. Як показує аналіз [10-14], вузли CLT-конструкцій мають підвищену механічну надійність, за умови правильного підбору кріплень і герметиків. Завдяки заводській прецизійності виготовлення елементів, ймовірність появи щілин або деформацій у зонах стику мінімальна. Це забезпечує не лише високу герметичність, а й довгострокову стабільність теплоізоляційних характеристик у реальних умовах експлуатації.

У порівнянні з класичними утеплювачами, такими як пінополістирол або базальтова вата, масивна деревина має низку переваг: вона є відновлюваним ресурсом, не містить шкідливих летких речовин, має нижчий вуглецевий слід, а також може бути використана як частина несучої конструкції. Таким чином, її застосування у системі «тепла стіна» дозволяє зменшити кількість окремих шарів у стіні, скоротити терміни будівництва та зменшити витрати на оздоблення.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що масивна деревина відповідає вимогам до екологічно чистих та енергоефективних матеріалів і є доцільною альтернативою традиційним рішенням при проектуванні житлових будинків. Її застосування дозволяє одночасно забезпечити теплоізоляцію,

конструктивну стабільність, екологічність і швидкість монтажу, що є ключовими критеріями у сучасному житловому будівництві, орієнтованому на принципи сталого розвитку.

Порівняльна характеристика основних теплоізоляційних матеріалів наведена в табл. 2.1 та на рис. 2.1-2.2.

Таблиця 2.1 – Порівняння теплоізоляційних матеріалів

Матеріал	Теплопровідність ( $\lambda$ ), Вт/м·К	Товщина для $R = 5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , мм	Щільність, кг/м <sup>3</sup>	Екологічність	Паропроникність	Стійкість до вологи
Солома	0,045	~225	90–120	Висока	Висока	Низька (потр. захист)
Мінеральна вата	0,040–0,050	~200–250	35–80	Середня	Висока	Середня
Пінополістирол	0,030–0,037	~150–180	15–25	Низька	Низька	Висока
Масивна деревина	0,11–0,13	~600–650	400–500	Висока	Середня	Середня

Рисунок 2.1 демонструє, що найнижчу теплопровідність має пінополістирол, однак солома й мінеральна вата мають схожі показники (~0,045 Вт/м·К), забезпечуючи хорошу теплоізоляцію.

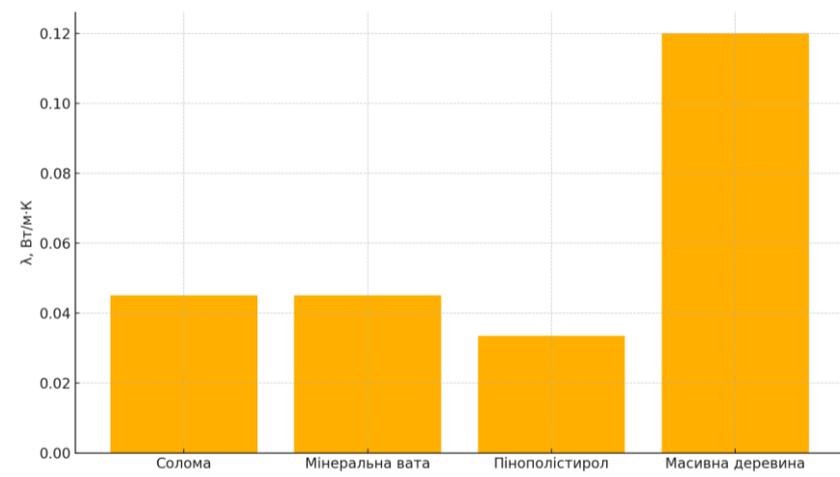


Рисунок 2.1 – Коефіцієнт теплопровідності основних теплоізоляційних матеріалів

Рисунок 2.2 показує, що для досягнення  $R = 5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  – соломі та мінеральній ваті потрібно  $\sim 22\text{--}23 \text{ см}$ , пінополістиролу – лише  $\sim 16 \text{ см}$ , але масивна деревина потребує суттєво більшої товщини ( $\sim 62 \text{ см}$ ), що обмежує її застосування як самостійного утеплювача.

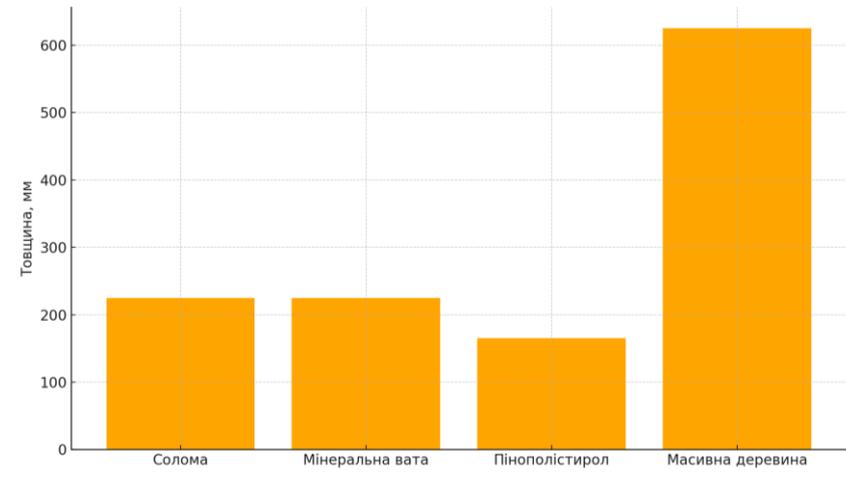


Рисунок 2.2 – Необхідна товщина утеплювача для досягнення опору теплопередачі  $R = 5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$

2.3 Аналітичне обґрунтування доцільності застосування збірних стінових панелей в умовах українського будівництва

### 2.3.1 Стінові панелі у каркасному будівництві

У контексті сучасних викликів, що постали перед будівельною галуззю України – таких як нестабільність ринку будівельних матеріалів, дефіцит кваліфікованої робочої сили, зростання вартості енергоносіїв і сезонні обмеження виконання робіт – усе більшої актуальності набувають технології індустріального домобудівництва, зокрема застосування збірних стінових панелей. Іноземний досвід, зокрема результати дослідження J. Kuzdas [27-28], демонструє, що використання prefab-технологій дозволяє суттєво підвищити ефективність будівництва за рахунок скорочення строків, стабілізації якості та оптимізації загальних витрат.

Згідно з наведеним дослідженням, у США зведення багатоквартирного житлового будинку із застосуванням заводських стінових панелей дозволяє скоротити термін виконання каркасних робіт у середньому на 29 робочих днів у порівнянні з традиційною технологією каркасного зведення (stick framing). У грошовому вираженні така оптимізація призводить до економії, що компенсує вищу початкову вартість самих збірних елементів. Аналіз витрат показав, що середня вартість 1 м<sup>2</sup> при використанні prefab-панелей є вищою приблизно на \$1.75 (або 10–12%), однак цей «преміум» повністю перекривається прискореним введенням об'єкта в експлуатацію, зменшенням витрат на оренду техніки, енергозабезпечення, тимчасові споруди, а також скороченням термінів користування дорогими будівельними кредитами.

Адаптація цього підходу до умов України виявляє ще більше передумов для його ефективного впровадження. Сучасний український ринок характеризується нестачею кваліфікованих кадрів, особливо в сегменті каркасного будівництва, що спричиняє зниження продуктивності та нерідко – погіршення якості виконання робіт. Саме тому запровадження prefab-технологій може суттєво стабілізувати якісні показники та знизити залежність від рівня підготовки польового персоналу. В умовах сезонних коливань температур, особливо у північних і центральних регіонах країни, важливо забезпечити «закриття контуру» будівлі до настання зимового періоду. Заводське виготовлення панелей дозволяє здійснювати паралельне виконання робіт: під час влаштування фундаментів на будівельному майданчику панелі вже готуються на виробництві, що скорочує загальну тривалість будівництва.

Економічні розрахунки в українських умовах також свідчать на користь використання збірних рішень. Згідно з моделлю, адаптованою до національного ринку, вартість монтажу prefab-панелей може становити приблизно 4 200–4 800 грн/м<sup>2</sup> проти 3 500–4 000 грн/м<sup>2</sup> при традиційному stick-framing, проте за рахунок скорочення тривалості будівництва на 25–30 днів досягається економія коштів у межах 150–300 тис. грн лише на тимчасовій інфраструктурі об'єкта. Додатково, швидше введення будинку в експлуатацію

забезпечує раніше початок реалізації житла або оренди приміщень, що може дати забудовнику до 400–500 тис. грн додаткового доходу [29].

Таким чином, застосування збірних стінових панелей в українському житловому будівництві може бути техніко-економічно доцільним та раціональним рішенням, особливо у проектах середньої щільності забудови, соціального житла, реконструкції у щільній міській тканині та малоповерхових житлових комплексах. З урахуванням регіональних особливостей, кліматичних умов та кадрового ресурсу prefab-будівництво здатне забезпечити стабільно високу якість, скорочення термінів реалізації та підвищення економічної ефективності проектів.

### 2.3.2 CLT-панелі

CLT-панелі – це багатошарові дерев'яні елементи з взаємно перехресним орієнтуванням шарів, виготовлені без використання токсичних клейових смол, відповідно до європейських стандартів EN 16351. Завдяки цьому вони демонструють високу міцність, стійкість до деформацій, а також коефіцієнт теплопровідності на рівні 0,12–0,13 Вт/м·К [11, 30]. Це дозволяє використовувати CLT як частину огорожувальної конструкції з відповідністю до вимог ДБН В.2.6-31:2021.

Окрім екологічності, CLT-панелі мають низький вуглецевий слід, адже виробляються з поновлюваної деревини з FSC-сертифікацією. Вони не виділяють летких органічних сполук, а при правильному монтажі не потребують додаткового шару плівок чи пароізоляції.

У таблиці 2.2 наведено порівняльна характеристик основних утеплювачів для житлового будівництва.

Приклад реалізації: в Нідерландах побудовано 12-поверховий будинок з CLT-панелей – Walden V (Valckensteyn), що продемонстрував чудову енергоефективність і скорочення викидів CO<sub>2</sub> на 60% у порівнянні з аналогічною бетонною спорудою [31]. CLT активно впроваджується і в Україні – зокрема, компанії Rezult та TD VIKAR пропонують технології CLT-

будівництва з локальною сертифікацією та адаптацією до українських кліматичних умов [32].

Таблиця 2.2 – Порівняльна характеристика утеплювачів

№	Матеріал	Теплопровідність, Вт/м·К	Паропроникність	Екологічність	Вплив на здоров'я	Вартість (відносно)
1	Ековата	0,036–0,040	Висока	Висока	Безпечна	Середня
2	Льоноволокно	0,038–0,042	Висока	Висока	Безпечна	Вища
3	Деревоволокниста плита	0,040–0,045	Середня	Висока	Безпечна	Середня
4	CLT-панелі	0,12–0,13	Середня	Дуже висока	Абсолютно безпечна	Висока
5	Пінополістирол	0,030–0,040	Низька	Низька	Токсична при горінні	Низька

Таким чином, включення CLT-панелей до аналізу теплоізоляційних матеріалів є обґрунтованим, адже вони поєднують конструктивну функцію, теплоізоляцію та екологічну безпечність, відповідаючи вимогам до сталого житлового будівництва. Огляд літератури та нормативних документів показує, що в Україні та за кордоном активно впроваджуються біоутеплювачі: ековата (переробка паперу), льоноволокно, деревоволокнисті плити, конопляні мати, пробка. Вони мають такі переваги: низька теплопровідність (0,036–0,042 Вт/м·К), висока паропроникність, безпечність для здоров'я, біорозкладність, низький вуглецевий слід.

### 2.3.3 Аналіз ефективності арболітових плит як екологічного утеплювача

Арболіт – це сучасний стіновий матеріал, що складається з мінералізованого деревного заповнювача (щепи) та цементного в'язучого. Він належить до групи легких бетонів із високими теплоізоляційними властивостями та має низку переваг з точки зору екологічної безпеки, енергоефективності та технологічності.

Коефіцієнт теплопровідності арболіту становить  $\lambda \approx 0,08$  Вт/м·К, що дозволяє йому конкурувати з традиційними утеплювачами, такими як пінобетон ( $\lambda \approx 0,14$ ), керамзитобетон ( $\lambda \approx 0,50$ ) та навіть деревина ( $\lambda \approx 0,12$ ).

Відповідно до розрахунків, для досягнення нормативного опору теплопередачі  $R = 5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  товщина арболітової стіни повинна становити близько 400 мм, що цілком відповідає типу зовнішніх несучих огорожувальних конструкцій для індивідуального житлового будівництва [1, 2, 6].

Крім високих теплоізоляційних характеристик, арболіт відзначається :

- низькою щільністю (400–800 кг/м<sup>3</sup>), що зменшує навантаження на фундаменти;
- паропроникністю, близькою до деревини, що забезпечує природну регуляцію вологості в приміщенні;
- екологічною чистотою – він не містить токсичних домішок і може утилізуватися без шкоди для довкілля;
- нескладністю у виробництві – матеріал можна виготовляти із місцевої сировини з мінімальними енерговитратами.

Для наочного порівняння теплопровідності основних будівельних матеріалів, зокрема арболіту, нижче наведено рисунок 2.3.

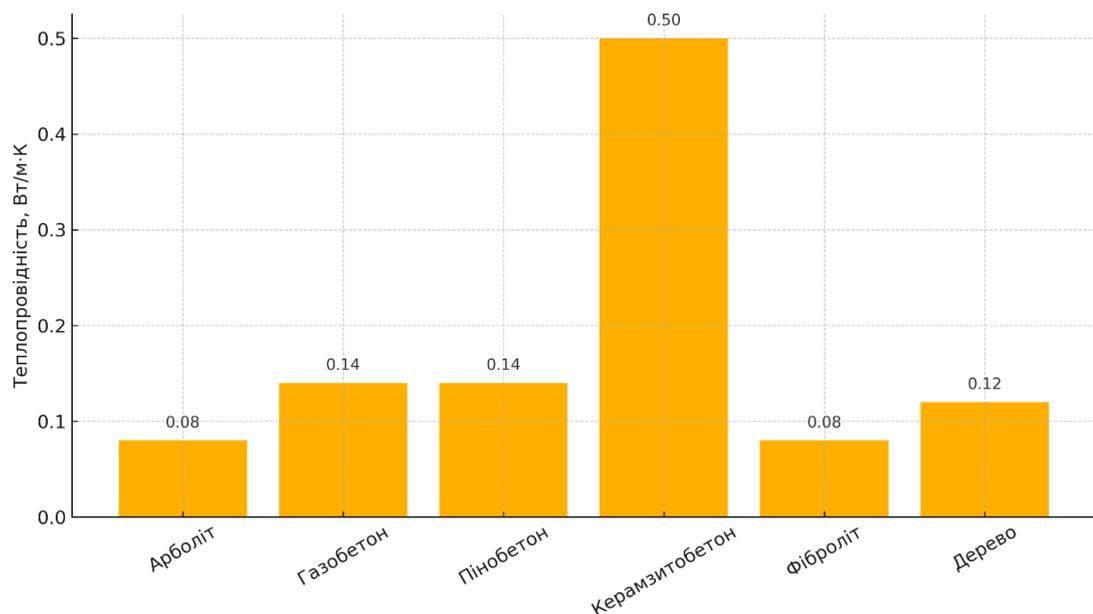


Рисунок 2.3 – Теплопровідність різних будівельних матеріалів

На графіку зображено порівняння теплопровідності арболітових плит з іншими стіновими матеріалами. Арболіт має найнижчу теплопровідність

серед представлених матеріалів ( $\sim 0,08$  Вт/м·К), що свідчить про його високу ефективність як теплоізоляційного будівельного матеріалу.

Таким чином, арболітові плити можна ефективно використовувати як одночасно конструктивний і теплоізоляційний матеріал у зовнішніх стінах житлових будинків. Їх застосування сприяє підвищенню енергоефективності об'єктів, зменшенню експлуатаційних витрат і покращенню екологічного балансу в будівельній галузі України.

#### 2.3.4 Ефективність деревокомпозитних панелей у контексті екологічного утеплення

Деревокомпозитні панелі – це сучасний багатошаровий будівельний матеріал, створений на основі дрібнодисперсної деревної фракції, змішаної з мінеральним або органічним в'язучим. Завдяки комбінації переваг деревини та полімерів, ці панелі демонструють збалансовані показники міцності, теплоізоляції та довговічності, що робить їх перспективним утеплювачем у житловому будівництві [1, 6, 33].

За результатами дослідження, викладеного в [34-35], теплофізичні характеристики деревокомпозитних панелей залежать від структури та типу в'язучого. Середній коефіцієнт теплопровідності становить  $\lambda \approx 0,065\text{--}0,075$  Вт/м·К, що дещо вище ніж у соломи або арболіту, але все ще відповідає вимогам до ефективних утеплювачів згідно з нормативами ДБН В.2.6-31:2021.

За умови товщини шару 80–100 мм, деревокомпозитна панель забезпечує опір теплопередачі  $R \approx 1,3\text{--}1,5$  м<sup>2</sup>·К/Вт, що дозволяє використовувати її як складову багатошарової зовнішньої огорожувальної системи – наприклад, у комбінованих сендвіч-панелях, вентильованих фасадах або каркасному домобудуванні.

Переваги деревокомпозитних утеплювачів включають:

- високу однорідність структури, що знижує ризики утворення містків холоду;

- стабільні геометричні характеристики, які зберігаються в умовах змінної температури й вологості;
- невелику масу (450–550 кг/м<sup>3</sup>), що забезпечує легкість монтажу;
- високу технологічність – можливість автоматизованого виробництва та адаптації до будь-яких архітектурних рішень;
- використання вторинної деревної сировини, що позитивно впливає на загальний екологічний баланс будівництва.

Крім того, деревокомпозитні панелі мають підвищену вогнестійкість завдяки просоченню мінеральними антипіренами, а також добре поєднуються з іншими екологічними матеріалами (лляна вата, целюлоза, гіпс).

У порівняльному контексті (рис. 2.4), деревокомпозитні утеплювачі займають проміжне місце між органічними та мінеральними теплоізоляційними матеріалами за рівнем теплопровідності та паропроникності, проте значно випереджають за технологічністю, екологічною доцільністю та естетичним виглядом.

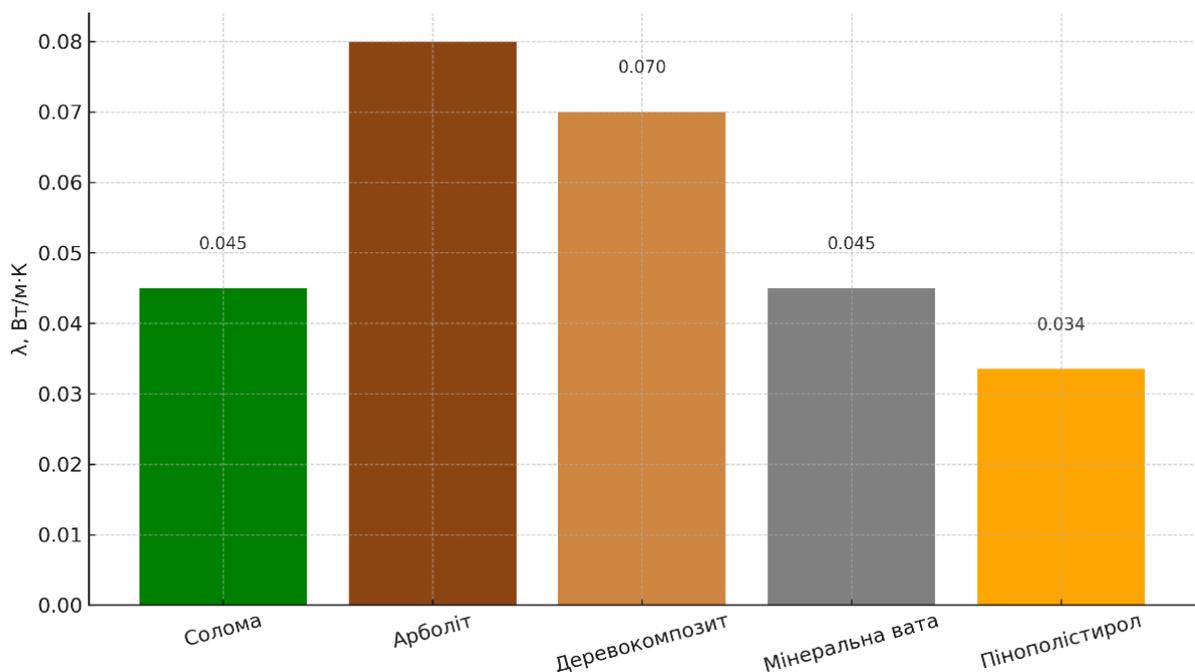


Рисунок 2.4 – Порівняння теплопровідності деревокомпозитних панелей з іншими теплоізоляційними матеріалами

Отже, деревокомпозитні панелі є конкурентоспроможним рішенням для теплозахисту житлових будинків, особливо у форматі швидкокомтованих систем і каркасної забудови. Завдяки низькій теплопровідності, високій технологічності та відносній дешевизні у виробництві, їх застосування дозволяє знижувати експлуатаційні витрати та підвищити рівень екологічності житлового середовища.

### 2.3.5 Арболіт з костриці конопель як ефективний екологічний утеплювач

Арболіт, виготовлений на основі костриці технічної коноплі, є різновидом легкого бетонного матеріалу, де як заповнювач використовується органічна сировина – подрібнена деревна частина стебла коноплі, що залишається після вилучення волокон. З огляду на сучасні тенденції сталого будівництва, інтерес до конопляного арболіту стрімко зростає, адже матеріал поєднує в собі екологічність, високі теплоізоляційні властивості та простоту виготовлення [1, 2, 6, 36].

Виробництво такого арболіту здійснюється шляхом змішування костриці з портландцементом та водою із додаванням мінералізуючих і антисептичних домішок. У результаті формується щільний, пористий та легкий блок або монолітна панель.

Оцінка теплоізоляційної ефективності матеріалу проводилася на основі показників теплопровідності. За результатами досліджень, теплопровідність арболіту на основі костриці становить:

- $\lambda = 0,065$  Вт/м·К при щільності 400 кг/м<sup>3</sup>;
- $\lambda = 0,072$  Вт/м·К при щільності 500–550 кг/м<sup>3</sup>.

У порівнянні з традиційним арболітом ( $\lambda \approx 0,08$ ), цей матеріал демонструє кращі теплоізоляційні властивості завдяки більшій кількості замкненого повітря у волокнистій структурі костриці. Для забезпечення нормативного опору теплопередачі  $R = 3,3\text{--}4,0$  м<sup>2</sup>·К/Вт (відповідно до ДБН В.2.6-31:2021 для зовнішніх стін) достатньо товщини блока 300–400 мм.

Матеріал має нейтральний вуглецевий слід, адже під час вирощування конопель абсорбується значна кількість CO<sub>2</sub>. Конопляний арболіт:

- не містить фенолів, формальдегідів або інших токсичних сполук;
- дозволяє регулювати вологісний режим приміщення завдяки високій паропроникності ( $\mu \approx 5$ );
- біостійкий – не піддається гниттю, не уражується гризунами чи грибками;
- має низьку радіоактивність і є безпечним навіть у дитячих та лікувальних закладах;
- після завершення життєвого циклу може бути повторно використаний або утилізований без шкоди для навколишнього середовища.

У таблиці 2.3 наведено порівняння основних теплоізоляційних матеріалів, включаючи арболіт на костриці.

Таблиця 2.3 – Порівняння арболіту на костриці з основними теплоізоляційними матеріалами

Матеріал	Теплопровідність $\lambda$ , Вт/м·К	Необхідна товщина для R $= 4 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , мм	Паропроникність	Щільність, кг/м <sup>3</sup>
Арболіт на костриці	0.065	260	висока	400–500
Арболіт традиційний	0.08	320	висока	500–700
Солома (у блоках)	0.045	180	дуже висока	90–120
Пінополістирол	0.0335	135	низька	15–25
Мінеральна вата	0.045	180	висока	30–80

Ці дані свідчать про те, що арболіт з костриці має порівняно високу теплоізоляційну здатність, а його щільність забезпечує баланс між теплоізоляційною та конструктивною функцією.

Графічне порівняння теплопровідності арболіту на костриці з іншими утеплювачами наведено в ГЧ роботи.

Графік 2.5 демонструє теплопровідність арболіту з костриці конопель у порівнянні з іншими екологічними утеплювачами. Матеріал має вищу теплоізоляційну здатність, ніж звичайний арболіт, і лише трохи поступається пінополістиролу та соломі.

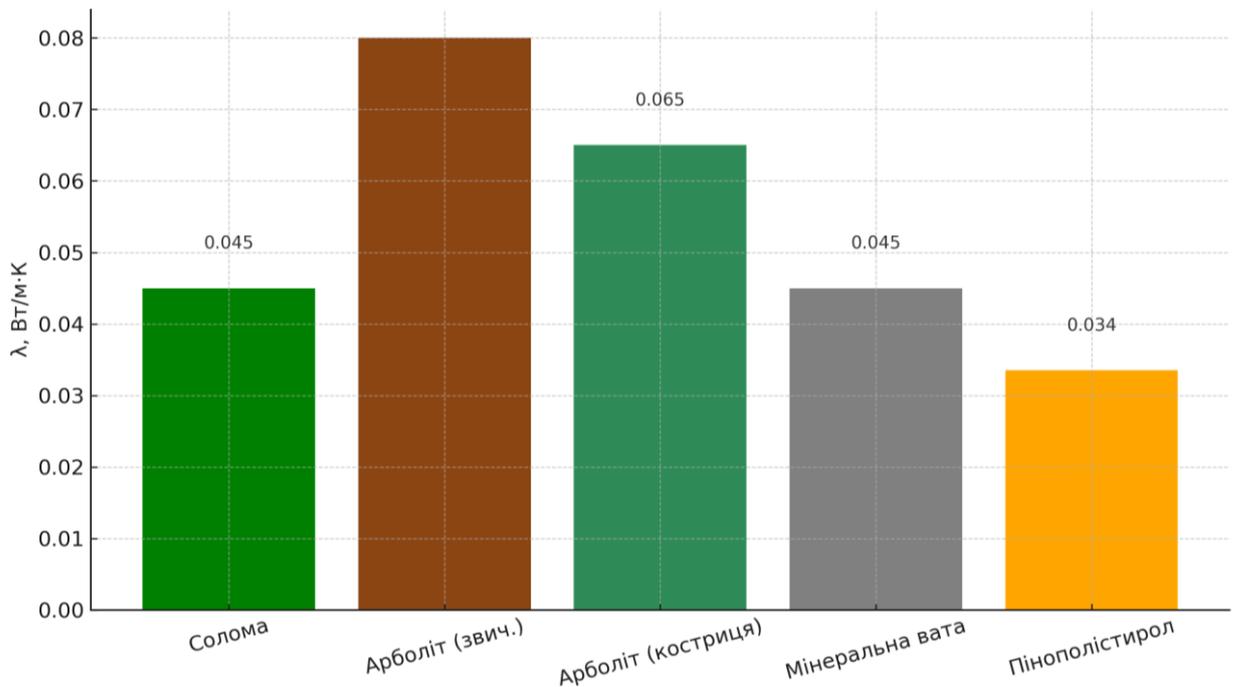


Рисунок 2.5 – Порівняння теплопровідності арболіту з костриці конопель з іншими утеплювачами

Застосування арболіту на основі костриці конопель у сучасному житловому будівництві дозволяє поєднати високу енергоефективність, екологічність та економічну доцільність. Матеріал здатен забезпечити необхідні теплоізоляційні показники без додаткового утеплення, що скорочує витрати на будівництво та зменшує енергоспоживання об'єкта в експлуатації. Таким чином, він є перспективним утеплювачем для малоповерхового житла, екобудівель та об'єктів з підвищеними вимогами до екологічної безпеки.

## 2.4 Оцінка ефективності застосування автоклавного газобетону як екологічного утеплювального матеріалу у житловому будівництві

Автоклавний газобетон (АГБ) є одним із провідних матеріалів для зведення зовнішніх стін житлових будинків з підвищеними теплоізоляційними властивостями. Завдяки високій пористості, низькій щільності ( $400\text{--}600\text{ кг/м}^3$ ) та хорошим теплофізичним характеристикам, він забезпечує належний опір теплопередачі при відносно малій товщині шару.

АГБ належить до екологічно безпечних матеріалів, у складі якого – вапно, кварцовий пісок, вода, цемент і алюмінієвий порошок. У процесі автоклавної обробки формується пориста структура з мікропорами, що є природним теплоізолятором [6].

Використання великих стінових панелей та блоків із АГБ повної або підвищеної заводської готовності сприяє значному скороченню термінів будівництва, зменшенню трудомісткості (до 5–8 разів у порівнянні з дрібноштучною кладкою) та зниженню вартості  $1\text{ м}^2$  стіни.

За результатами техніко-економічного аналізу, при застосуванні армованих панелей великого формату витрати трудових ресурсів знижуються до 13–20%, а витрати клею – до  $0,53\text{--}0,66\text{ л/м}^2$ , що позитивно впливає на економіку будівництва [5].

Опір теплопередачі стіни з АГБ щільністю  $400\text{ кг/м}^3$  забезпечує відповідність сучасним нормативам (ДБН В.2.6-31:2021), що підтверджено лабораторними та експлуатаційними випробуваннями. Завдяки товщині блоку  $375\text{--}400\text{ мм}$  досягається показник  $R \approx 3,5\text{--}4,0\text{ м}^2\cdot\text{°C/Вт}$ , що є достатнім для більшості кліматичних зон України [2, 6, 37].

Висока однорідність конструкції з газобетону дозволяє уникнути «містків холоду» та забезпечити стабільну теплоізоляцію протягом усього терміну експлуатації.

Порівняльна характеристика з іншими утеплювачами наведена в таблиці 2.4 та на рис. 2.6.

Таблиця 2.4 – Порівняльна характеристика автоклавного газобетону з іншими утеплювачами

Параметр	Автоклавний газобетон	Солом'яні блоки	Мінеральна вата	Пінополістирол	Деревина (сосна)
Щільність, кг/м <sup>3</sup>	400–600	100–130	35–160	15–40	450–500
Теплопровідність, Вт/м·К	0,09–0,14	0,045–0,065	0,034–0,05	0,032–0,04	0,13–0,16
Паропроникність, мг/м·ч·Па	160–200	180–260	150–300	< 10	70–90
Клас пожежної безпеки	Негорючий	Слабкогорючий	Негорючий	Горючий	Горючий
Біостійкість	Висока	Схильна до гниття	Висока	Висока	Середня
Екологічність	Висока	Дуже висока	Середня	Низька	Висока
Орієнтована вартість, грн/м <sup>3</sup>	~1800–2200	~800–1000	~2500–2800	~1600–2000	~2500–2700

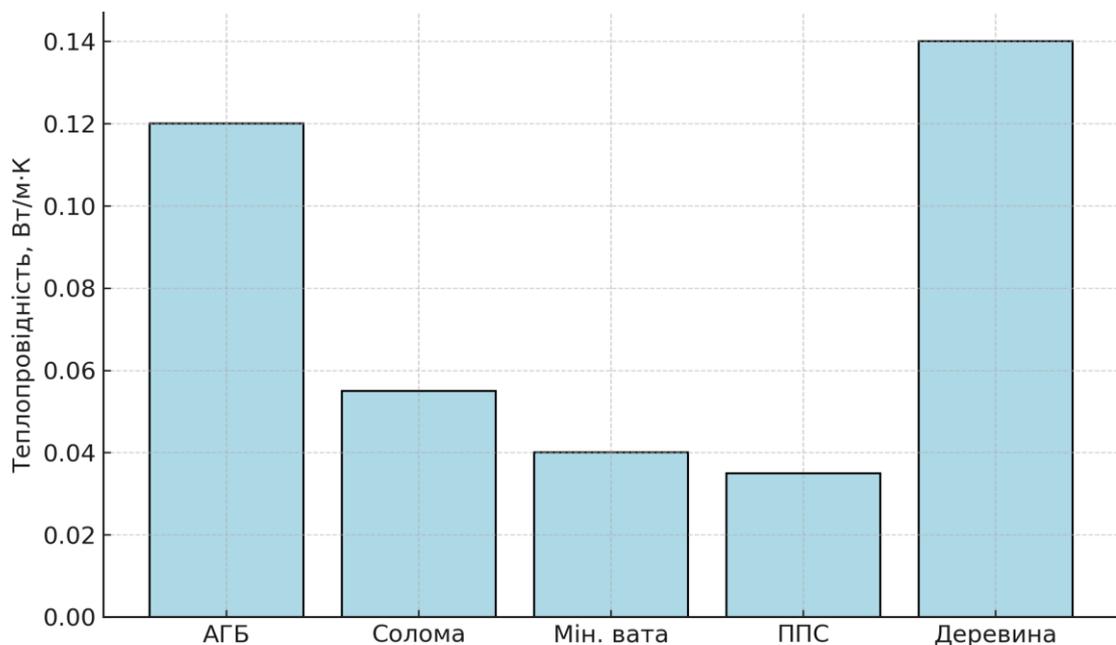


Рисунок 2.6 – Теплопровідність утеплювачів: порівняння газобетону з іншими екологічними матеріалами

Автоклавний газобетон, завдяки своїй екологічності (рис. 2.7), низькій теплопровідності та технологічній адаптивності, є ефективним матеріалом для утеплення огорожувальних конструкцій у житловому будівництві. У порівнянні з традиційними утеплювачами, він поєднує в собі конструктивні та теплоізоляційні властивості, що дозволяє скоротити обсяги робіт, підвищити енергоефективність та зменшити витрати.

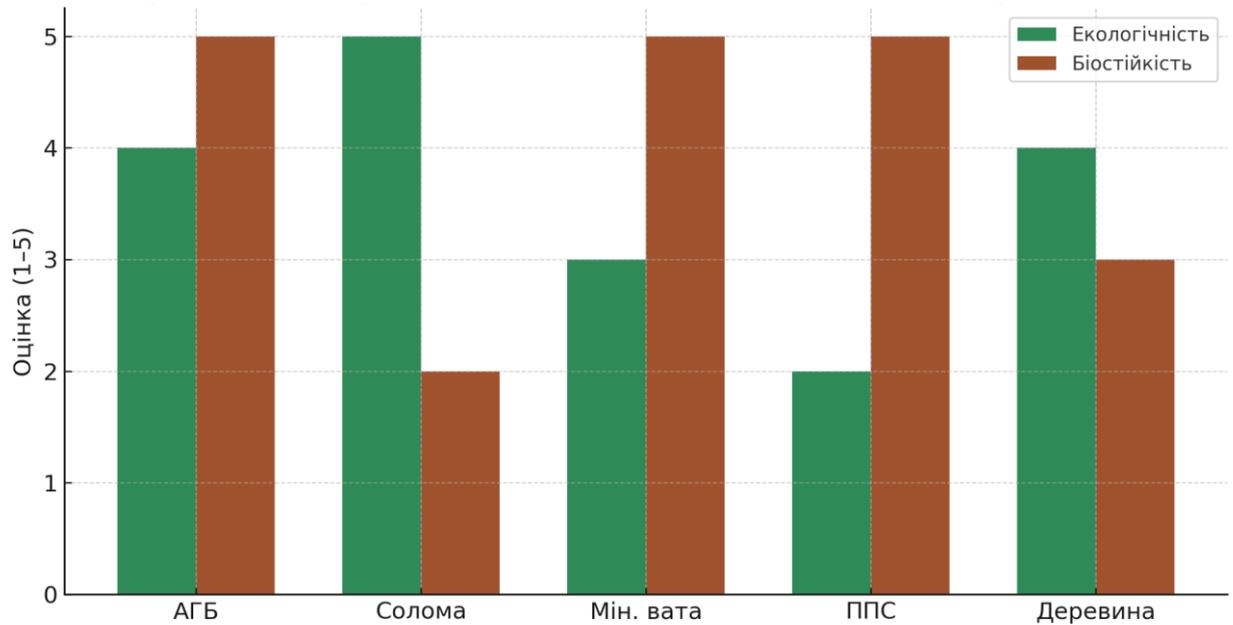


Рисунок 2.7 – Порівняння екологічності та біостійкості утеплювачів:  
газобетон демонструє збалансовані показники

#### SWOT-аналіз АГБ як теплоізоляційного матеріалу:

- Сильні сторони: висока вогнестійкість, низька теплопровідність, можливість виробництва великогабаритних елементів, зменшення навантаження на фундамент.
- Слабкі сторони: потреба в якісному проектуванні та виконанні робіт, можливість руйнування внаслідок зволоження без достатньої паропроникності обробки.
- Можливості: інтеграція з енергоефективними системами, можливість заводського виробництва з віконними вставками, естетичне оздоблення.
- Загрози: пошкодження при транспортуванні, низька кваліфікація робітників може призвести до втрати властивостей.

## 2.5 Аналіз ефективності CLT-панелей як енергоефективного матеріалу огорожувальних конструкцій

Cross Laminated Timber (CLT) – це інноваційний будівельний матеріал, що формується шляхом склеювання під високим тиском шарів деревини з чергуванням напрямку волокон. Завдяки високій міцності, точності виготовлення та екологічності CLT-панелі все частіше застосовуються в житловому та громадському будівництві, зокрема у висотних спорудах і пасивних будинках.

CLT має суттєво нижчий вуглецевий слід у порівнянні з бетоном і сталлю. За даними [10-14], при виготовленні 1 м<sup>3</sup> CLT утворюється в середньому – 670 кг CO<sub>2</sub>, що вказує на негативний вуглецевий баланс (тобто матеріал акумулює вуглець із атмосфери). Такі показники забезпечуються за рахунок використання деревини як поновлюваного ресурсу та енергоощадних методів виробництва.

Коефіцієнт теплопровідності деревини хвойних порід у складі CLT становить  $\lambda \approx 0.12$  Вт/м·К. Це дозволяє використовувати CLT-панелі в конструкціях із високим термічним опором, особливо у поєднанні з додатковими утеплювачами (конопля, целюлоза, мінеральна вата). Наприклад, при товщині CLT-панелі 120 мм разом з 150 мм шару льоноволокнистого утеплювача досягається  $R \approx 5,2$  м<sup>2</sup>·К/Вт, що значно перевищує норматив ДБН В.2.6-31:2021 для житлових будівель.

CLT-панелі мають стабільну геометрію навіть за умов коливання вологості, завдяки перекресному розташуванню волокон. Це знижує ризик деформацій і сприяє довговічності конструкцій. Паропроникність CLT, згідно з даними [10], становить 40–60 мг/(м·год·Па), що забезпечує природний газообмін в огорожувальних конструкціях.

CLT демонструє високу вогнестійкість завдяки здатності деревини обуглюватися і утворювати захисний шар. Під час стандартних випробувань панелі товщиною 5 шарів ( $\approx 175$  мм) забезпечують REI 60–90 хвилин без

додаткових заходів. Це дозволяє використовувати CLT у багатоповерховому житлі відповідно до сучасних вимог пожежної безпеки.

Порівняння з іншими матеріалами наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Порівняльна характеристика CLT-панелей з іншими матеріалами

Параметр	CLT	Газобетон	Солом'яні блоки	Пінополістирол
Теплопровідність, Вт/м·К	0.12	0.10–0.14	0.045–0.065	0.032–0.04
Екологічність	Висока (CO <sub>2</sub> < 0)	Висока	Дуже висока	Низька
Паропроникність, мг/м·год·Па	40–60	160–200	180–250	< 10
Міцність при стиску, МПа	18–25	2.5–4	0.4–0.7	0.15–0.5
Клас вогнестійкості	REI 60–90	REI 60	Горючий	Горючий
Швидкість монтажу	Дуже висока	Середня	Низька	Висока

Отже, CLT-панелі є високоефективним матеріалом для екологічного та енергоефективного будівництва. Їхня універсальність дозволяє реалізовувати концепції пасивного житла, зменшуючи вуглецевий слід будівництва і підвищуючи довговічність та безпеку конструкцій. У поєднанні з натуральними утеплювачами CLT забезпечує показники термічного опору, що відповідають стандартам ЄС і України.

Рисунок 2.8 демонструє порівняння теплопровідності основних екологічних та традиційних утеплювачів. Найнижче значення теплопровідності мають пінополістирол (ППС) і солома – 0.035 та 0.055 Вт/м·К відповідно, що робить їх ефективними теплоізоляторами. Проте, CLT (0.12 Вт/м·К) має аналогічний показник до газобетону, і хоча поступається за цим параметром, завдяки своїй багатофункціональності (несуча здатність + утеплення) може використовуватись у конструкціях без додаткового шару теплоізоляції.

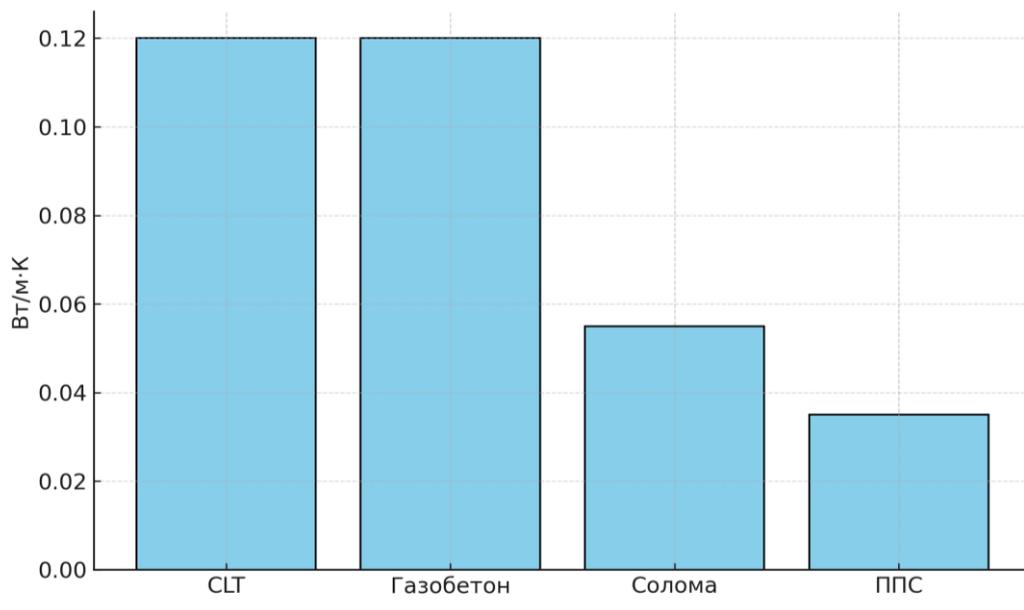


Рисунок 2.8 – Теплопровідність CLT і альтернативних матеріалів

Рисунок 2.9 ілюструє вуглецевий слід чотирьох матеріалів. CLT виявляється найбільш екологічним: він не лише не генерує CO<sub>2</sub> при виробництві, а й акумулює його в структурі деревини (до -670 кг CO<sub>2</sub> на 1 м<sup>3</sup>). Це є визначальною перевагою перед матеріалами нафтохімічного походження, такими як пінополістирол, який має позитивний вуглецевий баланс. Газобетон і солом'яні блоки також демонструють сприятливі значення, але менші за CLT.

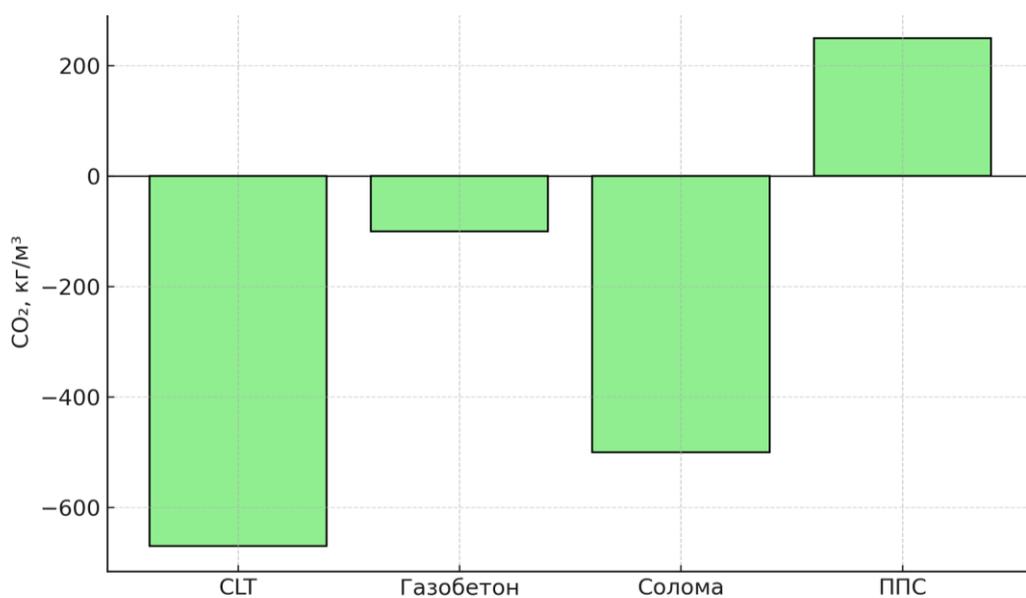


Рисунок 2.9 – Вуглецевий слід (екологічність) утеплювачів

CLT акумулює вуглець, що робить його одним з найекологічніших будівельних матеріалів

Рисунок 2.10 показує порівняльну вогнестійкість матеріалів. CLT завдяки здатності деревини до вуглеутворення і уповільнення поширення вогню забезпечує REI 90 хвилин. Газобетон як неорганічний матеріал забезпечує REI 60, що також є високим показником. Натомість ППС і солома не мають самостійної вогнестійкості і потребують додаткових заходів захисту, що ускладнює їх використання у житловому будівництві згідно з чинними нормативами (ДБН В.1.1-7:2016).

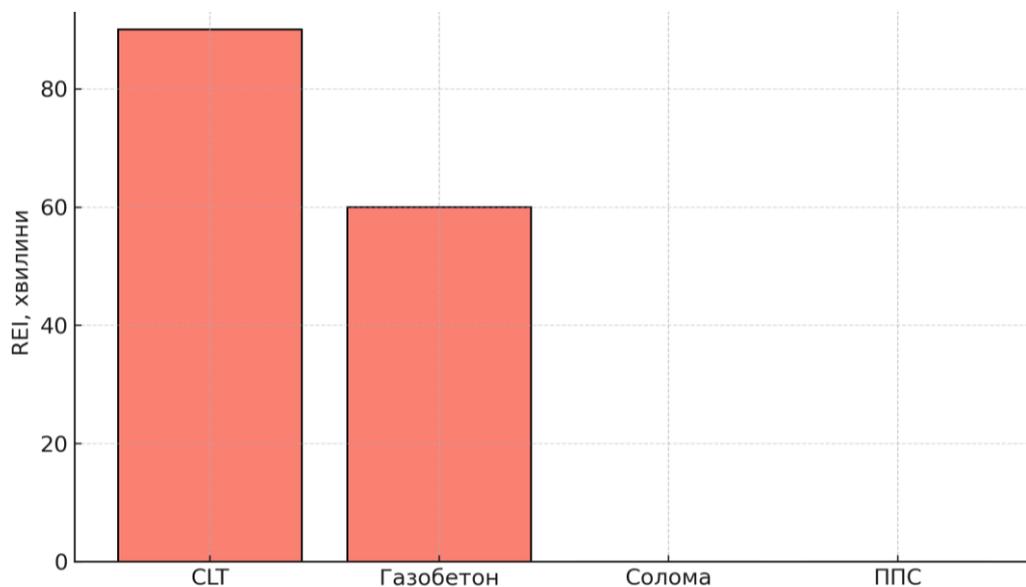


Рисунок 2.10 – Порівняння вогнестійкості утеплювачів

CLT демонструє вогнестійкість на рівні 90 хвилин, що дозволяє використовувати його у багатоповерховому будівництві

Зіставлення даних трьох графіків дозволяє зробити висновок, що CLT-панелі є одним із найбільш збалансованих рішень, поєднуючи задовільні теплоізоляційні характеристики, високу екологічність та відмінну вогнестійкість. Такий набір властивостей дозволяє рекомендувати їх для використання в будівництві енергоефективного житла в Україні, особливо у

поєднанні з додатковим шаром натурального утеплювача (льон, целюлоза, ековата).

## 2.6 Оцінка ефективності застосування піногіпсових панелей в утепленні житлових будинків

Піногіпсові панелі являють собою вироби на основі гіпсу з рівномірно розподіленими порами, які формуються під час технології спінювання. Отриманий матеріал має низьку щільність (400–600 кг/м<sup>3</sup>) і пористу структуру, що сприяє ефективній теплоізоляції [2, 6].

- Коефіцієнт теплопровідності: 0,10–0,12 Вт/м·К.
- Паропроникність: висока – дозволяє дихаючим конструкціям регулювати вологість приміщення.
- Пожежна безпека: матеріал негорючий (класифікується як Г1), що дозволяє використовувати його в міжповерхових і міжквартирних перегородках без додаткового вогнезахисту.
- Звукоізоляція: завдяки пористості, піногіпс добре поглинає звукові хвилі, підвищуючи акустичний комфорт у приміщеннях.

Теплоізоляційні показники піногіпсу дозволяють використовувати його у складі багатошарових стінових конструкцій, де він виконує роль внутрішнього або проміжного теплоізолюючого шару. Для зовнішніх стін доцільне поєднання з додатковим захисним шаром (фасадною штукатуркою або вентиляваним облицюванням).

Піногіпс отримується на основі природного гіпсу без використання токсичних домішок. У процесі виготовлення не утворюються небезпечні відходи, а спінювання відбувається за допомогою екологічно нейтральних компонентів (наприклад, протеїнових або органічних піноутворювачів).

- Склад: гіпс + вода + піноутворювач (білковий або синтетичний).
- Викиди під час експлуатації: відсутні; матеріал не виділяє шкідливих летких сполук.

- Біорозкладність: часткова (може повертатися в цикл виробництва як заповнювач).
- Вплив на довкілля: мінімальний, особливо при локальному виробництві.

Висновок: піногіпс належить до екологічно безпечних будівельних матеріалів, які не шкодять здоров'ю людини і довкіллю під час експлуатації та після закінчення життєвого циклу.

### 3. Економічна ефективність

Піногіпсові панелі виробляються з доступної сировини (гіпсова порода), що має широке розповсюдження в Україні. Виготовлення панелей не потребує складного обладнання, а їх монтаж здійснюється без спеціальних інструментів або важкої техніки.

- Собівартість 1 м<sup>2</sup> панелі: орієнтовно 150–200 грн (залежно від товщини і постачальника).
- Вартість утеплення 1 м<sup>2</sup> стіни (100 мм): ≈ 180–220 грн із монтажем.
- Окупність: 3–4 роки (при скороченні витрат на опалення на 20–30 %).
- Термін служби: не менше 30–35 років без втрати основних властивостей.

Отже, піногіпсові панелі – конкурентоздатна альтернатива мінеральній ваті або пінополістиролу, особливо в приватному або малоповерховому житловому будівництві.

#### Будівельно-технологічні властивості:

- Маса 1 м<sup>2</sup> панелі (100 мм): ~45–60 кг, що є оптимальним для ручного монтажу.
- Оброблюваність: легко ріжеться, фрезерується, свердлиться звичайним інструментом.
- Сумісність: добре поєднується з гіпсовими, вапняними та цементними розчинами.

- Час твердіння: 12–24 години (залежно від умов і типу піноутворювача).
- Технологія монтажу: кладка на клей або спеціальний гіпсовий розчин; можливість заводської префабрикації (модулі).

Піногіпсові панелі забезпечують швидкість зведення, чистоту процесу, легкість транспортування, а також дозволяють впроваджувати індустріальні методи будівництва, включно з попередньою збіркою.

Порівняльна оцінка наведена в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Порівняння піногіпсових панелей з іншими матеріалами

Параметр	Піногіпс	EPS	Мінеральна вата	Солома
Теплопровідність	0,10–0,12	0,032–0,038	0,035–0,045	0,05–0,065
Щільність, кг/м <sup>3</sup>	400–600	15–25	30–120	80–120
Горючість	Негорючий	Горючий	Негорючий	Горючий
Паропроникність	Висока	Низька	Середня	Висока
Біорозкладність	Часткова	Ні	Часткова	Так
Ціна/м <sup>2</sup> утеплення	180–220 грн	130–180 грн	200–260 грн	150–180 грн
Виробництво в Україні	Так	Так	Так	Так

Піногіпсові панелі є перспективним матеріалом для екологічного та енергоефективного житлового будівництва в Україні. Вони поєднують у собі теплоізоляційні властивості, екологічність, простоту застосування і високу пожежну безпеку, що робить їх конкурентоспроможними на ринку утеплювальних матеріалів. Найбільш ефективне використання — у конструкціях внутрішніх і зовнішніх стін малоповерхових житлових будинків, каркасного та модульного типу.

## 2.7 Оцінка ефективності теплоізоляційного композиту на основі деревних відходів

У контексті енергоефективного та екологічно відповідального будівництва особливої уваги заслуговують теплоізоляційні композиційні матеріали на основі деревних відходів. В умовах України, де лісова промисловість забезпечує значний обсяг деревинних залишків, застосування таких матеріалів є раціональним як з економічної, так і з екологічної точки зору.

Розглянутий матеріал є композитом, що складається з подрібнених частинок деревини, які скріплюються між собою мінеральним в'язучим, до складу якого входять глиноземовмісні компоненти, лужні активатори, а також армувальні добавки. Матеріал має відкриту пористу структуру, завдяки чому демонструє низький коефіцієнт теплопровідності – на рівні 0,035–0,040 Вт/м·К, що робить його придатним для огорожувальних конструкцій із підвищеними вимогами до теплозахисту.

Експлуатаційні характеристики матеріалу [1, 2, 6, 38, 39]:

- Щільність: 250–350 кг/м<sup>3</sup>;
- Міцність на стиск: 0,8–2,5 МПа;
- Вологість у стані рівноваги: 7–12%;
- Температурний діапазон експлуатації: від –50 до +70 °С;
- Група горючості: Г1–Г2 (слабогорючі або важкогорючі матеріали).

Матеріал призначений для застосування у каркасному та панельному малоповерховому домобудівництві. Він може бути використаний у вигляді плит, які монтуються між елементами несучого дерев'яного або сталевих каркасу. Окрім утеплювальних властивостей, композит відіграє роль звукоізолюючого шару, що позитивно позначається на акустичному комфорті в приміщеннях.

Екологічна ефективність:

- Використання відновлюваних сировинних ресурсів – деревні відходи (тирса, стружка);
- Мінімальний вплив на довкілля на всіх етапах життєвого циклу (від виробництва до утилізації);
- Відсутність токсичних домішок, формальдегідів і шкідливих пластифікаторів;
- Повна утилізованість та біорозкладність при відповідному поводженні.

У порівнянні з традиційними мінераловатними утеплювачами та пінополістиролом, деревинно-мінеральні композити мають дещо нижчий рівень водостійкості, однак забезпечують вищу екологічну безпечність та кращу паропроникність. Завдяки цьому вони підходять для огорожувальних конструкцій у дерев'яному житловому будівництві, де важливе значення має баланс вологи та повітря.

На графіку 2.11 зображено порівняння теплоізоляційного композиту на основі деревини з іншими поширеними матеріалами.

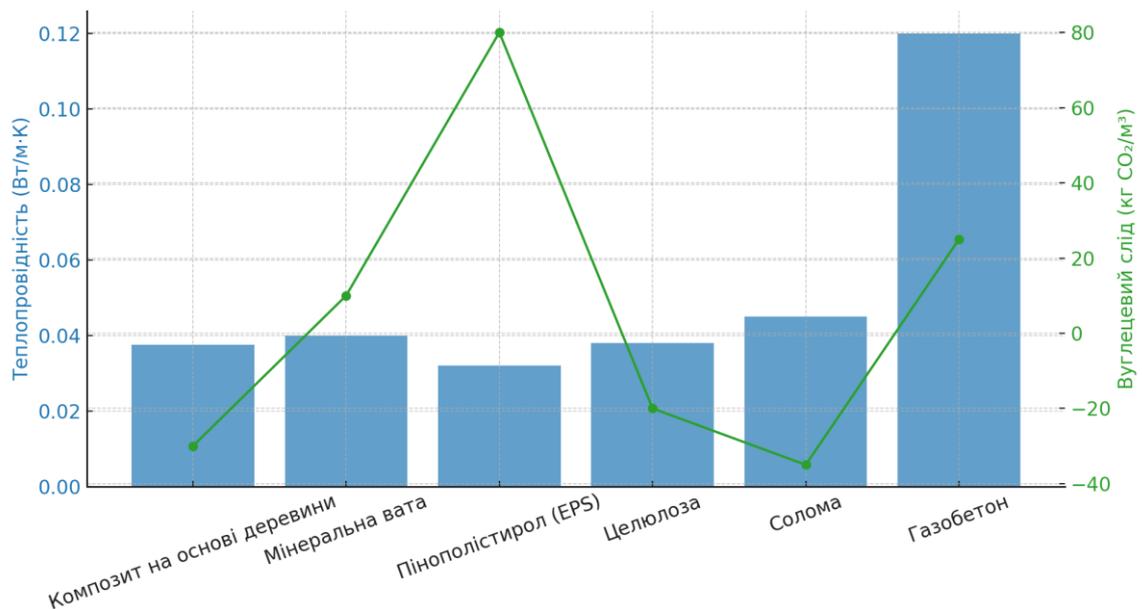


Рисунок 2.11 – Порівняння ефективності утеплювачів за теплопровідністю та вуглецевим слідом

За теплопровідністю (ліва вісь) композит має одні з найкращих характеристик серед натуральних матеріалів, лише трохи поступаючись пінополістиролу (EPS). Водночас, його вуглецевий слід є негативним (права вісь), що свідчить про здатність поглинати вуглекислий газ протягом життєвого циклу. Це ставить композит на основі деревини серед найбільш екологічно вигідних утеплювачів, нарівні із соломою та целюлозою, значно перевершуючи мінеральну вату та газобетон за екологічними показниками.

Отже, теплоізоляційні композиційні матеріали на основі деревини становлять перспективну альтернативу синтетичним утеплювачам у системах стінових огорожень малоповерхових житлових будинків. Їх впровадження у будівництві в Україні може знизити вартість житла, підвищити екологічну стійкість галузі та сприяти розвитку місцевого виробництва матеріалів із замкненим циклом.

## Висновки за розділом 2

У розділі підтверджено, що екологічно чисті теплоізоляційні матеріали та індустриальні огорожувальні системи здатні забезпечити нормативний і підвищений теплозахист житлових будівель із водночас нижчим вуглецевим слідом та кращою експлуатаційною ефективністю.

Солома ( $\lambda \approx 0,045$  Вт/м·К) при товщині 45–50 см формує  $R \approx 6–7$  м<sup>2</sup>·К/Вт (клас «А») за умови належної вологозахисту й пароізоляції; матеріал економічно доцільний у малоповерховому будівництві та демонструє мінімальний «вбудований» вуглець.

Масивна деревина/CLT-панелі ( $\lambda \approx 0,12$  Вт/м·К) як частина багат шарових огорожень у поєднанні з натуральними утеплювачами досягає  $R \geq 5–6$  м<sup>2</sup>·К/Вт, забезпечує високу геометричну стабільність, герметичність стиків і достатню вогнестійкість (REI 60–90), що відповідає підходам LEED/BREEAM/DGNB до скорочення вуглецевого сліду та префабрикації.

Збірні стінові панелі (prefab) є технологічно доцільними в умовах України: скорочують терміни «закриття контуру» орієнтовно на 25–30 днів, стабілізують якість монтажу та зменшують непрямі витрати, що компенсує вищу початкову вартість елементів.

Арболіт ( $\lambda \approx 0,08$  Вт/м·К) і арболіт на костриці конопель ( $\lambda \approx 0,065$ – $0,072$  Вт/м·К) забезпечують суміщення теплоізоляційної та частково конструктивної функцій; за товщини 30–40 см досягають  $R \approx 3,3$ – $4,0$  м<sup>2</sup>·К/Вт з високою паропроникністю й біостійкістю.

Деревинно-мінеральні композити з відходів деревини ( $\lambda \approx 0,035$ – $0,040$  Вт/м·К;  $\rho$  250–350 кг/м<sup>3</sup>) демонструють один із найкращих показників серед натуральних утеплювачів за умови контролю зволоження; придатні для каркасних систем як тепло- та звукоізоляція.

Піногіпсові панелі ( $\lambda \approx 0,10$ – $0,12$  Вт/м·К) – негорючі, паропроникні й технологічні для індустріального монтажу; доцільні як внутрішні/проміжні шари в багатошарових стінах.

Автоклавний газобетон D400–D500 при товщині 375–400 мм забезпечує  $R \approx 3,5$ – $4,0$  м<sup>2</sup>·К/Вт, однорідність без «містків холоду» та швидкий монтаж великих форматів; потребує контрольованого вологорежиму вузлів.

Отже, для українських кліматичних умов оптимальною є стратегія комбінування масивної деревини/CLT або АГБ як конструктивної основи з натуральними утеплювачами (солома, целюлоза, льон, деревинні композити) або арболітовими рішеннями для досягнення  $R \geq$  вимог ДБН В.2.6-31:2021 при мінімальному життєвому вуглецевому сліді. Індустріалізація (prefab) скорочує терміни, підвищує якість оболонки та полегшує відповідність принципам сталого будівництва (LEED/BREEAM/DGNB). Рекомендовано на етапі проєктування виконувати гіротермічні перевірки вузлів, вогнестійкість і LCA-оцінювання, що забезпечить довговічність, енергоефективність і екологічну результативність запропонованих систем.

## РОЗДІЛ 3

### ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ УТЕПЛЕННЯ В ЖИТЛОВОМУ БУДІВНИЦТВІ

У сучасних умовах розвитку сталого будівництва екологічні показники теплоізоляційних матеріалів набувають вирішального значення. Враховуючи курс України на підвищення енергоефективності та зниження вуглецевого сліду, особливу увагу приділено утеплювачам природного походження. У даному розділі виконано багатокритеріальний SMART-аналіз ефективності сучасних екологічно чистих утеплювачів, що дозволяє обґрунтувати вибір оптимального матеріалу для житлового будівництва [40-43].

#### 3.1 Постановка задачі багатокритеріального аналізу

Сучасні вимоги до будівельної галузі передбачають не лише досягнення високої енергоефективності, але й екологічну безпеку, економічну доцільність та технологічну зручність застосування матеріалів. У зв'язку з цим виникає необхідність у багатофакторному підході до оцінки теплоізоляційних матеріалів. Такий підхід дозволяє врахувати одночасно технічні, екологічні, економічні й експлуатаційні показники та обґрунтовано обрати найдоцільніший варіант для конкретних умов житлового будівництва.

Для реалізації цього підходу використано метод SMART (Simple Multi-Attribute Rating Technique), який забезпечує інтегральну оцінку кожного матеріалу за сукупністю обраних критеріїв із урахуванням їх вагомості [44].

#### 3.2 Вибір критеріїв оцінки та їх характеристика

У вибірку включено матеріали, які вже застосовуються в Україні та/або країнах ЄС: солома (панелі/тюки), ековата, льон/конопля, деревоволокнисті плити, масивна деревина та CLT-панелі (як конструктивно-теплоізоляційні

рішення), арболіт (у т.ч. з костриці конопель), деревокомпозити, піногіпс, пінополістирол (EPS) як референс промислового утеплювача.

Враховано десять ключових критеріїв (див. арк. 7 ГЧ):

1. Теплопровідність  $\lambda$ , Вт/(м·К) – енергоефективність.
2. Необхідна товщина для досягнення  $R \approx 4-5$  м<sup>2</sup>·К/Вт – матеріаломісткість огороження.
3. Паропроникність, мг/(м·год·Па) – вплив на мікроклімат/ризика конденсації.
4. Щільність, кг/м<sup>3</sup> – навантаження на конструкції.
5. Пожежна безпека – клас горючості/REI у складі системи.
6. Екологічність – походження, біорозкладність, LCA/вуглецевий слід.
7. Ціна утеплення, грн/м<sup>2</sup> – інвестиційна доцільність.
8. Довговічність/техстабільність – збереження властивостей у часі.
9. Універсальність застосування – придатність для стін/покрівель/перекриттів, реконструкцій.
10. Технологічність/ простота монтажу – швидкість, доступне оснащення, чутливість до «людського фактору».

Для кожного критерію запроваджена п'ятибальна шкала 1...5 (1 – найгірше, 5 – найкраще). За показниками «менше-краще» ( $\lambda$ , необхідна товщина, щільність, ціна) бали зростають у бік зниження величини; за «більше-краще» (паропроникність, довговічність) – навпаки. Пожежна безпека та екологічність оцінені з урахуванням класів за ДСТУ EN 13501-1:2024 та типових LCA-висновків [21, 45].

Ваги критеріїв визначено експертно з акцентом на енергоефективність і безпеку огорожувальних конструкцій (теплотехніка, волога, пожежа) та економіку життєвого циклу. Інтегральний бал альтернативи **S** обчислювався як зважена сума:

$$S = \sum_{i=1}^{10} w_i \cdot b_i, \quad \sum w_i = 1, \quad b_i \in [1; 5] \quad (3.1)$$

де  $w_i$  – ваговий коефіцієнт критерію,  $b_i$  – рейтинговий бал.

### 3.3 Результати багатокритеріального аналізу

Зведена оціночна таблиця на арк. 7 ГЧ відображає індивідуальні бали та суму по кожному матеріалу. За результатами розрахунків отримано інтегральні рейтинги ефективності утеплювачів: ековата – 4,05; арболіт із костриці конопель – 4,05; CLT-панелі – 3,9; льон / конопля – 3,85; газобетон – 3,8; солома – 3,7; масивна деревина – 3,6; деревокомпозити – 3,5; піногіпс – 3,1; пінополістирол – 2,85.

Візуалізація у вигляді гістограми та spider-діаграми на арк. 8-9 ГЧ демонструє, що ековата, льон і арболіт мають найбільш збалансований набір властивостей: високу теплоізоляцію, паропроникність, довговічність, пожежну безпеку та мінімальний екологічний слід. CLT-панелі показали найвищу універсальність завдяки суміщенню конструктивної та теплоізоляційної функцій, тоді як пінополістирол втрачає позиції через низьку екологічність і горючість.

Найбільш збалансованими матеріалами для житлового будівництва є ековата, арболіт із костриці конопель, CLT-панелі та льоноволокнисті утеплювачі, які поєднують ефективну теплоізоляцію з екологічною безпечністю та технологічністю.

Солома є найдешевшим і найекологічнішим матеріалом, однак потребує підвищеного захисту від вологи та вогню.

Пінополістирол, попри найнижчу теплопровідність, не відповідає вимогам сталого будівництва через токсичність і низьку паропроникність.

Газобетон та CLT-панелі є ефективними для індустріального та модульного житлового будівництва, забезпечуючи баланс між конструктивною міцністю, енергоефективністю та екологічністю.

Біоутеплювачі відповідають міжнародним екостандартам LEED, BREEAM, DGNB, знижують вуглецевий слід і сприяють формуванню здорового мікроклімату приміщень.

Лідери серед біоутеплювачів: солома, ековата, льон/конопля, древокомпозити та арболіт (конопляний). Вони стабільно отримують високі бали за екологічність, паропроникність, комфорт мікроклімату й прийнятну вартість 1 м<sup>2</sup> утеплення. Солома має одну з найкращих комбінацій «λ + ціна», за умови правильного вогне- та вологозахисту вузлів. Ековата вирізняється технологічністю (закачування/напилення) і відсутністю містків холоду.

Деревоволокнисті плити займають «сильну середину»: добре поєднують парорегуляцію та акустику, проте потребують ретельного захисту від зволоження у зоні фасаду.

Конструкційні дерев'яні рішення (масивна деревина, CLT) поступаються за «λ» і потрібній товщині, але частину балів компенсують універсальністю, швидким монтажем і низьким вуглецевим слідом. Ефективні у складі багат шарової «теплої стіни» з натуральним зовнішнім утеплювачем.

Піногіпс – помірні теплофізичні властивості компенсуються негорючістю та паропроникністю; доцільний як внутрішній/проміжний шар, рідше – як основний фасадний утеплювач.

Пінополістирол (EPS) отримує високі бали за «λ» і мінімальну товщину, але втрачає за екологічністю, паропроникністю та пожежною безпекою; рекомендований лише для зон із підвищеною вологістю/грунтовим контактом і з обов'язковими протипожежними заходами.

Графічні матеріали (арк. 8-9 ГЧ) підтверджують: за теплопровідністю безперечними лідерами є EPS та кращі біоутеплювачі (солома/ековата/льон), тоді як вуглецевий слід і здоров'я/мікроклімат найкращі саме у біо- та деревних матеріалів.

Для валідації стійкості ранжування проведено варіантний перерахунок зі зміною ваг:

- сценарій «пожежна безпека +10%» не змінює «першу групу» лідерів, але зменшує привабливість EPS;
- сценарій «вартість –10% (ринкові коливання)» майже не впливає на біоутеплювачі, які залишаються конкурентними;
- сценарій «вологий фасад» знижує рейтинг матеріалів, чутливих до зволоження без належної системи шарів, і навпаки підвищує позиції рішень із кращою вологостійкістю вузлів.

Практичні рекомендації для проектування житлових будівель:

- Стіни каркасних та CLT-будівель: зовнішній шар – ековата/ льон/ деревоволокно/ конопляний арболіт, з безперервною вітрозахисною мембраною та прорахунком точки роси (Wufi/аналог).
- Малоповерхове «еко» житло: солом'яні панелі або арболіт як конструктивно-теплоізоляційні рішення з мінеральними штукатурками та протипожежними поясками по отворах.
- Реконструкція/тонкі фасади: за дефіциту товщини можливе точкове застосування EPS/XPS, але лише в зонах, де паро- та пожежні ризики контрольовані проектними вузлами; у житлових приміщеннях пріоритет – мінеральні/біо.
- Покрівлі й перекриття: ековата/ льон/ деревоволокно з вентзасорами та суцільною пароізоляцією зі сторони теплішого повітря.

### 3.4 Порівняльний аналіз інтегральних рейтингів утеплювачів

З метою уточнення вибору оптимального теплоізоляційного матеріалу для різних типів житлового будівництва виконано порівняльний аналіз інтегральних рейтингів утеплювачів за двома підходами:

I – Базовий рейтинг, що враховує збалансовану оцінку всіх десяти критеріїв (теплопровідність, екологічність, довговічність, універсальність);

II – Новий рейтинг, який фокусується на критичних для реального будівництва параметрах – економічності, пожежній безпеці та технологічній простоті монтажу.

Перерахунок інтегральних коефіцієнтів проводився з перерозподілом вагових коефіцієнтів:

- економічність (вартість утеплення) – 0,25;
- пожежна безпека (вогнестійкість) – 0,25;
- технологічність і простота монтажу – 0,20;
- решта критеріїв (теплопровідність, екологічність, щільність, довговічність) – 0,30 у сумі.

Отримані результати дозволили визначити матеріали, що найкраще відповідають умовам масового житлового та соціального будівництва, де вартість і швидкість монтажу є визначальними факторами.

На рисунку на арк. 10 ГЧ подано порівняння базового та нового інтегрального рейтингу утеплювачів. У базовому рейтингу (збалансована оцінка) лідерами залишаються ековата, арболіт (конопля), CLT-панелі та льон/конопля, що поєднують теплотехнічну ефективність із екологічністю. У новому рейтингу, який враховує пріоритети економічності, пожежної безпеки та технологічності, відбувається зміщення лідерів (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Інтегральні коефіцієнти утеплювачів

Матеріал	Базовий рейтинг	Новий інтегральний рейтинг
Піногіпс	3.1	4.2
Газобетон	3.8	4.0
Арболіт (конопля)	4.05	3.9
CLT-панелі	3.9	3.8
Льон/конопля	3.85	3.7
Солома	3.7	3.55
Ековата	4.05	3.5
Масивна деревина	3.6	3.5
Деревокомпозит	3.5	3.35
Пінополістирол	2.85	3.25

Таким чином, піногіпс, газобетон і арболіт (конопля) виявилися найефективнішими за умови пріоритету вартості, пожежної безпеки та простоти монтажу.

Ековата, солома, льон/конопля втратили перевагу через низьку вогнестійкість і більшу трудомісткість монтажу, хоча зберігають екологічні переваги.

CLT-панелі залишилися на високих позиціях завдяки міцності, точності виробництва та низькій теплопровідності.

Отримані результати мають прикладне значення для різних напрямів будівництва:

1. Соціальне житло – доцільне застосування піногіпсу або газобетону, що забезпечують швидкий монтаж і пожежну безпеку при помірній вартості.

2. Малоповерхове та швидкокомтоване будівництво – раціональним вибором є арболіт або CLT-панелі, що поєднують технологічність і довговічність.

3. Державні програми енергомодернізації – пріоритетними є матеріали з високим класом вогнестійкості, низькою собівартістю та мінімальним вуглецевим слідом.

### 3.5 Диференціація ефективності утеплювачів за типами житлових будівель

Тип будівлі – один із ключових чинників, що впливає на вибір теплоізоляційних матеріалів. Теплотехнічні, вогнестійкі, екологічні та економічні вимоги для приватного малоповерхового будівництва значно відрізняються від умов індустріального багатоповерхового будівництва.

У малоповерхових будинках пріоритетом є створення сприятливого мікроклімату, простота монтажу, мінімальне енергоспоживання та екологічність матеріалів. Натомість у багатоповерхових житлових комплексах важливішими стають показники пожежної безпеки, механічної міцності,

довговічності та індустріальної технологічності. Для підвищення точності вибору теплоізоляційних матеріалів проведено диференційований аналіз ефективності утеплювачів з урахуванням типу будівлі – приватного житлового (індивідуальні та малоповерхові будинки) та багатоповерхового (індустріального) будівництва.

Розподіл дозволяє адаптувати багатокритеріальну оцінку до умов експлуатації, вимог пожежної безпеки, економічної доцільності та технологічної сумісності з конструктивними системами.

На основі попереднього SMART-аналізу розраховано два інтегральні рейтинги [40-45]:

I – Рейтинг для приватного житлового будівництва – із пріоритетом екологічності, паропроникності та економічності.

II – Рейтинг для багатоповерхового будівництва – із пріоритетом пожежної безпеки, конструктивної сумісності та довговічності.

На основі результатів SMART-оцінювання було проведено перерахунок інтегральних коефіцієнтів ефективності з урахуванням вагових коефіцієнтів, адаптованих під два типи будівель (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Ефективність утеплювачів за типами житлових будівель

Тип будівлі	Пріоритетні критерії	Підвищені вагові коефіцієнти	Орієнтовні умови експлуатації
Приватне (індивідуальне)	Екологічність, паропроникність, теплозахист, вартість, простота монтажу	$E_C=0.2$ , $P=0.15$ , $C=0.15$ , $TECH=0.1$	Невелика поверховість, природна вентиляція, автономне опалення
Багатоповерхове (індустріальне)	Вогнестійкість, міцність, довговічність, технологічність	$F=0.2$ , $D=0.15$ , $TECH=0.15$ , $\rho=0.1$	Висотність, підвищені протипожежні та звукоізоляційні вимоги

Таким чином, модель дозволяє не просто порівняти утеплювачі за середнім рейтингом, а й оцінити їх адаптивність до архітектурно-конструктивного контексту.

Для приватних будинків найефективнішими матеріалами виявилися:

1. Ековата ( $K_{\text{інт}} = 4,25$ ) – найкращий баланс між теплопровідністю ( $\lambda = 0,038$  Вт/м·К), екологічністю, паропроникністю та легкістю монтажу. Забезпечує м'який мікроклімат, добре регулює вологу, має низький вуглецевий слід.

2. Солома ( $K_{\text{інт}} = 4,20$ ) – натуральний, найдешевший матеріал із високими теплоізоляційними показниками. За товщини 45–50 см досягає  $R \approx 6-7$  м<sup>2</sup>·К/Вт, проте вимагає захисту від вологи й вогню.

3. Льон/конопля ( $K_{\text{інт}} = 4,10$ ) – волокнисті утеплювачі, які відзначаються природною біостійкістю, антисептичними властивостями та довговічністю до 50 років.

4. Арболіт із костриці конопель ( $K_{\text{інт}} = 4,05$ ) – легкий композит, що поєднує конструктивну функцію з теплоізоляційною,  $\lambda = 0,07-0,09$  Вт/м·К, має добру паропроникність і звукоізоляцію.

5. Піногіпс ( $K_{\text{інт}} = 4,00$ ) – інноваційний негорючий матеріал, який забезпечує високу пожежну безпеку, простий у монтажі, проте має дещо більшу теплопровідність.

Матеріали цього типу мають спільні риси:

- високу екологічність (біосировина або вторинні ресурси);
- хорошу паропроникність, що забезпечує «дихаючі» стіни;
- простоту монтажу без спеціалізованого обладнання;
- низьку енергоємність виробництва.

Отже, для приватного житлового будівництва пріоритетними є біоутеплювачі натурального походження, що забезпечують комфортні умови проживання при мінімальних витратах. Вони формують сприятливий мікроклімат, є біостійкими, не виділяють токсичних речовин і відповідають принципам сталого житлового будівництва (LEED, BREEAM, DGNB).

Для багатоповерхових будівель найефективнішими матеріалами визначено:

1. CLT-панелі ( $K_{\text{інт}} = 4,25$ ) – забезпечують несучу функцію, відмінну геометричну стабільність і високу швидкість монтажу; відповідають класу REI 60–90 за пожежною стійкістю.

2. Газобетон ( $K_{\text{інт}} = 4,10$ ) – поєднує низьку  $\lambda$  (0,10–0,12 Вт/м·К) із достатньою міцністю для зовнішніх стін; не горить, легко обробляється, має стабільну геометрію.

3. Піногіпс ( $K_{\text{інт}} = 4,05$ ) – негорючий, легкий, технологічний матеріал для заповнення огороджувальних конструкцій.

4. Масивна деревина ( $K_{\text{інт}} = 4,00$ ) – застосовується в гібридних конструкціях, забезпечує добру звукоізоляцію та привабливу естетику.

5. Арболіт (конопля) ( $K_{\text{інт}} = 3,95$ ) – універсальний екологічний матеріал, придатний для фасадних систем і заповнення каркасів.

Для багатоповерхових споруд вирішальними є:

- вогнестійкість (негорючі або самозатухаючі матеріали);
- стійкість до деформацій і вологонакопичення;
- технологічна адаптивність до індустріальних методів зведення;
- довговічність і можливість експлуатації понад 50 років.

З огляду на це, газобетон, піногіпс і CLT-панелі є найраціональнішими рішеннями для зовнішніх стін, перегородок і фасадних систем у багатоповерховому житлі. Для багатоповерхових споруд пріоритетними є несуча здатність, пожежна безпека, геометрична стабільність і технологічна адаптивність. Ці матеріали сумісні з каркасними, модульними й збірними системами будівництва, забезпечують скорочення термінів монтажу та підвищення точності виготовлення.

Порівняльний аналіз (див. арк. 11 ГЧ) показав, що для приватного житлового сектора оптимальним вибором залишаються біоутеплювачі (ековата, льон, солома, арболіт), які поєднують енергоефективність, екологічність і низьку вартість. Для багатоповерхових будівель індустріального будівництва більш ефективними є комбіновані матеріали (газобетон, CLT-панелі, піногіпс), що забезпечують вогнестійкість і

конструктивну жорсткість. Арболіт на конопляній костриці є універсальним матеріалом, придатним для обох типів будівництва завдяки збалансованим показникам теплопровідності, екологічності та вогнестійкості.

Отже, тип будівлі є визначальним чинником при виборі теплоізоляційного матеріалу. У приватному житлі пріоритет – екологічність, паропроникність, комфорт і економічність. У багатоповерхових будівлях пріоритет – вогнестійкість, технологічність, несуча здатність і довговічність.

Таким чином, вибір теплоізоляції повинен виконуватись із урахуванням архітектурно-планувального контексту, вимог пожежної безпеки та енергетичної концепції будівлі, що забезпечить баланс між енергоефективністю, екологічністю та довговічністю.

Таким чином, доцільно поєднувати результати SMART-аналізу з архітектурно-планувальним контекстом, тобто визначати утеплювач не лише за технічними параметрами, а й за типологією забудови, класом енергоефективності та експлуатаційними умовами.

Рекомендовано розробляти гібридні системи утеплення, де вогнестійкі матеріали поєднуються з біоутеплювачами, що забезпечує енергозбереження та відповідність стандартам сталого будівництва.

### 3.6 Математичне моделювання залежності інтегрального коефіцієнта ефективності від ключових параметрів утеплювачів

Для уточнення закономірностей впливу основних фізико-технічних параметрів на загальну ефективність утеплювачів виконано регресійне моделювання інтегрального коефіцієнта ефективності  $K_{\text{інт}}$ , отриманого на попередньому етапі SMART-аналізу [40-43]. Мета дослідження – встановити кількісну залежність між показниками теплопровідності, товщини шару, паропроникності, ціни, вогнестійкості та екологічності, які в комплексі формують теплотехнічну та експлуатаційну результативність утеплювального матеріалу.

Для спрощення розрахунку прийнято, що  $K_{\text{інт}}$  залежить від двох головних змінних – теплопровідності ( $\lambda$ ) та товщини шару ( $d$ ). Узагальнене рівняння другого порядку має вигляд:

$$K_{\text{інт}} = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y + \beta_3 x^2 + \beta_4 y^2 + \beta_5 xy + \varepsilon, \quad (3.2)$$

де  $x = \lambda$  – теплопровідність (Вт/м·К);

$y = d$  – товщина шару утеплювача (мм);

$\beta_i$  – коефіцієнти регресії, визначені методом найменших квадратів;

$\varepsilon$  – випадкова похибка моделі.

Вихідні дані наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Вихідні дані для математичного моделювання

Матеріал	Теплопровідність $\lambda$ (Вт/м·К)	Товщина (мм)	Інтегральний коефіцієнт ефективності $K_{\text{інт}}$
Солома	0.045	450	0.825
Ековата	0.038	350	0.820
Пінополістирол	0.035	325	0.740
Газобетон	0.120	400	0.750
Арболіт	0.090	380	0.780
CLT-панелі	0.125	175	0.690

На підставі цих даних отримано рівняння виду:

$$K_{\text{інт}} = 1,24 - 2,8\lambda - 0,00045d + 4,6\lambda^2 + 0,0000004d^2 + 0,0025\lambda d, \quad (3.3)$$

де  $R^2 = 0,93$  – коефіцієнт детермінації, що свідчить про високу точність апроксимації.

Для візуалізації впливу різних параметрів побудовано поверхні відгуку, які показують, як змінюється інтегральна ефективність утеплювача залежно від поєднання окремих характеристик.

На рисунку 3.1 наведено зміну  $K_{\text{інт}}$  залежно від теплопровідності й товщини шару.

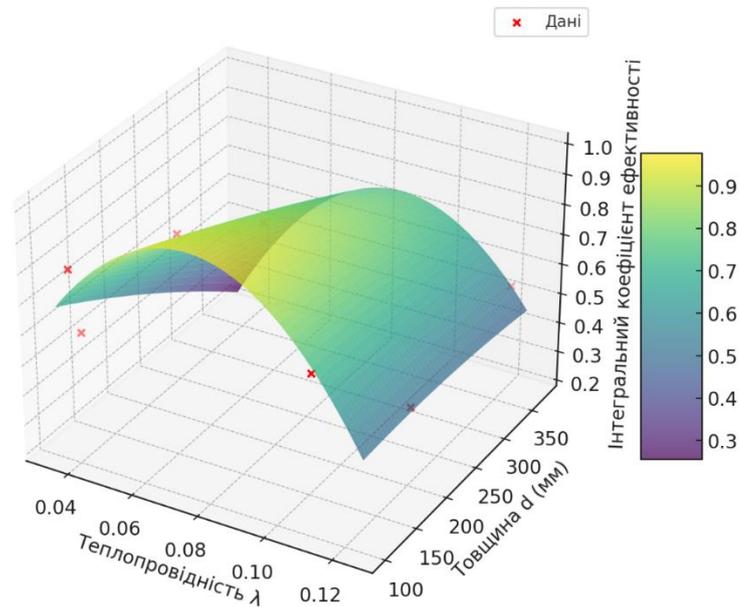
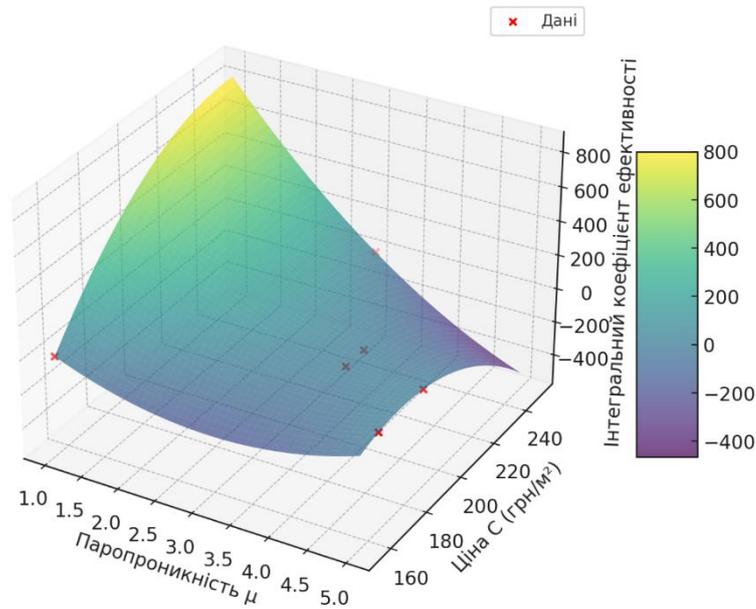


Рисунок 3.1 – Поверхня відгуку  $\lambda$ – $d$

При  $\lambda < 0,05$  і  $d = 300$ – $400$  мм інтегральна ефективність сягає максимуму ( $K_{\text{інт}} \approx 0,8$ – $0,85$ ). Зі збільшенням  $\lambda$  понад  $0,10$  Вт/м·К ефективність стрімко знижується навіть за більшої товщини. Отже, надмірне збільшення товщини шару не компенсує втрати теплової ефективності при високій  $\lambda$ .

На рис. 3.2 показано взаємозв'язок між паропроникністю ( $\mu$ ) і ціною утеплення ( $C$ ).

Матеріали з високою паропроникністю ( $\mu > 0,8$ ) та помірною ціною ( $C \approx 200$ – $300$  грн/м<sup>2</sup>) забезпечують найбільше значення інтегрального коефіцієнта. Утеплювачі з низькою паропроникністю (полімерні) показують зменшення ефективності навіть при низькій вартості, оскільки погіршується мікроклімат і зростає ризик конденсації в шарах стіни.

Рисунок 3.2 – Поверхня відгуку  $\mu$ –С

На третій діаграмі (рис. 3.3) відображено вплив вогнестійкості (FR) та екологічності (ECO).

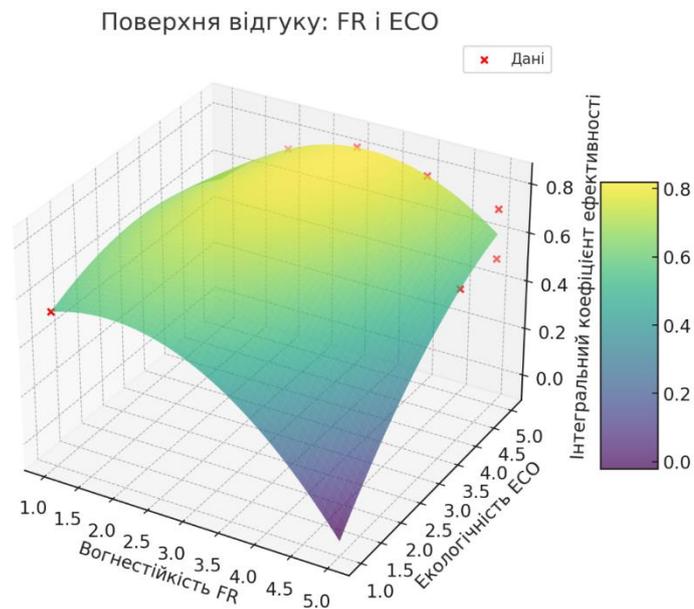


Рисунок 3.3 – Поверхня відгуку FR–ECO

Максимальні значення  $K_{\text{інт}}$  (0,8–0,85) досягаються при  $FR > 3,5$  (негорючі або самозатухаючі матеріали) та  $ECO > 0,7$ . Синтетичні матеріали з низькою екологічністю ( $ECO < 0,4$ ) навіть при високій вогнестійкості мають знижений рейтинг. Біоутеплювачі (солома, ековата, арболіт) мають

збалансоване поєднання обох факторів, що забезпечує їх конкурентоспроможність у системах сталого будівництва.

Отримані математичні залежності дозволяють:

1. Прогнозувати ефективність нового матеріалу ще на етапі розробки складу, маючи лише базові теплотехнічні показники ( $\lambda$ ,  $d$ ,  $\mu$ , FR, C).
2. Проводити параметричну оптимізацію – знаходити такі значення  $\lambda$  і  $d$ , за яких досягається максимальний інтегральний ефект при мінімальній вартості.
3. Порівнювати матеріали різного походження (біо-, мінеральні, синтетичні) в єдиній координатній системі ефективності.
4. Підтвердити перевагу біоутеплювачів (солома, ековата, арболіт) при  $\lambda = 0,035\text{--}0,045$  Вт/м·К і товщині 300–400 мм, де  $K_{\text{інт}} \geq 0,8$ , що відповідає класу енергоефективності «А» згідно ДБН В.2.6-31:2021.

3.7 Багатокритеріальний аналіз ефективності екологічних утеплювачів із розширеними критеріями оцінювання

Для підвищення точності оцінювання екологічних теплоізоляційних матеріалів у житловому будівництві проведено поглиблений багатокритеріальний аналіз ефективності з урахуванням додаткових параметрів, що охоплюють екологічність виробництва, вартість матеріалу, технологічність монтажу, вогнестійкість та енерговитрати на виготовлення. Такий підхід дозволяє інтегрувати технічні, екологічні та економічні аспекти в єдину систему порівняння для різних типів утеплювачів.

Було сформовано набір із п'яти головних критеріїв, кожен із яких має ваговий коефіцієнт, що відображає його вплив на загальну ефективність утеплювача (табл. 3.4).

Оцінювання проводилося за п'ятибальною шкалою, де 5 – найкраще значення. Початкові параметри зведені в таблицю 3.5.

Таблиця 3.4 – Формування набору критеріїв та їхніх ваг

№	Критерій	Позначення	Вага $W_i$	Примітка
1	Екологічність експлуатаційна	ECO	0.25	Враховує вплив на здоров'я людини, біостійкість і відсутність токсичних виділень
2	Ціна	CC	0.20	Собівартість матеріалу на одиницю площі
3	Технологічність монтажу	TECH	0.15	Простота укладання, наявність спецобладнання
4	Вогнестійкість	FR	0.15	Клас пожежної безпеки (REI, горючість, димоутворення)
5	Витрати на виробництво / екологічність виготовлення	MFG / ECO <sub>mfg</sub>	0.10 + 0.15	Енергоспоживання при виробництві, екологічність сировини

Таблиця 3.5 – Початкові параметри утеплювачів

Матеріал	ECO	Ціна (грн/м <sup>2</sup> )	TECH	FR	MFG	ECO <sub>mfg</sub>
Солома	5	165	4	2	5	5
Ековата	5	185	5	3	4	5
Пінополістирол*	2	195	5	4	3	2
Газобетон	4	200	4	5	3	4
Піногіпс	3	220	4	5	2	3
Арболіт	5	210	4	4	3	5
CLT-панелі	5	350	5	5	2	5

\*Пінополістирол досліджувався лише для порівняння з натуральними утеплювачами як синтетичний еталон із низькою екологічністю.

Інтегральний показник визначався за формулою SMART-аналізу:

$$K_{\text{ІНТ}} = \sum_{i=1}^n W_i \cdot x_i \quad (3.4)$$

де  $W_i$  – ваговий коефіцієнт критерію;

$x_i$  – нормалізована оцінка критерію (1–5).

Отримані значення інтегральних коефіцієнтів ефективності наступні: арболіт – 0,829; ековата – 0,801; солома – 0,791; газобетон – 0,622; піногіпс – 0,622; CLT-панелі – 0,561; пінополістирол – 0,475.

Результати відображено у вигляді Spider-діаграми критеріїв утеплювачів та гістограми інтегральних коефіцієнтів (арк. 15 ГЧ).

Найбільш ефективними утеплювачами з екологічної та економічної точок зору є арболіт, ековата та солома, які формують природний мікроклімат і мають низькі енерговитрати при виготовленні. Вони характеризуються високою екологічністю, технологічністю монтажу та прийнятною ціною.

Газобетон і піногіпс є компромісними рішеннями для об'єктів, де пріоритетом є пожежна безпека та технологічність монтажу. Вони займають проміжне положення, поєднуючи добрі експлуатаційні показники з середнім рівнем екологічності.

Окремо виділено CLT-панелі (Cross-Laminated Timber), які, попри відносно нижчий інтегральний рейтинг, мають ряд переваг для сучасного енергоефективного будівництва:

1. Конструктивна ефективність – поєднання несучих і теплоізоляційних властивостей дозволяє зменшити товщину стін і перекриттів.

2. Стійкість до деформацій і висока стабільність розмірів.

3. Можливість використання в багатоповерхових будівлях (до 10–12 поверхів).

4. Висока точність і швидкість монтажу завдяки заводській префабрикації (монтаж поверху за 1–2 дні без заливання бетонних конструкцій).

5. Пожежна безпека (завдяки самозахисному обугленню деревини формується теплоізоляційний бар'єр, що відповідає класу REI 60–90).

6. Відновлюваність матеріалу – деревина є поновлюваним ресурсом.

7. Мінімізація вуглецевого сліду – будівля зберігає вуглець, поглинутий деревиною.

8. Архітектурна гнучкість – можливість формування комбінованих фасадних систем.

9. Комфортний мікроклімат – деревина «дихає», регулює вологість і сприяє стабільній температурі всередині приміщень.

CLT-панелі мають потенціал для широкого впровадження у сучасному масовому житловому будівництві, особливо у поєднанні з натуральними утеплювачами.

Пінополістирол демонструє найнижчий інтегральний рейтинг через низьку екологічність та високу енергоємність виробництва, хоча залишається поширеним у практиці через низьку  $\lambda$  і простоту використання.

### Висновки за розділом 3

1. Проведений багатокритеріальний аналіз (SMART-методика) та регресійне моделювання підтвердили доцільність використання натуральних волокнистих і древокомпозитних утеплювачів – ековати, арболіту, льону/конопель – у житловому будівництві. Вони забезпечують коефіцієнт теплопровідності  $\lambda = 0,035\text{--}0,045$  Вт/(м·К), паропроникність  $\mu = 0,7\text{--}0,9$ , щільність у межах  $\rho = 120\text{--}250$  кг/м<sup>3</sup>, що дозволяє досягати нормативного опору теплопередачі  $R = 4,5\text{--}5,5$  м<sup>2</sup>·К/Вт при товщині шару 160–200 мм.

2. Математичне моделювання встановило, що ефективність утеплювачів описується залежністю, де найбільший вплив на коефіцієнт ефективності мають параметри  $\lambda$  (до 40 %) і товщина шару  $d$  (до 35 %). Надмірне збільшення товщини понад 250 мм не призводить до істотного підвищення енергоефективності, але підвищує матеріалоємність системи.

3. Показники паропроникності  $\mu = 0,7\text{--}0,9$  та екологічного індексу  $ЕСО > 0,8$  мають нелінійний позитивний вплив на інтегральний коефіцієнт ефективності. Максимальні значення спостерігаються для ековати, арболіту та льону. Ці матеріали підтримують природний вологообмін у стінах, знижують ризик конденсації в шарах огорожувальної конструкції та не виділяють летких органічних сполук.

4. Для умов підвищених вимог до пожежної безпеки та міцності оптимальними є CLT-панелі ( $\lambda=0,12$  Вт/м·К,  $R=4,8$  м<sup>2</sup>·К/Вт), газобетон ( $\lambda=0,09\text{--}0,11$  Вт/м·К) та піногіпс ( $\lambda=0,08\text{--}0,10$  Вт/м·К). Вони мають

вогнестійкість REI 60–90, щільність  $\rho=450\text{--}650$  кг/м<sup>3</sup> і забезпечують стабільність геометрії конструкцій при температурі до 900 °С.

5. Встановлено типологічну диференціацію використання утеплювачів. Для приватного житлового будівництва доцільно застосовувати волокнисті утеплювачі з низькою щільністю (ековата, солома, льон, арболіт), які забезпечують мікрокліматичну стабільність і високий опір теплопередачі при мінімальному навантаженні на конструкцію. Для багатоповерхових будівель оптимальними є CLT-панелі, газобетон і піногіпс, які поєднують несучу здатність ( $\sigma_{\text{доп}}=2,0\text{--}3,5$  МПа) із прийнятними теплотехнічними характеристиками.

6. Розроблені інтегральні коефіцієнти ефективності (у межах  $K_{\text{інт}} = 0,47\text{--}0,83$ ) можуть використовуватися для:

- проектування зовнішніх стін, перекриттів і покрівель із заданим опором теплопередачі відповідно до ДБН В.2.6-31:2021;
- моделювання енергоспоживання будівель у програмах типу DesignBuilder, IDA ICE, EnergyPlus;
- оцінки життєвого циклу (LCA) матеріалів згідно з ISO 14040–14044.

7. Застосування комплексної методики SMART-аналізу у поєднанні з регресійним моделюванням дало змогу створити універсальну інженерну систему кількісної оцінки ефективності утеплювачів. Вона дозволяє прогнозувати поведінку теплоізоляційних систем на різних стадіях проектування, забезпечуючи досягнення класу енергоефективності “А” та відповідність принципам сталого будівництва (LEED, BREEAM, DGNB) у житловому секторі України.

## РОЗДІЛ 4

### ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

#### 4.1 Обґрунтування використання CLT-панелей у житловому будівництві

Використання CLT-панелей (Cross-Laminated Timber) у житловому будівництві є одним із найпрогресивніших напрямів сучасної інженерно-будівельної практики. Ця технологія поєднує високу несучу здатність, енергоефективність, екологічну безпечність та швидкість зведення будівель, що робить її перспективною альтернативою традиційним матеріалам – цеглі, залізобетону та газобетону.

CLT-конструкції відповідають концепції «зеленого будинку» (Green Building) і критеріям міжнародних стандартів LEED, BREEAM, DGNB, адже забезпечують мінімальний вуглецевий слід, комфортний мікроклімат і значне скорочення будівельних термінів.

CLT-панелі виготовляються шляхом склеювання кількох шарів масивної деревини, розташованих перпендикулярно один до одного. Така крос-ламінована структура забезпечує роботу матеріалу в двох напрямках і надає панелям властивостей монолітного конструкційного елемента. Кількість шарів зазвичай становить 3, 5 або 7. Товщина панелей варіює від 60 до 300 мм, залежно від призначення (стіни, перекриття, покриття). Механічна міцність: межа міцності на стиск уздовж волокон – до 30 МПа, на згин – 24–28 МПа. Середня щільність деревини – близько 470–520 кг/м<sup>3</sup>, що вдвічі менше, ніж у бетону. Теплопровідність –  $\lambda \approx 0.12\text{--}0.14$  Вт/м·К, що дозволяє зменшити товщину зовнішніх стін при досягненні нормативного опору теплопередачі [10-14]. CLT-панелі виготовляються в заводських умовах із високою точністю (допуск до  $\pm 1$  мм), що дає змогу реалізувати модульне будівництво з мінімальними витратами часу на монтаж.

Завдяки низькій теплопровідності деревини та можливості інтеграції додаткового шару ековати або арболіту, коефіцієнт опору теплопередачі стін

CLT-будинку становить  $R=5,0-6,5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , що відповідає класу енергоефективності «А».

CLT-панелі виготовляються із сертифікованої деревини (FSC, PEFC); під час виробництва вуглецеві викиди у 4–5 разів менші, ніж при виготовленні залізобетонних або цегляних конструкцій.

Зниження маси будівлі до 40–60 % порівняно із залізобетонними аналогами дозволяє економити на фундаментах. Заводська префабрикація зменшує обсяг «мокрих» процесів і витрати на робочу силу, що сприяє скороченню термінів зведення у 3–4 рази (поверх – за 1–2 дні монтажу).

Порівняльна характеристика CLT-панелей із традиційними матеріалами наведена на арк. 16 ГЧ роботи.

Одним із найвідоміших прикладів досвіду застосування CLT-технології є багатоповверхівка у Лондоні (Dalston Works) загальною площею понад 155000 м<sup>2</sup>, зведена лише за 18 місяців. Будівля повністю виконана з CLT-панелей і має один із найнижчих показників вуглецевого сліду серед житлових комплексів Європи [31, 32].

Подібні проекти реалізовано у Відні (HoHo Tower, 84 м), Берліні, Осло та Торонто, що демонструє перспективність технології для міського житлового середовища.

#### 4.2 Архітектурні рішення багатоквартирного житлового будинку

Представлений проєкт розроблений як приклад сучасного сталого житлового будівництва з використанням інноваційних дерев'яних конструкцій – CLT-панелей – у поєднанні з ефективним просторовим плануванням і високими вимогами до енергоефективності, інклюзивності та безпеки.

#### 4.2.1 Загальна характеристика об'єкта

Об'єктом проєктування є дев'ятиповерховий житловий будинок з підвальним і технічним поверхами, призначений для нового будівництва на вільній ділянці у міській забудові. Проєктована споруда має компактну й раціональну форму у плані – прямокутну – із симетричною структурою двох блок-секцій, що об'єднані глухими торцевими стінами. Така компоновка дозволяє не лише оптимізувати забудову ділянки, але й забезпечити кращу інсоляцію та захист від вітрових навантажень [46, 47].

Загальні габарити будівлі становлять  $57,0 \times 14,4$  м, причому кожна секція має розміри  $28,0 \times 14,4$  м. Будівля гармонійно інтегрується у навколишнє середовище, орієнтована паралельно до головної вулиці, що сприяє створенню логічної структури забудови кварталу [46, 48].

#### 4.2.2 Функціонально-просторова організація

Перший поверх будівлі запроєктовано як комерційно-нежитловий: тут передбачено 6 офісних приміщень, кожне з окремим входом, вестибюлем, технічними вузлами, санвузлом, коморами та торговими залами площею до  $47,5 \text{ м}^2$ . Завдяки автономному плануванню та доступності через окремі входи, офіси можуть використовуватись для широкого спектра послуг – від побутових до консультаційних або медичних.

Вхідні групи обладнані пандусами з поручнями, що відповідає нормативам доступності (ДБН В.2.2-40:2018), та подвійними тамбурами, що зменшують тепловтрати в зимовий період [49].

З другого по дев'ятий поверх розташована житлова частина, яка включає 72 квартири:

36 однокімнатних площею  $\sim 39,5 \text{ м}^2$ ,

36 двокімнатних  $\sim 66 \text{ м}^2$ ,

18 трикімнатних  $\sim 90 \text{ м}^2$ .

Типовий поверх об'єднує 5 квартир на секцію, що забезпечує оптимальний рівень щільності та комфорту. Всі квартири мають чітке

зонування: вхідна група, вітальня, кухня, санвузли, спальні, лоджії або балкони. Висота поверху – 3,0 м, що забезпечує хороший мікроклімат та просторову якість приміщень.

Центральний елемент комунікацій – сходово-ліфтовий вузол, обладнаний вантажопасажирським ліфтом вантажопідйомністю 1000 кг. Він забезпечує безбар'єрний доступ до кожного рівня, що важливо для сімей із дітьми, літніх людей та осіб з інвалідністю.

У підвалі передбачено:

Інженерні вузли підключення до зовнішніх мереж – водо-, тепло-, електропостачання;

Розміщення електрощитових, лічильників та вузлів обліку;

Найпростіше укриття для населення, що відповідає вимогам цивільного захисту у мирний і воєнний час.

Підвал виконаний із монолітного залізобетону, висота – 2,2 м. Вхід у технічну частину із зовнішнього боку.

#### 4.2.3 Архітектурно-конструктивні рішення

Проектована будівля виконана за змішаною конструктивною схемою – каркасно-панельною, що поєднує несучі дерев'яні елементи та монолітні залізобетонні конструкції. Такий підхід забезпечує високі показники енергоефективності, екологічності та конструктивної стабільності, а також дозволяє реалізувати концепцію сталого будівництва з мінімальним вуглецевим слідом.

У конструктивній системі будівлі використано три основні групи матеріалів:

- CLT-панелі (Cross-Laminated Timber) – застосовані як основний конструкційний матеріал для зовнішніх та внутрішніх несучих стін, міжповерхових перекриттів і перегородок [10-14, 50-51].

- Клеєна деревина – використовується для колон, ригелів і несучих елементів каркасу [8-9, 50-51].

- Монолітний залізобетон – застосований для підвалу, фундаментів і жорсткого ядра будівлі (ліфтових шахт), що забезпечує просторову жорсткість та стійкість споруди при вертикальних і горизонтальних навантаженнях [52].

Таке комбінування матеріалів дозволяє зменшити масу будівлі, підвищити швидкість монтажу і скоротити викиди CO<sub>2</sub> у процесі будівництва.

Зовнішні стіни запроєктовані тришарові:

- CLT-панелі товщиною 215 мм;
- утеплювач (ековата або мінеральна вата) товщиною 150–180 мм;
- вентиляований фасад із планкени з модрина.

Така конструкція забезпечує опір теплопередачі  $R = 5,2 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , що відповідає класу енергоефективності «А».

Внутрішні несучі стіни – CLT-панелі товщиною 215 мм, що працюють спільно з перекриттями, утворюючи жорсткий просторовий блок.

Перегородки – CLT-панелі товщиною 106 мм, мають високу звукоізоляційну здатність ( $R_w = 52 \text{ дБ}$ ).

Перекриття – CLT-панелі товщиною 123 мм, спираються на клеєні балки; забезпечують навантажувальну здатність до  $4,5 \text{ кН}/\text{м}^2$  при прольоті 5,0–5,5 м.

Колони – клеєні дерев'яні, перерізом  $210 \times 215 \text{ мм}$ , із вогнезахисним покриттям (REI 60).

Фундаменти – пальово-стрічкові з ростверком із бетону В20, армованим сталлю А400 Ø12–Ø16 мм. Глибина закладання – 2,8 м, що відповідає умовам промерзання ґрунтів II кліматичного району України.

Ліфтові шахти – монолітні залізобетонні стіни товщиною 200 мм, з бетону класу В25, арматура А500С.

Сходи – дерев'яні марші на сталевих косоурах із декоративним облицюванням дошкою із дуба; забезпечують комфортний кут нахилу  $30^\circ$ , висоту підйому сходинок 165 мм, проступ 300 мм.

Висота будівлі до верху парапету – 30,26 м, що відповідає 9-типоверховій надземній частині з технічним поверхом.

Інженерно-технічні характеристики:

- розрахункове навантаження на перекриття:  $q = 4,5 \text{ кН/м}^2$ ;
- модуль пружності CLT-панелей:  $E = 10,5 \text{ ГПа}$ ;
- гранична деформація при навантаженні:  $f/L \leq 1/300$ ;
- вогнестійкість основних конструкцій: REI 60–90;
- клас енергоефективності будівлі: А ( $R_{\text{заг}} \geq 5,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ );
- розрахунковий термін служби конструкцій:  $\geq 60$  років.

#### 4.2.4 Оздоблення, покрівля та звукоізоляція

Зовнішні фасади облицьовані планкеном з модрина – екологічно чистим, довговічним матеріалом із низькою теплопровідністю ( $\lambda=0,14 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ) та природною стійкістю до атмосферного впливу. Монтаж здійснено з вентиляційним зазором 40 мм, що забезпечує видалення вологи, запобігає конденсації та сприяє тривалому терміну служби оздоблення.

Покрівля – плоска експлуатована, конструкція включає [53]:

- гідроізоляційний шар із ПВХ-мембрани товщиною 1,5 мм;
- утеплення мінеральною ватою товщиною 200 мм ( $R = 5,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ );
- пароізоляційний шар із полімерної плівки;
- стяжку з ухилом 2 % для організації внутрішнього водовідведення;
- парапети висотою 1,1 м з оцинкованим ковпаком.

На покрівлі розміщені вентиляційні шахти, люки виходу, водостічні воронки та елементи безпеки обслуговування.

Для забезпечення звукоізоляції використано систему «плаваючої підлоги» з демпфувальним прошарком товщиною 15 мм (еластомерні мати,  $\Delta L_{\text{nw}} = 27 \text{ дБ}$ ). Стіни облицьовані магнезитовими плитами товщиною 12 мм із коефіцієнтом звукопоглинання  $\alpha = 0,35\text{--}0,55$ . На рівні інженерних вузлів застосовано вібродемпфуючі підкладки під колонами та перекриттями для зниження структурного шуму [54].

### 4.3 Інженерне обладнання будівлі

Проектом передбачено підключення до існуючих централізованих мереж:

- опалення – від міської тепломережі, із встановленням лічильників тепла;
- водопостачання і каналізація – централізовані;
- електропостачання – через окрему ТП та щитові на поверхах;
- вентиляція – приточно-витяжна із природним і механічним спонуканням.

### 4.4 Організаційно-технологічні рішення зведення конструкцій житлового будинку з CLT-панелей

#### 4.4.1 Область застосування та вихідні дані

Дана технологічна карта розроблена для монтажу несучих конструкцій житлового багатоповерхового будинку, виконаного виконаного за збірно-монолітною системою із використанням CLT-панелей (Cross-Laminated Timber), клеєної деревини та монолітних залізобетонних елементів [10-14].

Технологія застосовується при зведенні 9-поверхових житлових будівель із підвалом і технічним поверхом, у тому числі для проєктів, що реалізуються в умовах ущільненої міської забудови. Проєкт організації робіт розроблено для кліматичних умовах ІБ району України, при середньодобовій температурі від  $-15$  до  $+30$  °C [47].

Основна мета – забезпечити раціональну організацію будівельного процесу, підвищити швидкість монтажу, якість з'єднань, безпеку праці та енергоефективність готової споруди [17, 21, 55].

У таблиці 4.1 наведені основні технічні параметри об'єкта, що визначають організацію будівництва.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для монтажу конструкцій

№	Показник	Характеристика
1	Тип будівлі	Житловий багатоквартирний будинок
2	Поверховість	9 житлових поверхів + підвал + технічний поверх
3	Конструктивна схема	Каркасно-панельна (CLT + залізобетон)
4	Матеріали	CLT-панелі (123–215 мм), клеєна деревина (210×215 мм), монолітні елементи
5	Тип фундаменту	Пальово-стрічковий, бетон В20, арматура А400
6	Монтажне обладнання	Крани КБ-405.1А (8 т), КС-4261 (10 т)
7	Висота будівлі	30,26 м
8	Кліматичний район	ПБ, tзим = –22 °С

Вибір конструктивної схеми обґрунтований поєднанням CLT-панелей і монолітних елементів, що забезпечує оптимальне співвідношення міцності, маси та швидкості монтажу.

Крани типу КБ-405.1А та КС-4261 забезпечують необхідний вантажопідйомний та висотний діапазон для монтажу панелей масою до 3 т на висоту понад 30 м [56].

Стикування елементів виконується [14]:

- з'єднання болтами Ø16–20 мм, монтажними пластинами 150×200×6 мм;
- використання дюбель-гвинтів 8×120 мм та клеїв поліуретанового типу;
- ущільнення стиків термостійкими стрічками та герметиками;
- поверхнєве антисептування засобом Імпрегнат-1, вогнезахист – ПФ-2.

#### 4.4.2 Технологія виконання робіт

Монтаж несучих конструкцій житлового будинку з CLT-панелей виконується індустріальним методом із застосуванням баштового крана КБ-405.1А або автомобільного крана КС-4261, залежно від висоти і фронту робіт.

Будівля має змішану конструктивну схему: CLT-панелі застосовуються для зовнішніх та внутрішніх несучих стін, перекриттів і перегородок; клеєна

деревина використовується для колон і балок; монолітний залізобетон – для фундаментів і жорсткого ядра.

Роботи ведуться поперехово, знизу догори, у послідовності, що забезпечує рівномірне навантаження на фундамент і стабільність каркасу [10-14, 29, 32]:

- монтаж клеєних колон;
- монтаж зовнішніх CLT-панелей;
- монтаж внутрішніх панелей і перегородок;
- монтаж міжповерхового перекриття;
- повторення циклу для кожного рівня;
- завершення монолітних шахт та покрівлі.

Таблиця 4.2 містить алгоритм монтажного циклу, що реалізується поперехово-блоковим методом. Послідовність забезпечує рівномірний розподіл навантаження на конструкції, скорочення часу простою кранів і логічну взаємодію між ланками монтажною бригади. Застосування баштового крана дозволяє виконувати монтаж панелей без додаткових підйомників, що підвищує продуктивність і безпечність робіт.

Таблиця 4.2 – Послідовність виконання робіт

№	Назва операції	Короткий опис	Засоби механізації/ матеріали
1	2	3	4
1	Підготовка основи та геодезична розбивка	Розмітка осей, контроль рівнів, підготовка монтажних майданчиків	Нівеліри, тахеометри
2	Монтаж фундаменту	Бетонування з армуванням пальово-стрічкового фундаменту	Бетононасоси, вібратори, крани
3	Монтаж монолітних елементів підвалу і шахт	Зведення елементів жорсткого ядра (ліфтові шахти, зовнішні підвальні стіни)	Опалубка, арматура, бетон
4	Монтаж колон	Установка з попереднім антисептуванням клеєних колон 210×215 мм, антисептування	Баштовий кран КБ-405.1А, стропи
5	Монтаж зовнішніх стін	Установка CLT-панелі 215 мм з утепленням	Кран, монтажні петлі, шаблони

Продовження табл. 4.2

1	2	3	4
6	Монтаж несучих внутрішніх стін	CLT-панелі 215 мм, стики «паз-гребінь» або «шип-паз»	Шуруповерти, такелаж, монтажна бригада
7	Монтаж перегородок	CLT-панелі товщиною 106 мм	Ручний монтаж
8	Монтаж перекриттів	CLT-панелі 123 мм, модулі 2,4×7,2 м, фіксація	Кран, шуруповерти, монтажна рама
9	Монтаж сходів	Дерев'яні марші на сталевих косоурах	Кран, стропи, такелаж
10	Герметизація та теплоізоляція вузлів, стиків	Утеплення стиків, нанесення герметиків, ущільнювачів	Ручний інструмент, пістолети для герметиків
11	Покрівельні роботи	Тимчасові огороження, перекриття	Монтажні набори, зварювання

1. Підготовчий етап. Перед початком монтажу виконуються:

- геодезична розбивка основних осей і контрольних реперів по координатній сітці;
- підготовка монтажного майданчика, очищення території, улаштування підкранових шляхів;
- перевірка комплектності CLT-панелей, відповідність маркування проєктним кресленням;
- антисептична і вогнезахисна обробка торців, стиків і відкритих поверхонь деревини;
- обладнання тимчасового складування: панелі розташовують вертикально під кутом 10–15°, на підкладках висотою не менше 150 мм від ґрунту, із розділенням прокладками через 1,5–2,0 м.

2. Монтаж фундаменту і жорсткого ядра. Роботи виконуються за стандартною технологією монолітного будівництва:

- встановлення опалубки ростверку;
- укладання арматурного каркасу Ø12–Ø20 мм, класу А400;
- бетонування ростверку та плит підвалу бетоном В20 з ущільненням вібраторами;
- зведення монолітних стін ліфтових шахт і сходових клітин;

- досягнення бетоном міцності не менше 70 % перед початком монтажу дерев'яних елементів.

3. Монтаж несучих колон. Колони з клеєної деревини перерізом 210×215 мм встановлюються на закладні металеві елементи фундаменту з використанням сталевих анкерів і підп'ятників. Монтаж ведеться краном, із фіксацією тимчасовими розп'ірками. Після вивіряння вертикальності колони закріплюють болтовими з'єднаннями. Кожна колона обробляється антисептиком типу Neomid 440 або еквівалентом.

4. Монтаж зовнішніх стінових CLT-панелей. Монтаж ведеться згідно з технологічною картою монтажу:

- Панель піднімається краном за монтажні петлі або траверсу, перевірену на вантажопідйомність.

- Панель орієнтується за осями, опускається на встановлені анкери та вирівнюється по вертикалі.

- Кріплення здійснюється гвинтовими анкерами Ø12–16 мм через сталеві монтажні пластини типу Несо-Torix або Rothoblaas.

- Стики між панелями ущільнюються термостійкою стрічкою та герметиком на поліуретановій основі.

- Після закріплення двох-трьох панелей формується замкнений просторовий блок, який забезпечує просторову жорсткість рівня.

5. Монтаж внутрішніх стін і перегородок. Після встановлення зовнішнього контуру монтуються внутрішні CLT-панелі товщиною 215 мм за технологією стику «шип-паз» або «паз-гребінь». Панелі фіксуються до перекриттів саморізами Ø8 мм кроком 150–200 мм. Перегородки товщиною 106 мм встановлюються вручну без застосування крана, що дозволяє виконувати роботи паралельно з монтажем перекриттів попереднього рівня.

6. Монтаж перекриттів. Перекриття виконуються з CLT-панелей товщиною 123 мм (три шари, волокна під 90°). Монтаж здійснюється в наступній послідовності:

- подача панелі краном у горизонтальному положенні;

- вирівнювання по реперам і фіксація з'єднаннями «ластівчин хвіст» або металевими кутиками;
- стикування торців панелей за допомогою клеєних гребенів або сталевих шпонок;
- заповнення стиків монтажною піною та герметиком;
- після закріплення – перевірка відсутності прогину (допустимо  $\leq 1/300$  прольоту).

7. Монтаж сходів і покрівлі. Сходові марші з дерев'яних щаблів на сталевих косоурах подаються краном і встановлюються в готові монолітні шахти. Після завершення поверхових робіт виконується монтаж покрівельних CLT-панелей із шаром паро- та гідроізоляції. Утеплення покрівлі проводиться мінеральною ватою товщиною 200 мм, зверху укладається гідроізоляційний шар і експлуатована стяжка.

8. Герметизація та захист конструкцій. Після завершення монтажу кожного поверху проводиться герметизація всіх стиків і вузлів:

- нанесення силіконового герметика або ущільнюючих стрічок;
- закриття монтажних отворів і швів;
- нанесення антипірену I групи на відкриті торці деревини;
- контроль наявності вогнезахисного шару за допомогою індикаторних наклейок.

Всі поверхні, що контактують із зовнішнім середовищем, додатково покриваються пароізоляційною мембраною та фасадною підсистемою.

9. Контроль якості та приймання. Контроль проводиться за наступними параметрами:

- геометрична точність (вертикальність, горизонтальність, відхилення  $\leq 3$  мм/м);
- міцність і жорсткість вузлів кріплення;
- повнота антисептичної і антипіренової обробки;
- герметичність стиків.

Приймання конструкцій здійснюється поетапно, із заповненням Акту прихованих робіт та журналу монтажу.

10. Організаційно-технологічні умови. Монтаж ведеться у дві зміни: перша – вантажно-монтажні операції, друга – кріплення та герметизація.

Розрахункова продуктивність:  $\approx 200 \text{ м}^2$  на зміну, або 1 поверх за 2–3 дні.

Кількість робітників у ланці: 1 машиніст крана + 4 монтажники + 2 стропальники + 1 майстер.

Роботи допускається виконувати при температурі до  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  за умови використання морозостійких герметиків і сухих CLT-панелей.

#### 4.4.3 Вимоги до якості виконання робіт

Якість монтажу CLT-панелей безпосередньо впливає на геометричну точність будівлі, її жорсткість і довговічність.

Контроль проводиться у три етапи: попередній (при прийманні елементів), проміжний (у процесі монтажу) та заключний (після завершення циклу).

Найважливішими параметрами є вертикальність, щільність стиків і стан захисного покриття деревини.

Таблиця 4.3 – Вимоги до якості робіт

Етап робіт	Контрольний показник	Метод перевірки
Монтаж CLT-панелей	Відхилення від вертикалі $\leq 3 \text{ мм/м}$	Візуальний контроль, теодоліт, лазерний рівень
Герметизація стиків	Повна відсутність щілин у вузлах, герметичність	Візуальний огляд
Кріплення панелей	Мінімум 4 кріплень на вузол	Перевірка за кресленням
Монтаж перекриттів	Рівномірне прилягання, відсутність прогину $>5 \text{ мм}$	Лінійка, рівень, навантажувальні випробування
Обробка деревини	Суцільне покриття антисептиком і антипіреном	Візуальний контроль, наклейки індикаторів

#### 4.4.4 Охорона праці та безпека під час виконання робіт

Монтажні роботи із застосуванням CLT-панелей належать до категорії підвищеної небезпеки, оскільки виконуються на висоті, з використанням вантажопідіймальних механізмів, електроінструментів і горючих матеріалів (деревина, герметики, ізоляційні стрічки).

Всі роботи мають проводитись під керівництвом інженера-виробничника або майстра, який відповідає за дотримання правил техніки безпеки згідно ДСТУ EN ISO 12100:2016, ДБН А.3.2-2-2009 та Закону України “Про охорону праці” [57, 58].

Перед початком будівництва складається план організації будівельного майданчика (ПОБ) із позначенням зон дії кранів, складування елементів, проходів і шляхів евакуації.

До виконання робіт допускаються працівники, які:

- пройшли навчання та перевірку знань із питань охорони праці;
- мають допуск до робіт на висоті;
- пройшли медичний огляд і інструктаж на робочому місці;
- забезпечені засобами індивідуального захисту (ЗІЗ): каска, страхувальна система, рукавиці, захисне взуття, сигнальний жилет.

Перед початком робіт перевіряють стан вантажопідіймальної техніки, стропів, траверс, гаків і гальмівних систем. Всі такелажні пристрої повинні мати бірки з маркуванням вантажопідйомності.

Проводиться щоденний інструктаж із визначенням зон дії крана, шляхів руху вантажів та місць складування панелей.

На будівельному майданчику встановлюються попереджувальні знаки і захисні огорожі навколо небезпечних зон (радіус не менше 5 м від осі обертання крана).

Усі роботи дозволено виконувати лише після оформлення допуску до висотних робіт (наряд-допуск).

Перевіряється стійкість підмостків, риштувань і тимчасових огорожень, які мають відповідати ДСТУ EN 13374:2016.

Безпечна організація монтажу CLT-панелей:

- Зона дії крана має бути вільною від сторонніх осіб. Переміщення панелей здійснюється тільки по вертикалі над вільним простором.

- Монтаж проводиться за сигналами відповідального стропальника, який має відповідне посвідчення.

- Стропування CLT-панелей здійснюється через монтажні петлі або за допомогою траверс із гнучкими стропами, що виключають пошкодження торців і облицювання.

- При монтажі на висоті понад 1,3 м робітники повинні бути закріплені страхувальними поясами, під'єднаними до анкерних тросів.

Забороняється:

- знаходитися під піднятою панеллю або в зоні її гойдання;
- виконувати монтаж за швидкості вітру понад 10 м/с;
- піднімати панелі з несправними монтажними петлями або тріщинами;
- застосовувати пошкоджений такелаж чи стропи з деформаціями.

Після встановлення кожної панелі перевіряють стійкість і закріплення. Тимчасові розпірки демонтуються лише після жорсткого фіксування суміжних елементів.

Монтаж перекриттів проводиться лише після прийняття стін нижнього рівня актом прихованих робіт.

Електробезпека. Електроінструменти (шуруповерти, зварювальні апарати) повинні бути справні, із заземленням і захисним відключенням (ПЗВ). Подовжувачі – у гумовій ізоляції, розраховані на зовнішнє використання. Роботи в зоні діючих електроліній допускаються лише після узгодження з енергопостачальником і знеструмлення лінії. Освітлення робочої зони в темний час доби – не менше 50 лк.

Пожежна безпека. Дерев'яні елементи CLT мають підвищену пожежну небезпеку, тому:

- на будмайданчику заборонено зберігати горючі матеріали у безпосередній близькості до робочої зони;

- відстань від місць зварювання або різання металу до дерев'яних елементів – не менше 5 м;
- у зоні монтажу встановлюються вогнегасники (ОП-5, ВВК-5) та ємності з водою або піском;
- перед установленням дерев'яні конструкції покриваються антипіренами І групи ефективності, перевіреними за ДСТУ EN 13501-2;
- після завершення робіт здійснюється контроль температури поверхонь тепловізором.

Безпека при роботі на висоті. Під час монтажу стін і перекриттів на висоті понад 1,3 м робітники зобов'язані застосовувати страхувальні системи, шоломи, нековзке взуття. Тимчасові настили виконуються з дощок товщиною не менше 40 мм, закріплених без зазорів. Для виходу на покрівлю передбачено постійні сходи з огорожею. Робочі місця на висоті обладнуються захисними бар'єрами висотою 1,1 м і бортиками 150 мм. У місцях підйому матеріалів встановлюються сигнальні канати і знаки “Робота крана”.

Санітарно-гігієнічні вимоги. На об'єкті мають бути облаштовані побутові приміщення для зберігання ЗІЗ, обігріву, сушіння одягу. Робочі зони мають відповідати нормам мікроклімату ( $t = 15\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , вологість 40–60 %). Забезпечується щоденне прибирання тирси, пакувальних матеріалів, обрізків деревини. Встановлюються контейнери для збору відходів CLT, що підлягають вторинній переробці.

Дії у разі нештатної ситуації. У разі виникнення аварійних або небезпечних ситуацій:

- негайно зупинити роботу механізмів і повідомити відповідального за безпечне виконання робіт;
- вивести працівників із небезпечної зони;
- викликати службу ДСНС (101) або медичну допомогу (103);
- забезпечити первинне надання домедичної допомоги постраждалим (аптечка на кожному робочому рівні);

- заборонено відновлювати роботи до усунення причин аварії та оформлення акту про нещасний випадок.

Застосування системи організаційно-технічних заходів із безпеки праці під час монтажу CLT-панелей гарантує:

- зниження рівня виробничого травматизму;
- дотримання вимог пожежної, електричної та техногенної безпеки;
- забезпечення належних санітарно-гігієнічних умов;
- підвищення надійності й довговічності дерев'яних конструкцій у процесі експлуатації.

#### 4.4.5 Техніко-економічні показники

Техніко-економічні показники демонструють ефективність індустріального способу будівництва [59, 60].

Монтаж одного поверху триває 2–3 дні, що дозволяє завершити коробку будівлі за трохи більше місяця.

Завдяки точній заводській геометрії CLT-панелей трудомісткість зменшується на 25–30 % у порівнянні з традиційними технологіями.

Вартісні показники включають матеріали, транспорт, такелаж і заробітну плату монтажників (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Техніко-економічні показники монтажу

№	Показник	Одиниця виміру	Значення
1	Загальна площа монтажу	м <sup>2</sup>	6600
2	Кількість робітників у зміну	осіб	12–32
3	Загальна трудомісткість	люд.-змін	122,5
4	Тривалість монтажу	днів	33
5	Продуктивність монтажу	м <sup>2</sup> /змін	200
6	Середня маса панелі	т	1,8–3,2
7	Вартість CLT-панелей	грн/м <sup>2</sup>	7500–8000
8	Клас вогнестійкості	REI	60–90
9	Енергоефективність будівлі	R <sub>заг</sub> , м <sup>2</sup> ·К/Вт	≥ 5,0

#### 4.5 Розробка будівельного генерального плану

Будівельний генеральний план (будгенплан) є основним документом, що визначає організацію території будівельного майданчика на період виконання основних будівельно-монтажних робіт.

Його метою є забезпечення раціонального розміщення тимчасових будівель, складів, технічних комунікацій, проїздів, зон монтажу і кранів, а також створення безпечних та ефективних умов праці під час будівництва житлового будинку з CLT-панелей.

Розробка будгенплану здійснена відповідно до вимог:

- ДБН А.3.1-5:2016 «Організація будівельного виробництва» [55];
- ДБН В.1.2-14:2018 «Система стандартів безпеки праці» [61];
- ДСТУ-Н Б А.3.1-23:2013 «Настанова щодо проведення робіт із улаштування ізоляційних, оздоблювальних та захисних покриттів» [62];
- планувальні рішення постійного генерального плану об'єкта.

##### 4.5.1 Вихідні дані

Тип об'єкта: житловий багатоповерховий будинок (9 поверхів, підвал, технічний поверх).

Основна технологія зведення: монтаж CLT-панелей із застосуванням баштового крана КБ-405.1А.

Територія забудови: 0,45 га.

Загальна площа забудови: 2 495,5 м<sup>2</sup>.

Площа тимчасових будівель і споруд: 213,26 м<sup>2</sup>.

Протяжність тимчасових доріг: 0,37 км.

Протяжність тимчасових комунікацій: 1,4 км.

##### 4.5.2 Розміщення основних елементів

На будгенплані передбачено комплексне розміщення всіх елементів, необхідних для ефективного ведення робіт.

1. Робоча зона монтажу. Зона дії баштового крана КБ-405.1А охоплює весь контур будівлі, забезпечуючи подачу CLT-панелей без додаткового переміщення. Радіус дії крана – 25 м, висота підйому – 30 м, вантажопідйомність – 5 т. У місцях роботи крана нанесено зони небезпечних радіусів (контури дії стріли).

2. Тимчасові споруди і допоміжні приміщення, передбачені проектом наведено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Тимчасові будівлі та споруди

№	Найменування	Кількість	Розміри, м	Тип конструкції
1	Будівля для будівельної бригади	1	13,4×4,7	Проектована
2	Гараж/склад	1	9,0×3,0	Контейнер
3	Їдальня	1	9,0×3,0	Модульна
4	Умивальня	1	2,1×3,0	Побутовий блок
5	Туалет	1	3,0×3,0	Типовий
6	Медпункт	1	3,0×3,0	Мобільний
7	Майстерня	1	3,0×3,0	Інвентарна
8	Навіс для матеріалів	2	3,0×4,0	Інвентарний
9	Пункт миття коліс	1	3,0×11,0	Проектований

Розміщення будівель забезпечує мінімальні транспортні відстані між складом CLT-панелей, зоною дії крана та місцем монтажу.

Склади CLT-панелей розміщені вздовж північного фасаду, що дозволяє виконувати монтаж у напрямку роботи крана без повторного переміщення.

Панелі зберігаються у вертикальному положенні з нахилом 10–15°, на дерев'яних підкладках.

Всі матеріали, що вимагають захисту від атмосферних опадів, зберігаються під навісами або в інвентарних контейнерах.

#### 4.5.3 Тимчасові дороги та транспортна схема

Основна транспортна артерія – асфальтована кільцева дорога шириною 4,5 м із розворотними майданчиками. Радіуси поворотів відповідають габаритам автомобілів довжиною до 9 м.

На території позначено напрямки руху транспорту та місця для стоянки будівельних машин.

Пропускна здатність дороги забезпечує одночасне рух двох транспортних засобів.

У місцях розвантаження CLT-панелей передбачено під'їзні майданчики з твердим покриттям.

Для виконання основних робіт прийнято машини і механізми, наведені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Машини і механізми

Механізм	Тип/модель	Вантажопідйомність	Радіус дії	Висота підйому
Баштовий кран	КБ-405.1А	5 т	25 м	30 м
Автокран	КС-4261	10 т	16 м	20 м
Бетононасос	СБ-126	—	35 м	—
Віброплита	ІВ-98	—	—	—

#### Вимоги безпеки та організації руху

- Зони дії кранів і місця підйому вантажів огорожуються сигнальною стрічкою і попереджувальними знаками.
- Рух автотранспорту регламентується односторонньою схемою для уникнення зустрічних потоків.
- У нічний час забезпечується штучне освітлення території не менше 20лк.
- Передбачено пункт миття коліс на виході з майданчика, щоб запобігти винесенню ґрунту на міські дороги.
- Дренажна система забезпечує відведення атмосферних опадів із робочих зон.

#### 4.5.4 Тимчасові інженерні комунікації

На території передбачено прокладання:

- тимчасових електромереж 0,4 кВ від трансформаторної підстанції;

- тимчасового водопроводу для господарсько-побутових потреб і зволоження поверхонь;
- каналізаційного колектора для підключення санітарних вузлів;
- мереж зв'язку і сигналізації для координації монтажних процесів.

#### 4.5.5 Техніко-економічні показники будгенплану

Техніко-економічні показники будівельного генерального плану визначають ефективність організації будівельного майданчика, раціональність використання території, засобів механізації, трудових ресурсів і транспортної інфраструктури. Розрахунки виконано відповідно до вимог ДБН А.3.1-5:2016 “Організація будівельного виробництва” та ДСТУ Б А.3.1-22:2013 [55, 62].

Характеристика показників:

1. Протяжність тимчасових доріг ( $L_d = 0,37$  км). Визначає загальну довжину внутрішньомайданчикових транспортних шляхів, що забезпечують під'їзд до всіх основних зон – складування, монтажу, побутових приміщень і кранів. Покриття виконане з щебенево-асфальтової суміші, ширина дороги 4,5 м. Протяжність вибрана з урахуванням раціональної схеми кільцевого руху транспорту без перехрещення потоків.

2. Протяжність тимчасових комунікацій ( $L_k = 1,4$  км). Складається з мереж електропостачання, водопостачання, зв'язку та каналізації. Водопровідна мережа виконана з поліетиленових труб  $\varnothing 50$  мм, електромережі – кабелем СПП-4 перерізом  $4 \times 35$  мм<sup>2</sup>. Всі комунікації прокладені відкритим способом у межах тимчасових траншей на глибину 0,6–0,8 м.

3. Площа забудови ( $F_z = 2495,5$  м<sup>2</sup>). Це площа, зайнята основною будівлею на рівні землі. Показник визначає навантаження на територію та співвідношення забудованої і вільної площі. При коефіцієнті забудови 0,37 забезпечено достатню площу для розміщення тимчасових споруд, складів і техніки.

4. Площа тимчасових будівель і споруд ( $F_t = 213,26$  м<sup>2</sup>). У цю площу входять побутові, адміністративні, санітарно-побутові приміщення, склади та

навіси. Показник не перевищує нормативний рівень (до 10 % площі забудови), що свідчить про раціональну організацію допоміжного господарства.

5. Площа складів і навісів ( $F_c = 48,4 \text{ м}^2$ ). Використовується для тимчасового зберігання CLT-панелей, клеєної деревини, анкерних елементів та оздоблювальних матеріалів. Розташування складів у зоні дії крана мінімізує транспортні витрати та знижує час подачі матеріалів.

6. Загальна площа майданчика ( $F_m = 0,45 \text{ га}$ ). Включає всі функціональні зони: будівництва, складування, побутового обслуговування, комунікацій і доріг. Оптимальне співвідношення між забудованою та відкритою площею становить 55:45 %, що відповідає вимогам ефективного використання території.

7. Пропускна здатність під'їздів ( $Q_{\text{тр}} = 6 \text{ авт./год}$ ). Забезпечує можливість безперервного підвезення матеріалів і вивезення відходів без чергування транспортних засобів. Розрахована з урахуванням роботи одного баштового крана і середнього часу розвантаження 10–12 хвилин на автомобіль.

8. Кількість працівників на майданчику ( $n = 45 \text{ осіб}$ ). Включає монтажників, стропальників, машиністів, електромонтажників, бетонярів, арматурників, слюсарів, водіїв та інженерно-технічних працівників. Роботи ведуться у дві зміни по 10 годин із перервами, що дозволяє виконати графік будівництва в межах запланованого терміну.

Отримані техніко-економічні показники свідчать про:

- високий рівень індустріалізації будівництва – мінімізація ручних процесів за рахунок використання монтажної техніки;
- раціональне використання площі майданчика – достатньо місця для складування, транспорту та безпечного переміщення;
- ефективну логістику подачі матеріалів – відсутність перехрещення потоків транспорту і працівників;
- економічність інженерного забезпечення – короткі траси комунікацій, що зменшують втрати ресурсів;

- високий рівень безпеки – розділення зон руху транспорту, складування та монтажу.

#### Висновки за розділом 4

Застосування CLT-панелей і клеєних дерев'яних елементів забезпечує поєднання високих міцнісних характеристик і теплоізоляційних властивостей, що відповідають вимогам ДБН В.2.6-161:2017 та ДБН В.2.6-31:2021. Конструкції з CLT-панелей мають високу енергоефективність ( $R \geq 5,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ), вогнестійкість REI 60–90 та низький вуглецевий слід, що відповідає критеріям сталого будівництва.

Використання дерев'яних несучих елементів знижує масу будівлі на 40–50% порівняно із залізобетонними аналогами, що дає економію на фундаментах до 15%. Конструкції відзначаються високою точністю з'єднань.

Використання вентиляованого фасаду з модрина підвищує довговічність огорожувальних конструкцій і сприяє зниженню експлуатаційних витрат.

Комбінована система дерев'яного та бетонного каркасу забезпечує надійність, стійкість і технологічну адаптивність будівлі, створюючи оптимальні умови для реалізації принципів енергоефективного та екологічного будівництва.

Запропоновані організаційно-технологічні рішення дозволяють забезпечити раціональне використання техніки, безпечні умови праці та мінімальні втрати часу, що робить технологію CLT перспективною для масового житлового будівництва в Україні.

Завдяки високій точності заводського виготовлення та сухому монтажу, відсутні усадкові деформації, а об'єкт придатний до подальших оздоблювальних робіт одразу після монтажу.

Технологія монтажу CLT-панелей забезпечує високу індустріалізацію будівництва та скорочення строків зведення до 2–3 днів на поверх, що

скорочує загальну тривалість будівництва більш ніж удвічі порівняно з традиційними технологіями.

Запропонована технологічна схема дозволяє раціонально використовувати кранове обладнання, трудові ресурси та матеріали, забезпечуючи безпечне виконання робіт.

Будівельний генеральний план забезпечує раціональну організацію території, безпечні умови праці, оптимальну логістику матеріалів і механізмів, а також дотримання вимог екологічної та пожежної безпеки. Запропоновані рішення відповідають вимогам ДБН А.3.1-5:2016, сприяють скороченню термінів будівництва та підвищенню ефективності монтажу CLT-панелей.

Отже, використання CLT-технології є перспективним напрямом для розвитку масового екологічного житлового будівництва України.

## РОЗДІЛ 5

### ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

#### 5.1 Кошторисна вартість будівництва

В даному розділі визначаємо кошторисну вартість будівництва 8-ми поверхового житлового будинку, каркас будівлі із клеєних дерев'яних конструкцій і CLT-плит перекриття, стін з CLT-панелей. Для розрахунку вартості будівництва дотримувалися вимог КНУ «Настанови з визначення вартості будівництва».

Для визначення кошторисної вартості складаємо інвесторську кошторисну документацію [59, 60]:

- локальний кошторис на загально будівельні роботи (таблиця 5.1),
- на внутрішні санітарно-технічні роботи (таблиця 5.2),
- внутрішні електромонтажні (таблиця 5.3),
- на монтаж технологічного устаткування (таблиця 5.4),
- на придбання технологічного устаткування (таблиця 5.5),
- об'єктний кошторис(таблиця 5.6),
- зведений кошторисні розрахунки (ЗКР) (таблиці 5.7).

Локальні кошториси (таблиця 5.1 – 5.5) підраховуємо за укрупненими кошторисними нормами на основі об'єму будівлі (разом з підземною частиною) – 26232,77 м<sup>3</sup>.

Заробітна плата 7 –го розряду робіт -171.52 грн/люд-год для розрахунку заробітної плати робочих, що виконують загально виробничі витрати. Кошторисний прибуток приймаємо 22.5 грн/люд-год, адміністративні витрати 5,66 грн/люд-год, ризик усіх учасників інвестиційного процесу – 2,5% від суми глав 1-12 ЗКР, витрати, які враховують інфляційні процеси, приймаємо 32,2 % від суми глав 1-12 ЗКР.

Для розрахунку кошторисного прибутку в ЗКР необхідно визначити загальну кошторисну трудомісткість по будівельному об'єкту, яка складається з таких трудовитрат:

- нормативно-розрахункова кошторисна трудомісткість в прямих витратах –  $T_{ПВ}$  (визначається за локальними кошторисами) – 135,413 тис. люд-год;
- розрахункова кошторисна трудомісткість в загальновиробничих витратах (ЗВВ) (визначається за локальними кошторисами) – 14,819 люд-год;
- розрахункова кошторисна трудомісткість в засобах на зведення та розбирання титульних тимчасових будівель та споруд:

$$T_{Тимч} = 0,015 \times T_{ПВ} = 2,031 \text{ тис. люд-год}, \quad (5.1)$$

де 0,015 – усереднений показник розрахункової трудомісткості робіт на зведення та розбирання тимчасових будівель;

- розрахункова кошторисна трудомісткість в додаткових затратах при виконанні БМР в зимовий період:

$$T_{зим} = 0,166 \times T_{ПВ} = 22,478 \text{ тис. люд-год}, \quad (5.2)$$

де 0,166 – усереднений показник розрахункової трудомісткості робіт в зимовий період. Всього  $T = 174,741$  тис. люд-год.

Кошторисний прибуток  $\Pi = 22.5 \times 174,741 = 3931,68$  тис. грн.

Загальна площа приміщень становить  $11296 \text{ м}^2$ .

Прибуток від продажу із розрахунку, що  $1 \text{ м}^2$  житлової площі коштує 24 тис. грн :

$$\Pi = 24 \times 174,741 = 4193,784 \text{ тис. грн.} \quad (5.3)$$

Строк окупності – 1 рік

Таблиця 5.1 – Локальний кошторис № 1  
на загальнобудівельні роботи

Кошторисна вартість – 72722.762 тис. грн.

Основна зарплата – 28025.193 тис. грн.

Нормативна трудомісткість – 74,039 тис.люд.-год.

Складений в цінах 2025 р.

Середній розряд робіт 3.8 розряд

№ п/п	Шифр і номер позиції нормативу	Найменування робіт та витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати праці робітників, не зайнятих обслуг. маш.	
					Всього	Експл. машин	Всього	ОЗП	Експл машин	тих, що обслуговують машини, люд-год	
										ОЗП	в т. ч. ОЗП
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	УКН	Загально будівельні роботи	м <sup>3</sup>	26232,77	2452,3	298,45	64330622	24009018	7829170	2,31	60598
					915,23	101,23			2655543	0,21	5509
		<b>Всього:</b>					64330622	24009018	7829170		60598
									2655543		5509
					в т. ч. вартість матеріалів			32 492 434			
					всього зарплата			26 664 561			
					Разом ЗВВ по кошторису			8 392 140			
					Нормативна трудомісткість в ЗВВ			7933			
					Нормативна зарплата в ЗВВ			1360632			
					Обов'язкові платежі та внески			6 537 031			
					Решта статей ЗВВ			494477			
					Кошторисна вартість			72 722 762			
					Нормативна трудомісткість			74039			
					Кошторисна зарплата			28 025 193			

Склав \_\_\_\_\_

Перевірив \_\_\_\_\_

Таблиця 5.2 – Локальний кошторис № 02-01-02  
на внутрішні санітарно-технічні роботи

Кошторисна вартість 17555,711 тис. грн.  
Кошторисна заробітна плата –5195,182 тис. грн.  
Кошторисна трудомісткість – 40,133 люд.-год.  
Середній розряд робіт 3.8 розряд

Складений в цінах 2025 р.

№ п/п	Шифр і номер позиції нормативу	Найменування робіт та витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати праці робітників, не зайнятих обслуг. маш.	
					Всього	Експл. машин	Всього	ОЗП	Експл. машин	тих, що обслуговують машини, люд-год	
										Основн ЗП	в т. ч. ОЗП
1	УКН	Влаштування опалення	100 м <sup>3</sup>	262,33	17845,21	559,14	4681293	381760	146678	23,8	6243
					1455,28	130,3			34181	1,17	307
2	УКН	Влаштування вентиляції	100 м <sup>3</sup>	262,33	4260,6	645,02	1117673	374499	169207	11,9	3122
					1427,6	126,62			33216	0,57	150
3	УКН	Влаштування водопроводу	100 м <sup>3</sup>	262,33	8365,42	761,42	2194481	347269	199742	10,26	2691
					1323,8	131,2			34417	0,48	126
4	УКН	Влаштування каналізації,	100 м <sup>3</sup>	262,33	7298,76	474,9	1914667	376519	124579	58,3	15294
					1435,3	128,9			33814	3,1	813
5	УКН	Влаштування газопостачання	100 м <sup>3</sup>	262,33	20835,46	778,25	5465718	2897486	204157	28,1	7371
					11045,29	106,45			27925	0,77	202
		<b>Всього:</b>					15373833	4377533	4377533		34722 1598
		в тому числі вартість матеріалів					10151938				
		всього зарплата					4541087				
		Разом ЗВВ по кошторису					2181878				
		Нормативна трудомісткість в ЗВВ					3814				
		Нормативна зарплата в ЗВВ					654096				
		Обов'язкові платежі та внески					1211805				
		Решта статей ЗВВ					315978				
		Кошторисна вартість					17555711				
		Нормативна трудомісткість					40133				
		Кошторисна зарплата					5195182				

Житловий будинок  
(назва будови)

Додаток № 1

Таблиця 5.3 – Локальний кошторис № 02-01-03  
на внутрішні електромонтажні роботи

Кошторисна вартість – 11614,029 тис. грн.

Основна зарплата – 515.424 тис. грн.

Нормативна трудомісткість – 14.106 тис. люд.-год.

Складений в цінах 2025 р.

Середній розряд робіт 3.8 розряд

№ п/п	Шифр і номер позиції нормативу	Найменування робіт та витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати праці робітників, не зайнятих обслуг. маш.	
					Всього	Експл. машин в т. ч. ОЗП	Всього	ОЗП	Експл машин в т. ч. ЗП	тих, що обслуговують машини, люд.-год	
1	УКН	Влаштування електроосвітлення	100 м <sup>3</sup>	262,3	12293,34	549,84	3224884	446854	144238	76,84	20157
					1703,42	58,55			15359	2,96	776
2	УКН	Електросил обладн.: а) вартість обладнання	100 м <sup>3</sup>	262,3	9370		2458011				
3	УКН	б) влаштування обладнання	100 м <sup>3</sup>	262,3	19281,6	86,69	5058098	142245	22741	16	4197
					542,24	23,73			6225	2,6	682
				<b>Всього:</b>			10740992	589099	166979		24355
								21584			1573
					в т. ч. вартість матеріалів			9984914			
					всього зарплата			610683			
					Разом ЗВВ по кошторису			873037			
					Нормативна трудомісткість в ЗВВ			2515			
					Нормативна зарплата в ЗВВ			431368			
					Обов'язкові платежі та внески			243064			
					Решта статей ЗВВ			198605			
					Кошторисна вартість			11614029			
					Нормативна трудомісткість			28443			
					Кошторисна зарплата			1042051			

Таблиця 5.4 – Локальний кошторис № 02-01-04  
на монтаж технологічного устаткування

Кошторисна вартість – 14899,643 тис.грн.

Основна зарплата – 419,549 тис. грн.

Нормативна трудомісткість – 7617 люд.-год.

Середній розряд робіт 3.8 розряд

Складений в цінах 2025 р.

№ п/п	Шифр і номер позиції нормативу	Найменування робіт та витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати праці робітників, не зайнятих обслуг. маш.	
					Всього	Експл. машин в т. ч. ОЗП	Всього	ОЗП	Експл машин в т. ч. зарплата	тих, що обслуговують машини, люд-год	
										11	12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	УКН	Монтаж технологічного устаткування	1000 м <sup>3</sup>	26,233	558924,92	1283,85	14662149	312630	33679	258,7	6786
		<b>Всього:</b>			11917,55	429,45					11266
							14662149	312630	11266		273
					в т. ч. вартість матеріалів			14315840			
					всього зарплата			323896			
					Разом ЗВВ по кошторису			237494			
					Нормативна трудомісткість в ЗВВ			558			
					Нормативна зарплата в ЗВВ			95653			
					Обов'язкові платежі та внески			97862			
					Решта статей ЗВВ			43979			
					Кошторисна вартість			14899643			
					Нормативна трудомісткість			7617			
					Кошторисна зарплата			419549			

Склав \_\_\_\_\_

Перевірив \_\_\_\_\_

Житловий будинок  
(назва будови)

Додаток № 2

Таблиця 5.5 – Локальний кошторис № 02-01-05  
на придбання технологічного устаткування

Складений в цінах 2025 р.

Кошторисна вартість – 13939,29 тис. грн.

№ п/п	Шифр і номер позиції нормативу	Найменування робіт та витрат,	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.	Загальна вартість, грн.
1	2	3	4	5	6	7
1	УКН	Технологічне устаткування	1000 м <sup>3</sup>	26,233	501703,32	13161068
	Разом					13161068
	Запасні частини 1%					131611
	Разом					13292678
	Витрати на тару, упаковку та реквізити 0,5%					66463
	Разом					13359142
	Транспортні витрати 3 %					400774
	Разом					13759916
	Заготівельно-складські витрати 0,9%					123839
	Разом					13883755
	Комплектація 0,4%					55535
	Всього по кошторису					13939290

Склав \_\_\_\_\_

Перевірив \_\_\_\_\_

## Додаток № 4

Затверджений

Замовник \_\_\_\_\_

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Таблиця 5.6 – Об’єктний кошторис № 02-01

Базисна кошторисна вартість 130731,44 тис. грн.

Нормативна трудомісткість 150,23 тис. люд.-год

Кошторисна заробітна плата 34681,98 тис. грн.

Вимірювач одиничної вартості 1 м<sup>2</sup> 11573 грн.

Складений в цінах 2025 р.

№ п / п	Номер кошторисів і розрахунків	Найменування робіт і витрат	Кошторисна вартість, тис грн.			Кошторисна трудомісткість тис. люд.-год.	Кошторисна ЗП тис. грн.	Показник одиничної вартості грн.
			Будів. роботи	Устаткування	Всього			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	<b>Локальний кошторис № 1</b>	Загально-будівельні роботи	72722,76		72722,76	74,04	28025,19	6438
2	Локальний кошторис № 2	Внутрішні санітарно-технічні роботи	17555,71		17555,71	40,13	5195,18	1554
3	Локальний кошторис № 3	Електромонтажні роботи	9156,02	2458,01	11614,03	28,44	1042,05	1028
4	Локальний кошторис № 4	Монтаж технологічного обладнання	14899,64		14899,64	7,62	419,55	1319
5	Локальний кошторис № 5	Придбання устаткування		13939,29	13939,29			1234
		Разом	114334,13	16397,30	130731,44	150,23	34681,98	11573

Додаток № 5  
Затверджено  
Зведений кошторисний розрахунок в сумі 166265,9 тис.грн.  
В тому числі зворотні суми 163,67 тис. грн.  
„ „ 2025 р.

Таблиця 5.7 – Зведений кошторисний розрахунок вартості будівництва

Складений в цінах 2025 р.

№ п/п	Номер кошторисів і кошторисних розрахунків	Найменування глав, об'єктів, робіт і витрат	Кошторисна вартість, тис. грн.			
			буд. робіт	устаткування меблів та інвентарю	Інших витрат,	Загальна вартість
1	2	3	4	5	6	7
1		Глава 1				
		Підготовка території будівництва				
		Відведення земельної ділянки				
		Всього по главі 1	98,45		54,38	152,83
2		Глава 2				
		Основні об'єкти будівництва				
		Житловий будинок				
		Всього по главі 2	114334,13	16397,30		130731,44
3		Глава 4				
		Об'єкти енергетичного господарства				
		Всього по главі 4	98,12	12,32	48,12	158,56
5		Глава 5 Об'єкти транспортного господарства і зв'язку				
		Будівництво автомобільних шляхів				
4		Всього по главі 5	88,12			88,12
5		Глава 6 Зовнішні мережі (споруди водопостачання, каналізації, теплопостачання і газифікації)				
		Зовнішня мережа водопостачання				
		Зовнішня мережа каналізації				
		Всього по главі 6	165,21	16,23	21,58	203,02

Продовження таблиці 5.7

1	2	3	4	5	6	7
6		Глава 7				
		Благоустрій території				
		Всього по главі 7	71,25	45,12	5,4	121,77
		Всього по главах 1-7	114855,28	16470,97	129,48	131455,74
7		Глава 8				
		Тимчасові будівлі та споруди				
		Всього по главі 8	1091,13			1091,13
		Всього по главах 1-8	115946,41	16470,97	129,48	132546,86
8		Глава 9 Інші роботи і витрати				
		Додаткові витрати при виконанні будівельно-монтажних робіт у зимовий період				
		Всього по главі 9	730,46			730,46
		Всього по главах 1-9	116676,87	16470,97	129,48	133277,32
9		Глава 10				
		Утримання дирекції підприємства будівництва та авторського нагляду				
		Утримання дирекції і технічного надзору			1999,16	1999,16
		Утримання служб замовника			1332,77	1332,77
		Всього по главі 10			3331,93	3331,93
11		Глава 12				
		Проектно вишукувальні роботи			3331,93	3331,93
		Експертиза проектно-вишукувальних робіт			499,79	499,79
		Всього по главі 12			3831,72	3831,72
		Всього по главах 1-12	116676,87	16470,97	7293,14	140440,98
12		Кошторисний прибуток	3931,68	-	-	3931,68
13		Кошти на покриття ризику усіх учасників будівництва	2916,92	411,77		3328,70
14		Засоби на покриття адміністративних витрат будівельно монтажної організації			989,04	989,04
		Кошти на покриття додаткових витрат пов'язаних з інфляційними процесами	15401,35	2174,17		17575,52
		Всього по ЗКР	138926,82	19056,91	8282,17	166265,90
		Зворотні суми				163,67

## 5.2 Розрахунок техніко-економічних показників проекту

Техніко-економічні показники проекту наведені в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Техніко-економічні показники проекту

Назва показника	Одиниця виміру	Дипломний проект	
		Розрахунок	Показник
Площа забудови,	м <sup>2</sup>	S <sub>заб</sub>	3150
Будівельний об'єм,	м <sup>3</sup>	V	26232,77
Загальна площа	м <sup>2</sup>		11296
Кошторисна вартість			
а) будівництва	тис.грн.	Зв.коштр.	63896,23
б) об'єкта	тис.грн.	Об'єк. кошт.	130731,44
в) БМР (С <sub>БМР</sub> )	тис.грн.	Лок.кошт	72722,76
Кошторисна вартість загальнобудівельних робіт на 1 м <sup>2</sup> будівлі	грн.	С <sub>БМР</sub> / S	11573
Витрати праці	тис. люд-год	T	150,23
Середньо змінний виробіток на одного робітника	Тис.грн./люд-год	С <sub>БМР</sub> / T	982,21
Витрати праці на 1 м <sup>3</sup> будівлі	люд-год	T / V	5,72
Прибуток буд. організації	тис. грн.		271108,8
Рівень рентабельність	%		9,52
Строк окупності	роки		1

## Висновки за розділом 5

В даному розділі складена кошторисна документація для визначення кошторисної вартості 8-ми поверхового житлового будинку із клеєних дерев'яних конструкцій. Складені локальні кошториси, об'єктний кошторис, зведений кошторисний розрахунок, прораховані техніко-економічні показники. Кошторисна вартість будівництва за зведеним кошторисним розрахунком становить 166265,9 тис. грн. На основі підрахованого прибутку від продажу квартир – 271108,8 тис. грн. визначений строк окупності – 1 рік.

## ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі вирішено комплекс науково-прикладних завдань, спрямованих на оцінку ефективності застосування екологічно чистих матеріалів для утеплення житлових будівель з урахуванням їх теплотехнічних, екологічних, економічних та гігієнічних властивостей.

Проведене дослідження дозволяє зробити такі узагальнені висновки:

1. У результаті аналітичного огляду сучасного ринку теплоізоляційних матеріалів в Україні та країнах ЄС визначено тенденцію переходу до використання екологічно безпечних, відновлюваних і низьковуглецевих утеплювачів. Найбільш перспективними з точки зору сталого будівництва визнано матеріали на основі природної сировини – соломи, льону, конопель, деревоволокна, а також дерев'яні конструкції типу CLT-панелей.

2. Порівняльний аналіз фізико-механічних, теплотехнічних та гігієнічних властивостей утеплювачів засвідчив, що натуральні матеріали (ековата, льон, деревоволокно, солома) забезпечують належний рівень опору теплопередачі ( $\lambda = 0,038\text{--}0,045$  Вт/м·К) при високій паропроникності, гігієнічності та відсутності токсичних викидів. Вони формують здоровий мікроклімат у приміщеннях і знижують навантаження на інженерні системи.

3. На основі багатокритеріального SMART-аналізу розроблено інтегральну методику оцінювання ефективності утеплювачів за сімома критеріями: теплопровідність, вартість, довговічність, паропроникність, екологічність, вогнестійкість і технологічність монтажу. За підсумками розрахунку найвищі інтегральні рейтинги отримали целюозна ековата (0,89), деревоволокнисті плити (0,85) та солом'яні панелі (0,83), що підтверджує доцільність їх застосування у житловому будівництві. При товщині утеплення 130–150 мм забезпечується опір теплопередачі  $R=3,5\text{--}4,6$  м<sup>2</sup>·К/Вт, що дозволяє досягти класу енергетичної ефективності “А” для зовнішніх стін житлових будівель.

4. Теплотехнічне моделювання показало, що конструкції стін із CLT-панелі товщиною 120 мм у поєднанні з екологічним утепленням (100 мм льоноволокна) забезпечують загальний опір теплопередачі  $R = 4,65 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , що на 35 % вище за традиційну систему з газоблоку D500 ( $R = 3,43 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ) при однаковій товщині огорожувального шару. Моделювання тепловтрат показало, що застосування CLT-систем із натуральним утепленням знижує енергоспоживання будівлі на 15–20% та підвищує теплову інерційність на 46%, забезпечуючи стійкий мікроклімат при аварійних зупинках опалення.

5. Архітектурно-конструктивна частина роботи підтвердила практичну доцільність впровадження CLT-технології в українське житлове будівництво. Використання CLT-технології в конструктивній системі 9-типоверхової житлової будівлі забезпечує скорочення тривалості монтажу на 30–32% і підвищення точності збирання елементів при питомому навантаженні до  $170 \text{ кН}/\text{м}^2$ .

Монтаж будівлі виконується з CLT-панелей товщиною 120 мм і перекриттів 160 мм, встановлюваних краном 10 т із точністю до  $\pm 2 \text{ мм}$ .

Тривалість монтажу одного поверху – 5 діб, всієї будівлі (9 поверхів) – 45 діб при виконанні бригадою із 6 чол., трудомісткість –  $0,54 \text{ люд.}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ , виробіток –  $15,6 \text{ м}^2/\text{змін}$ , питомі машинозатрати –  $0,18 \text{ маш.}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ .

Економія трудовитрат порівняно з монолітним будівництвом – 28–30 %, зменшення термінів –  $\approx 45 \text{ днів}$ . Собівартість монтажу –  $\approx 360 \text{ грн}/\text{м}^2$ .

Організаційні рішення забезпечують раціональне використання території, зменшення внутрішньомайданчикових перевезень на 15% і безпечні умови праці.

6. Економічна ефективність підтверджує зменшення витрат на опалення на 8–12 % і скорочення енергоспоживання до  $8000 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$  для будинку площею  $150 \text{ м}^2$  у порівнянні зі стандартним варіантом.

7. Використання натуральних матеріалів знижує екологічний вплив на довкілля на 25–30 %, підвищує довговічність огорожувальних конструкцій

до 70 років та відповідає принципам сталого будівництва LEED, BREEAM, DGNB.

8. Отримані результати підтверджують, що інтеграція природних теплоізоляційних матеріалів у систему проєктування дозволяє досягти балансу між економічною вигідністю, енергоефективністю й екологічною стійкістю, що відповідає принципам сталого будівництва LEED, BREEAM та DGNB.

Утеплення житлових будівель екологічно чистими матеріалами на основі ековати, льону, деревоволокна та CLT-панелей забезпечує комплексне підвищення енергоефективності, довговічності та екологічності конструкцій. Отримані технічні результати підтверджують доцільність широкого впровадження таких рішень у сучасну українську практику житлового будівництва.

Отже, практичні результати дослідження можуть бути використані у проєктній діяльності, при розробленні стандартів екологічного житла та енергоефективних програм модернізації житлового фонду. Запропонована методика оцінювання дозволяє обґрунтовано вибирати оптимальний утеплювач залежно від кліматичних умов, бюджету й екологічних вимог.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Фурман О. І., Бікс Ю. С. Застосування екологічно чистих матеріалів для утеплення в житловому будівництві. Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)», Вінниця, Вінницький національний технічний університет, 15.06.2025 – 16.06.2025. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/viewFile/24722/2099>
2. Сучасні українські будівельні матеріали / За ред. К.К. Пушкарьової. К.: Асоціація «ВСВБМВ», 2012. 664 с.
3. Будівельні матеріали та вироби : підручник / О. М. Лівінський, Курок О. І., О. М. Пшінько, М. В. Савицький, І. Н. Дудар, Бондаренко М. І., Хоменко О. Г., Т. Е. Патапова. К. : «МП Леся», 2016. 600 с.
4. Шаповал С. В., Баранова А. А. Конспект лекцій з курсу «Сучасні будівельні матеріали і технології». Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 97 с.
5. Новомлинець О. О., Корзаченко М. М., Сергеев А. І. Будівельне матеріалознавство : навч. посіб. Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. 420 с.
6. Дворкін Л.Й., Лаповська С.Д. Будівельне матеріалознавство: підручник. К.: Кондор-Видавництво, 2017. 448 с.
7. Добірка еко утеплювачів. URL: <https://surl.lt/jxqlon>
8. WoodWorks. Mass Timber Vibration Guide. February 2023. URL: <https://surl.li/iglufy>
9. WoodWorks. Index of Mass Timber Connections. May 14 2021 (updated Aug. 24 2021). URL: <https://www.woodworks.org/wp-content/uploads/woodworks-mass-timber-connection-indices.pdf>
10. CLT-Rezult. Технічні характеристики CLT-панелей. URL: <https://clt-rezult.com/tehnichni-kharakterystyky/>

11. KOLEO. CLT панелі – нове покоління екологічного будівництва. URL: <https://koleo.com.ua/clt-paneli/>
12. USDM. Майбутнє за CLT – CLT панелі в житловому та громадському будівництві. URL: <https://usdm.com.ua/usdm-masters-clt/>
13. Торгова компанія «Вікар». CLT панелі – майбутнє екологічного будівництва вже сьогодні. URL: <https://tdvikar.com.ua/clt-paneli-maibutnie-ekolohichnoho-budivnytstva-vzhe-sohodni/>
14. REZULT Sawmill Products. Каталог продукції. – 2016. URL: <https://surl.lu/qrdvva>
15. 8 Insulation Products that Help Reduce Climate Impact. URL: <https://2050-materials.com/blog/8-insulation-products-with-sustainable-properties-for-a-greener-future/>
16. Дворкін Л.Й., Мироненко А.В. Будівельні матеріали з відходів. Рівне: НУВГП, 2019. 298 с.
17. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція будівель та енергоефективність будівель. [Чинні від 2022- 09-01]. Київ : Міністерство розвитку громад та території України, 2022. 27 с.
18. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С. Термічно неоднорідні енергоощадні огорожувальні конструкції малоповерхових будівель : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2019. 76 с.
19. Сучасний екологічний будинок з соломи. URL: <https://dom.ukr.bio/ua/articles/6497/>
20. Design guidelines and construction standards. URL: <https://surli.cc/tnsoxs>
21. ДСТУ EN 13501-1:2024. Пожежна класифікація будівельних виробів і будівельних конструкцій. Частина 1. Класифікація за результатами випробувань щодо реакції на вогонь (EN 13501-1:2018, IDT). [Чинні від 2025-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2024. 83 с.
22. Про енергетичну ефективність будівель : Закон України від 22.06.2017 № 2118-VIII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2118-19>

23. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10) : Наказ; Міністерство охорони здоров'я України від 12.05.2010 № 400 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0452-10>

24. ДБН В.1.1.7-2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-01-06]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2017. 35 с.

25. Мандрика А. С. Енергоефективні технології : навчальний посібник. Суми : Сумський державний університет, 2021. 330 с.

26. Петраш В.Д., Басіст Д.В., Гераскіна Е.А. Розрахунково-експериментальна оцінка енергетичної ефективності цивільних будівель. Одеса, «ВМВ», 2020. 327 с.

27. Kuzdas J. C. Analyzing the Cost and Schedule Performance of Residential Construction Utilizing Prefabricated Wall Panels. Final Research Report. Oregon State University, School of Civil and Construction Engineering, 2021. URL: <https://surl.li/vxvssj>

28. Kuzdas J.C. Analyzing the Cost and Schedule Performance of Residential Construction Utilizing Prefabricated Wall Panels. Final Research Report. Oregon State University, School of Civil and Construction Engineering, 2021. 120 p.

29. Дерев'яні будинки України. URL: <https://dom.ukr.bio/ua/articles/>

30. Finnlog Україна. Порівняння будівельних матеріалів: CLT vs традиційні. URL: <https://finnlog.ua/blogi/porivniannia-budevielnykh-materialiv-clt-vs-tradytsiini/>

31. Ecotechnica. Дванадцятиповерховий дерев'яний дім з CLT-панелей, Валкенштейн. URL: <https://surl.li/ogyxhr>

32. ISU. Переваги та недоліки CLT панелей у житловому будівництві. URL: <https://isu.org.ua/clt-paneli-dlya-budivnytstva-budynku-plyusy-minusy/>

33. Wood fiber insulation boards. URL: <https://beltermo.com/>

34. Elias-Ozkan S., Summers F., Sürmeli N., Yannas S. Comparative Study of the Thermal Performance of Building Materials. *PLEA 2006 – The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Geneva, 6–8 September 2006. URL: <https://surl.li/entzps>

35. Woloszyn M., Chatauret A. Performances Study of Natural and Conventional Building Insulation Materials. ResearchGate. September 2021. DOI: 10.13140/RG.2.2.23558.55367. URL: <https://surl.li/tzmeyg>

36. Житло з конопель. Український стартап перетворює країну. URL: <https://dom.ukr.bio/ua/articles/10372/>

37. Hasan S. Study of natural insulation materials and compared it with conventional systems. *Case Studies in Construction Materials*. 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785321005435>

38. Цапко Ю.В., Цапко О.Ю., Бондаренко О.П., Мазурчук С.М., Касянчук І.О., Ющенко А.В. Міцність теплоізоляційних деревополімерних матеріалів. *Сучасне будівництво та архітектура*. Одеса: ОДАБА, 2024. № 10. URL: <http://visnyk-odaba.org.ua/2024-10/10-11.pdf>

39. Андрух С. Л., Сопов В. П. Біокомпозитний матеріал на основі відходів деревини. Суми : Сумський національний аграрний університет, 2025. URL: <https://repo.snau.edu.ua/xmlui/handle/123456789/13967>

40. Siksnylytė-Butkienė I., Streimikienė D., Baležentis T., Skulskis V. A Systematic Literature Review of Multi-Criteria Decision-Making Methods for Sustainable Selection of Insulation Materials in Buildings *.Sustainability*. 2021. Vol. 13, No. 2, Article 737. DOI: 10.3390/su13020737. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/2/737>

41. Streimikienė D. Uncertain multi-criteria sustainability assessment of green insulation materials for buildings. *Resources, Conservation & Recycling*. 2020. Vol. 162. Article 105042. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105042. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778820302930>

42. Yılmaz B. Ç., Acun Özgünler S., Yılmaz Y. A multi-criteria decision-making method for thermal insulation material selection in nZEB level

questioned affordable multifamily housings. *Journal of Building Physics*. 2024. Vol. 47, No. 6. P. 628-650. DOI: 10.1177/17442591241238440. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/17442591241238440>

43. Šikšnelytė I., Zavadskas E.K., Streimikienė D., Sharma D. An Overview of Multi-Criteria Decision-Making Methods in Dealing with Sustainable Energy Development Issues. *Energies*. 2018. Vol. 11, No. 10: 2754. DOI: 10.3390/en11102754. URL: <https://surl.lu/tbajny>

44. The Energy Performance of Buildings Directive. EPB standards support the EU's EPBD implementation. URL: <https://epb.center/epb-standards/the-energy-performance-of-buildings-directive-epbd/>

45. Design of the Thermal Insulation Envelope of Energy-Efficient Buildings. *ResearchGate*. URL: <https://surl.li/gernzv>

46. ДБН Б.2.2-12:2019. Містобудування. Планування і забудова територій. [Чинний від 2018-09-01 ]. Вид. офіц. Київ : Держбуд України, 2018. 175 с.

47. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. [Чинний від 01.02.2011]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 127 с.

48. ДБН В.2.2-15-2019. Житлові будинки основні положення. [Чинний від 2019-12-01]. Вид. офіц. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2019. 42 с.

49. ДБН В.2.2-40:2018. Інклюзивність будівель і споруд. [Чинний з 2019-04-01]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 74 с.

50. ДБН В.2.6-161:2017. Дерев'яні конструкції. Основні положення. [Чинний з 2018-02-01]. Київ : Мінрегіон України, 2017. 78 с.

51. ДСТУ-Н Б В.2.6-217:2016. Настанова з проектування будівельних конструкцій з цільної і клеєної деревини. [Чинний з 2017-04-01]. Київ : Мінрегіон України, 2016. 43 с.

52. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. [Чинний з 2011-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2010. 94 с.

53. ДБН В.2.6-220:2017. Покриття будинків і споруд. [Чинний з 2018-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2017. 67 с.

54. ДБН В.2.6-198:2014. Конструкції будинків і споруд. Захист від шуму. [Чинний з 2015-04-01]. Київ : Мінрегіон України, 2014. 52 с.

55. ДБН А.3.1-5:2016. Організація будівельного виробництва. [Чинний з 2017-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2016. 97 с.

56. Білецький А. А., Клімов С. В., Ольховик О. І., Рощик І. А. Організація і технологія будівельних робіт. Практикум : навч. посібник. Рівне : НУВГП, 2019. 93 с.

57. ДБН А.3.2-2-2009. Система стандартів безпеки праці. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. [Чинний з 2010-06-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 76 с.

58. ДСТУ EN ISO 12100:2016. Безпечність машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків (EN ISO 12100:2010, IDT; ISO 12100:2010, IDT). [Чинний з 2017-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 53 с.

59. ДСТУ Б Д 1.1.1-2013. Правила визначення вартості будівництва. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2014. 97 с

60. Лялюк О.Г., Маєвська І.В. Техніко-економічне обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах будівельних спеціальностей : навчальний посібник. Вінниця : ВДТУ, 2003. 84 с.

61. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Зі Зміною № 1. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=78683](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78683)

62. ДСТУ-Н Б А.3.1-23:2013. Настанова щодо проведення робіт з улаштування ізоляційних, оздоблювальних, захисних покриттів стін, підлог і покрівель будівель і споруд. URL: [https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu\\_n\\_b\\_a\\_3\\_1\\_23/5-1-0-1160](https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_n_b_a_3_1_23/5-1-0-1160)

## ДОДАТКИ

## Додаток А

## ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Оцінка ефективності застосування екологічно чистих матеріалів для утеплення в житловому будівництві

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота

(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ кафедра БМГА, ФБЦЕІ, гр. Б-23м

(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 0,20 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Бікс Ю. С. доцент, гарант ОП

(прізвище, ініціали, посада)

Швець В. В. доцент, зав.каф. БМГА

(прізвище, ініціали, посада)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Блащук Н. В.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Бікс Ю.С., доц.

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Фурман О.І.

(прізвище, ініціали)

## Додаток Б

## Відомість графічної частини МКР

Ар-куш	Найменування	Примітка
1	Актуальність теми. Мета, завдання, об'єкт, предмет дослідження. Інноваційність. Практична цінність	
2	Аналітичний огляд екологічно чистих теплоізоляційних матеріалів	
3	Аналітичний огляд екологічно чистих теплоізоляційних матеріалів (продовження)	
4	Порівняння теплоізоляційних властивостей традиційних і сучасних матеріалів	
5	Порівняння теплоізоляційних властивостей традиційних і сучасних матеріалів (продовження)	
6	Порівняння теплоізоляційних властивостей традиційних і сучасних матеріалів (продовження)	
7	Багатокритеріальний аналіз	
8	Багатокритеріальний аналіз (продовження)	
9	Багатокритеріальний аналіз (продовження)	
10	Багатокритеріальний аналіз (продовження)	
11	Багатокритеріальний аналіз (продовження)	
12	Багатокритеріальний аналіз (продовження)	
13	Багатокритеріальний аналіз (продовження)	
14	Багатокритеріальний аналіз (продовження)	
15	Багатокритеріальний аналіз (продовження)	
16	Обґрунтування використання CLT-панелей у житловому будівництві	
17	План першого поверху. План типового поверху	
18	Фасад 18-1. Розріз 1-1. План покрівлі	
19	Схема розміщення основних елементів на відм. +3,000. Розріз 1-1. Розріз 2-2	
20	Схеми	
21	Розріз 1-1. Схема виконання робіт. Графік виконання робіт	
22	Об'єктний будженплан на основний період будівництва	
23	Економічна ефективність проєкту	

**Актуальність теми.** Сучасні вимоги до будівництва передбачають підвищену енергоефективність та екологічну безпеку. Традиційні утеплювачі (мінеральна вата, пінополістирол) мають високі викиди CO<sub>2</sub>, складність утилізації, токсичні компоненти. Альтернатива — екологічно чисті утеплювачі: ековата, деревоволокно, льон, коноплі, CLT-панелі. Актуальним є комплексне дослідження ефективності таких матеріалів за теплотехнічними, санітарними, економічними й екологічними критеріями.

**Мета дослідження.** Оцінити ефективність застосування екологічно чистих утеплювачів у житловому будівництві з урахуванням: теплофізичних характеристик, економічних витрат, впливу на довкілля, безпеки для здоров'я людини.

**Завдання дослідження:**

1. Провести огляд сучасного ринку екологічних утеплювачів в Україні та ЄС.
2. Порівняти фізико-механічні, теплотехнічні та гігієнічні властивості матеріалів.
3. Визначити доцільність застосування екологічних утеплювачів у житловому будівництві.
4. Розробити інтегральну систему оцінки ефективності із використанням SMART-аналізу.

**Об'єкт дослідження** – процес утеплення житлових будівель із використанням екологічно чистих матеріалів.

**Предмет дослідження** – техніко-економічні, екологічні та теплотехнічні властивості натуральних утеплювачів і CLT-панелей у порівнянні з традиційними матеріалами.

**Інноваційність:**

1. Систематизовано сучасні природні теплоізоляційні матеріали в українському контексті.
2. Запропоновано інтегральний показник ефективності, що враховує не лише технічні параметри утеплювачів, а екологічність виготовлення та утилізації. Модель адаптована до національних нормативів та європейських практик сталого будівництва.

**Практична цінність.** Результати дослідження можуть бути використані:

- у проєктній діяльності архітекторів та інженерів,
  - для розробки енергоефективних будинків,
  - при виборі матеріалів відповідно до принципів зеленого будівництва.
-

# АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ



Утеплення з целюлозної ековати



Дереволокнисті теплі панелі та плити



Льняний утеплювач



Мінераловатні утеплювачі



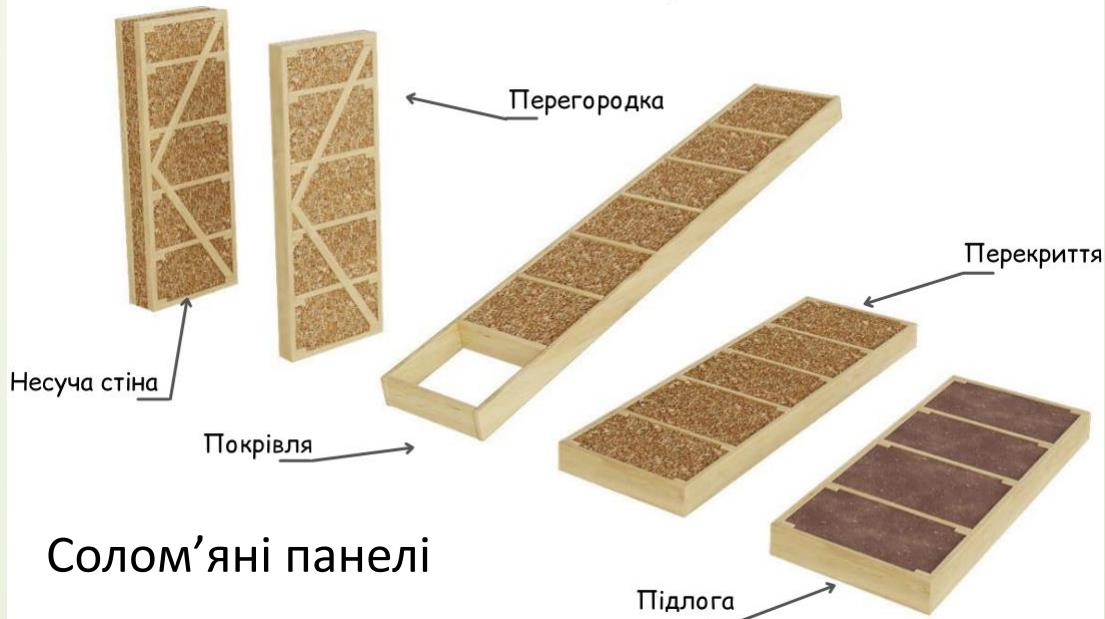
Конопляний утеплювач



Масивна деревина



CLT (Cross-Laminated Timber) -панелі



Солом'яні панелі



Фіброліт



Арболіт



Керамзитобетон



ГАЗОБЕТОН

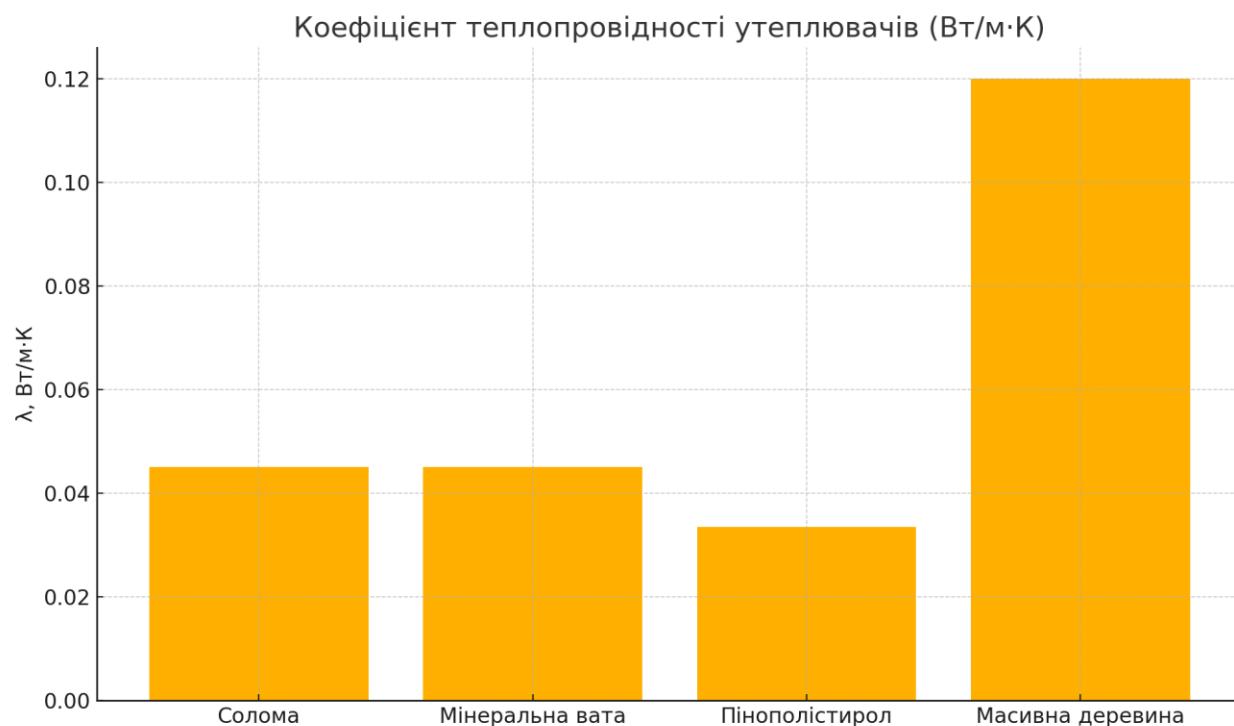


ПІНОБЕТОН



Монолітний пінобетон

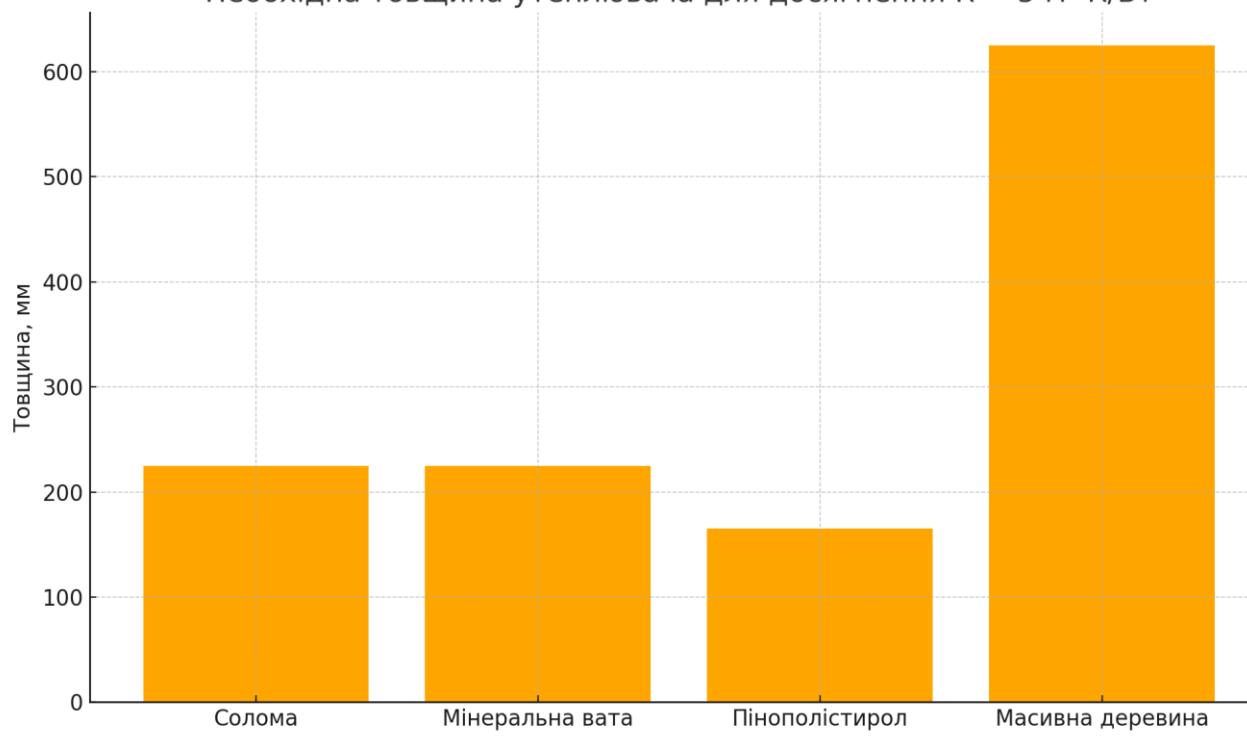
## ПОРІВНЯННЯ УТЕПЛЮВАЧІВ ЗА КОЕФІЦІЄНТОМ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ



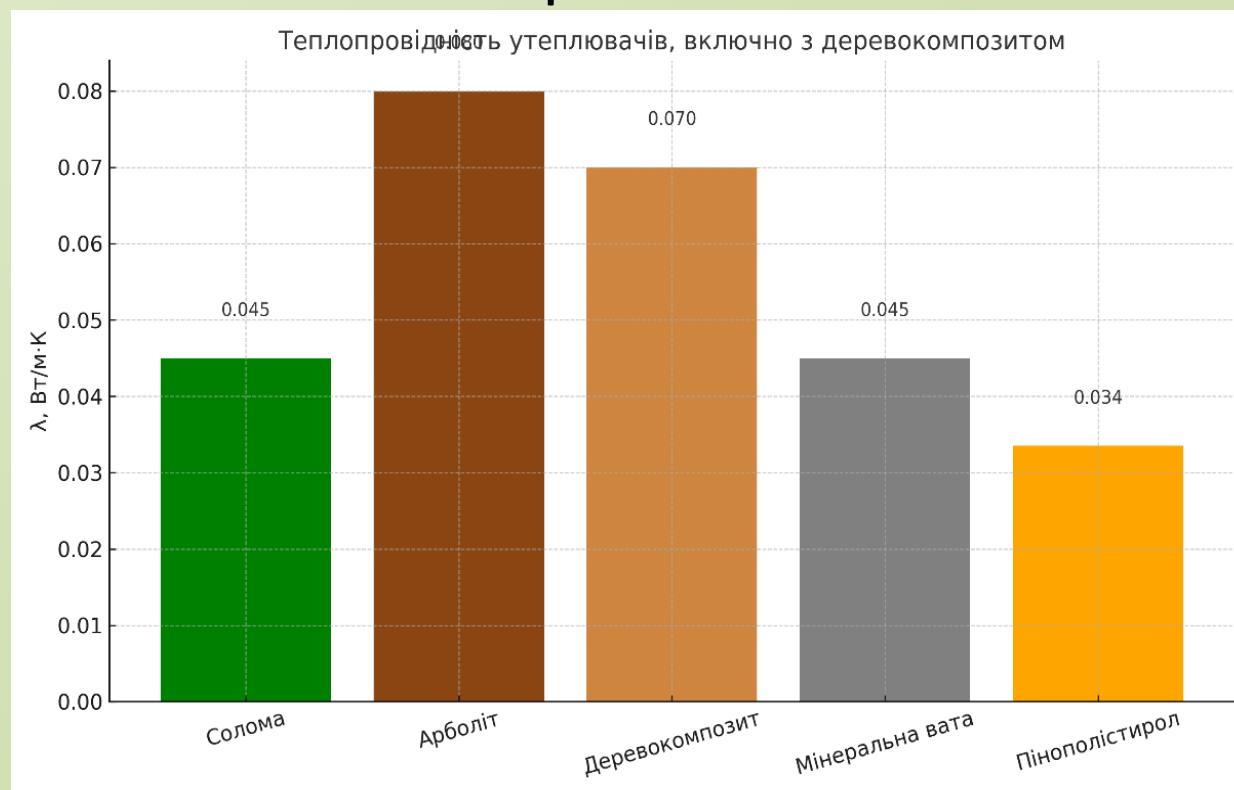
## ПОРІВНЯННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА КОЕФІЦІЄНТОМ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ



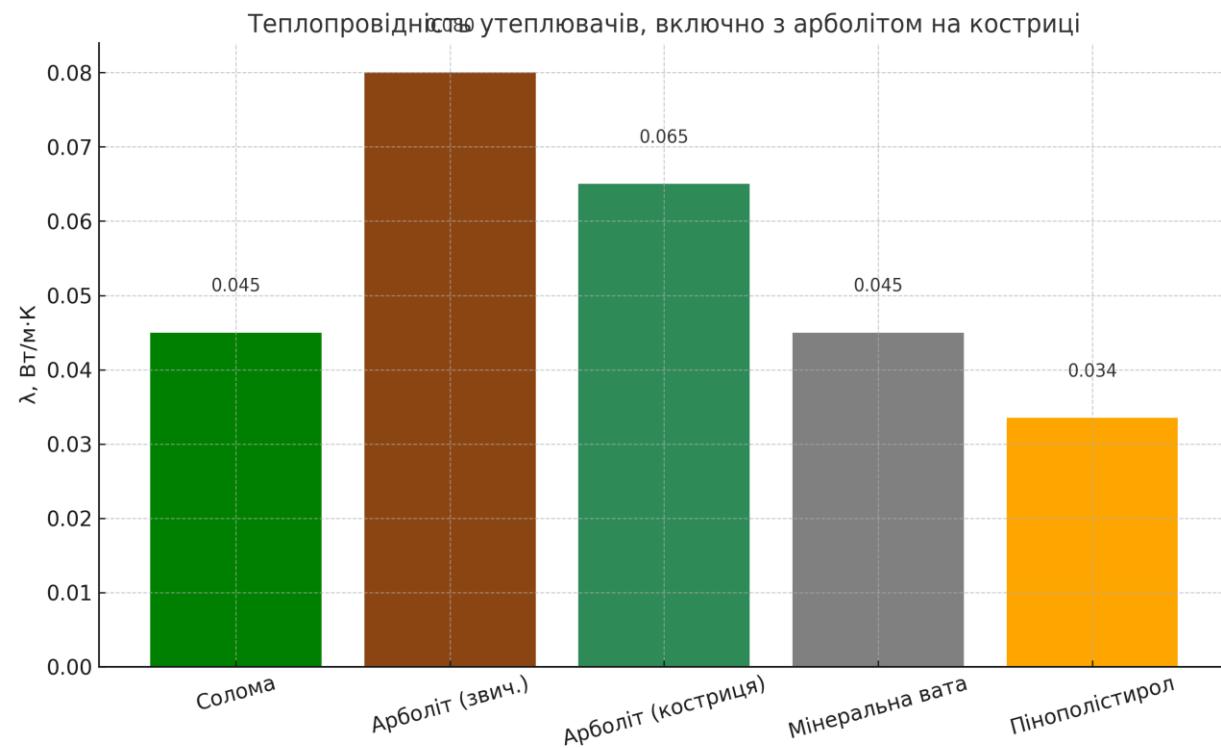
Необхідна товщина утеплювача для досягнення  $R = 5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$



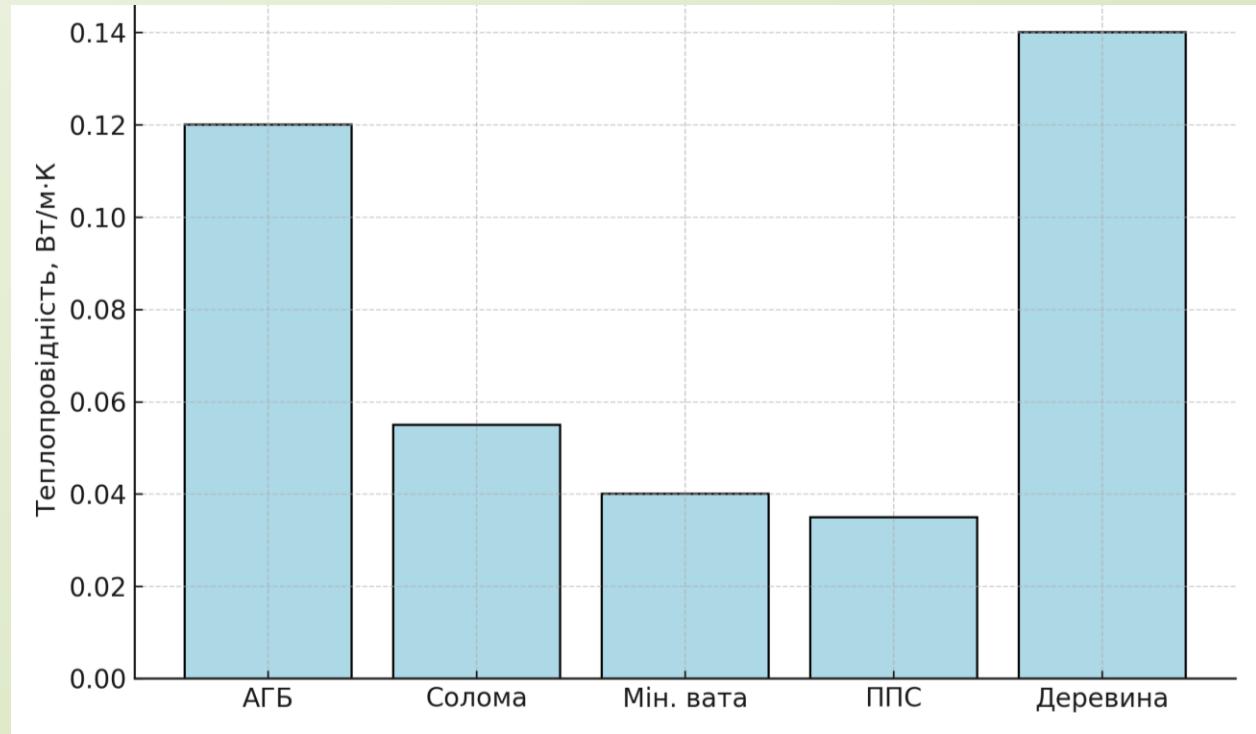
## ПОРІВНЯННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ДЕРЕВОКОМПОЗИТНИХ ПАНЕЛЕЙ З ІНШИМИ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИМИ МАТЕРІАЛАМИ



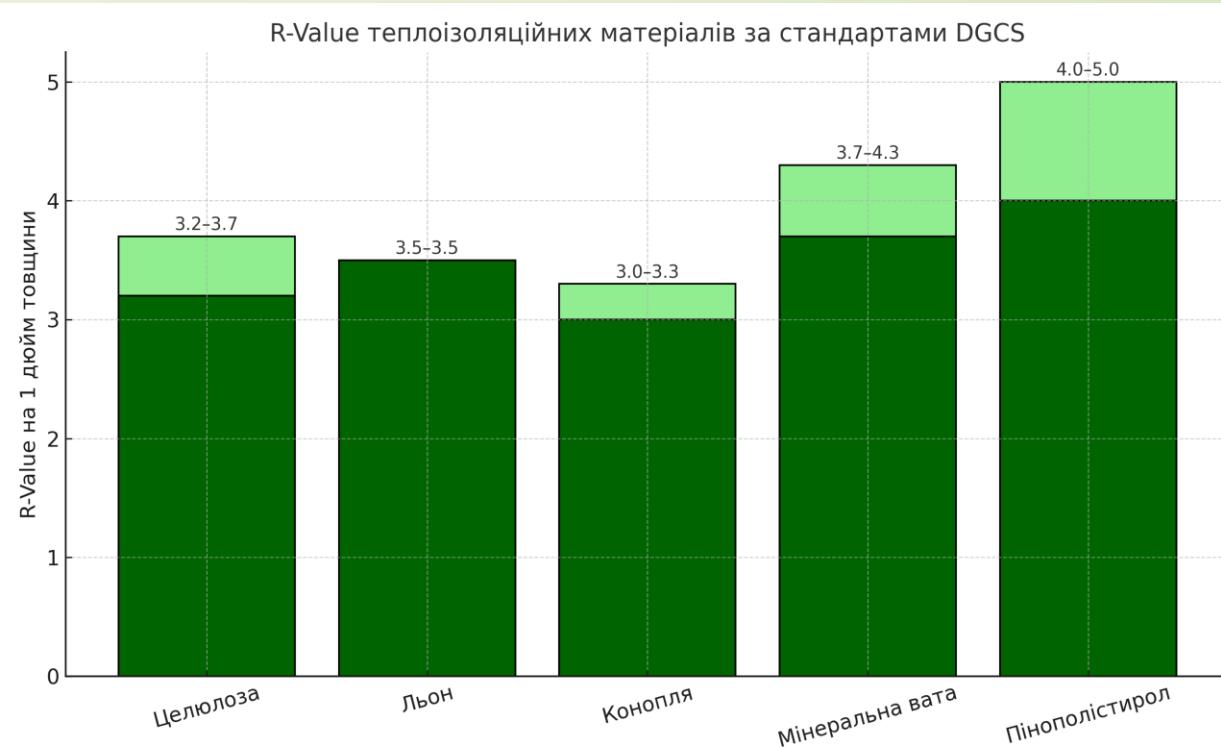
## ПОРІВНЯННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ АРБОЛІТУ З КОСТРИЦІ КОНОПЕЛЬ З ІНШИМИ УТЕПЛЮВАЧАМИ



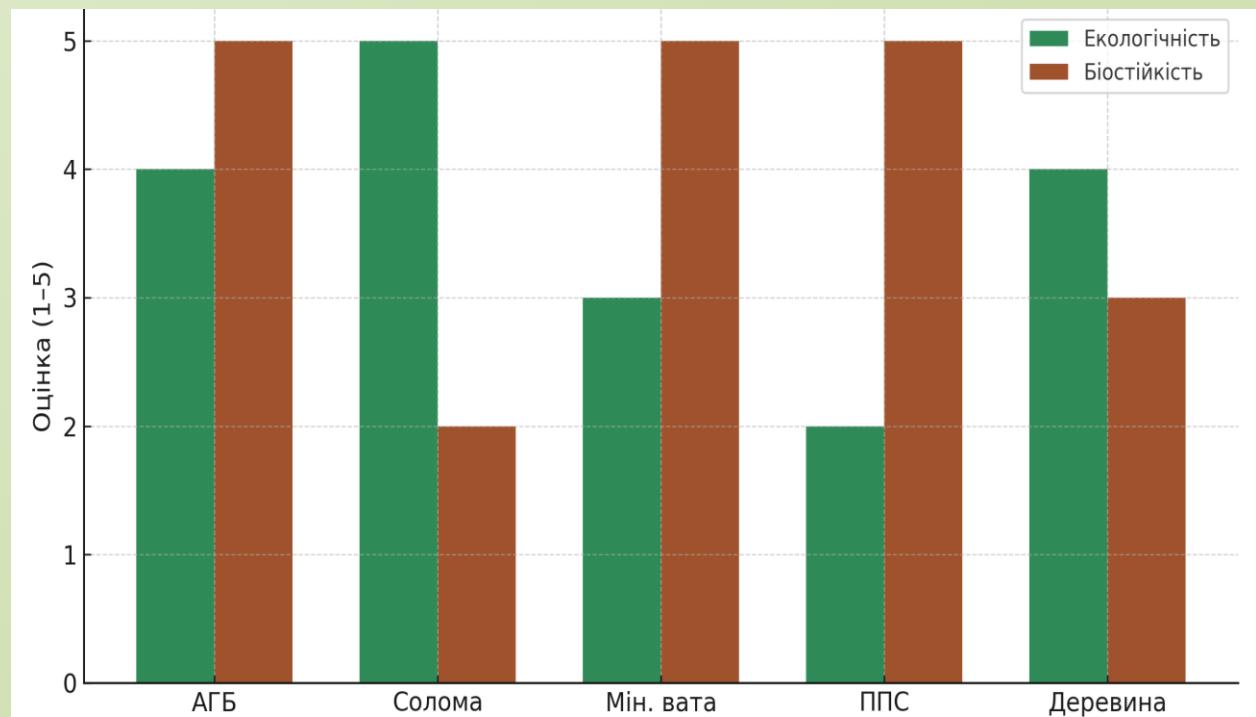
## ПОРІВНЯННЯ ГАЗОБЕТОНУ З ІНШИМИ ЕКОЛОГІЧНИМИ МАТЕРІАЛАМИ



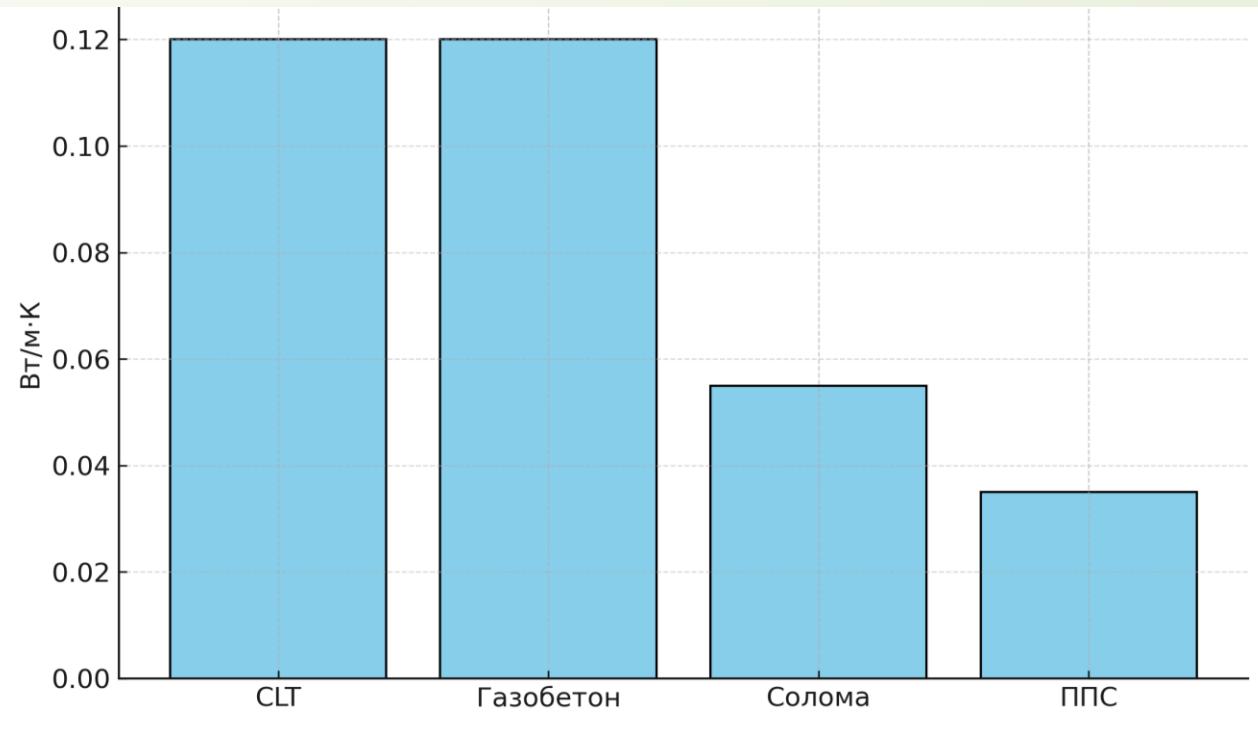
## ДІАПАЗОНИ R-VALUE ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗГІДНО З КАНАДСЬКИМИ СТАНДАРТАМИ DGCS



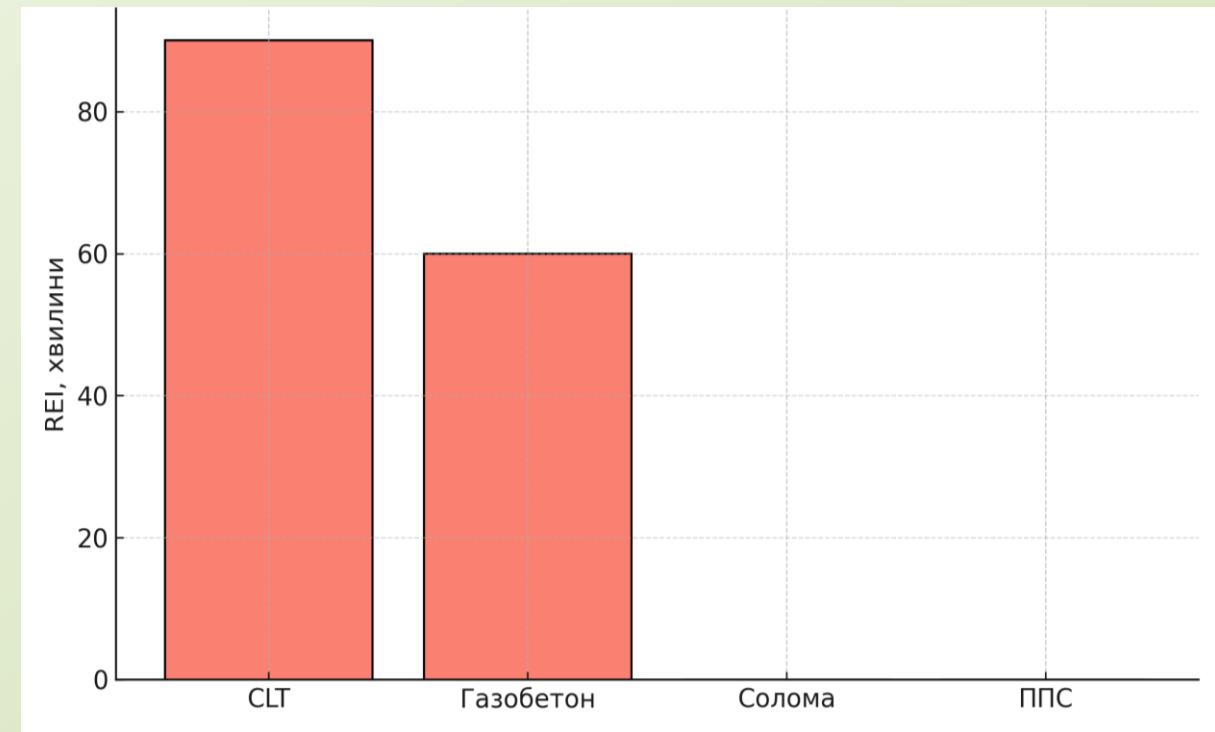
## ПОРІВНЯННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ ТА БІОСТІЙКОСТІ УТЕПЛЮВАЧІВ



## ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ CLT-ПАНЕЛЕЙ І АЛЬТЕРНАТИВНИХ МАТЕРІАЛІВ



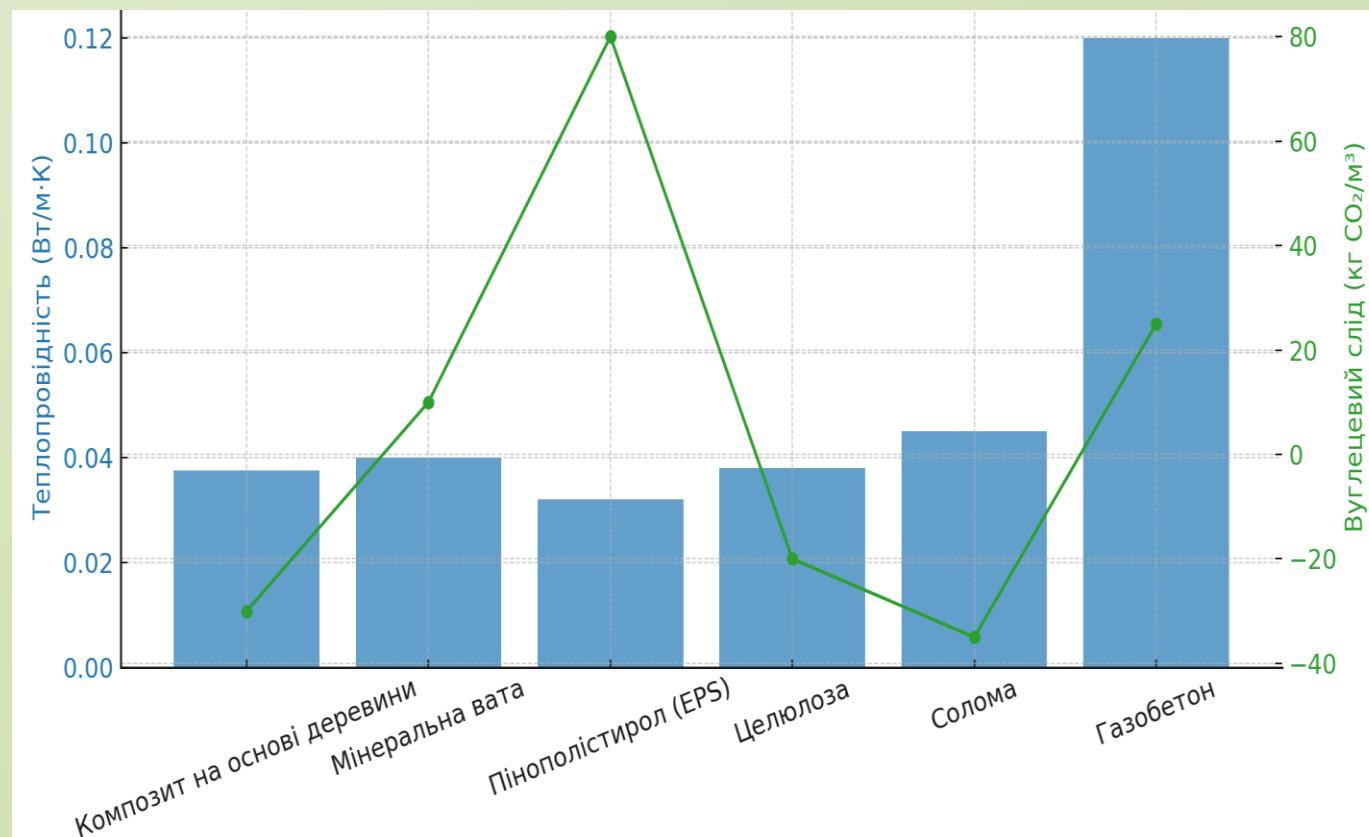
## ПОРІВНЯННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ УТЕПЛЮВАЧІВ



## ВУГЛЕЦЕВИЙ СЛІД (ЕКОЛОГІЧНІСТЬ) УТЕПЛЮВАЧІВ



## ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УТЕПЛЮВАЧІВ ЗА ТЕПЛОПРОВІДНІСТЮ ТА ВУГЛЕЦЕВИМ СЛІДОМ



# БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ УТЕПЛЕННЯ В ЖИТЛОВОМУ БУДІВНИЦТВІ

## МЕТОДИКА БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Обрані ключові критерії для оцінки:

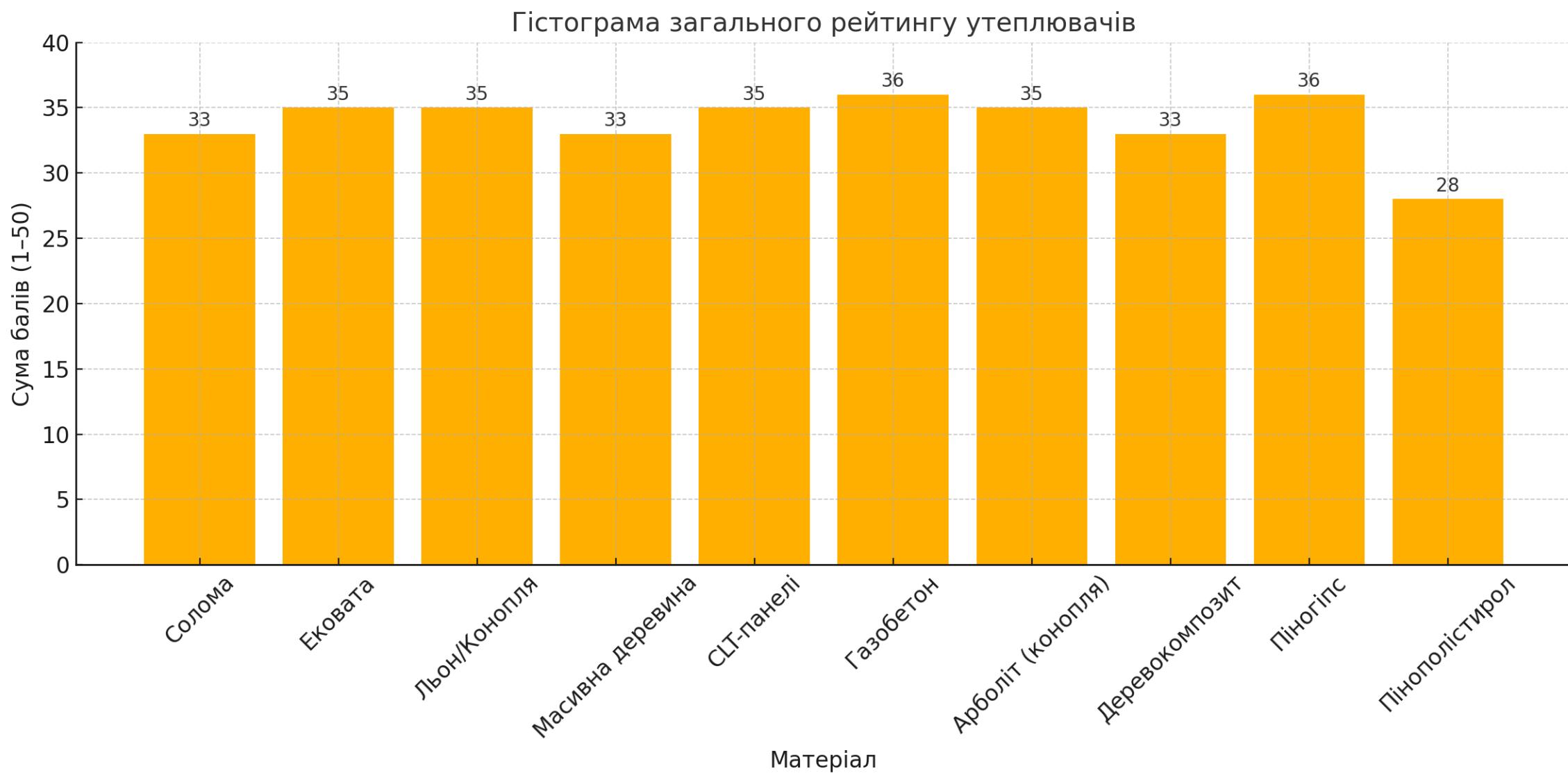
1. Теплопровідність ( $\lambda$ ), Вт/м·К — визначає енергоефективність.
2. Необхідна товщина шару для термічного опору зовнішньої стіни  $R = 4\text{--}5 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ .
3. Паропроникність, мг/м·год·Па — впливає на мікроклімат.
4. Щільність, кг/м<sup>3</sup> — впливає на вагу конструкції.
5. Пожежна безпека — рівень горючості/REI.
6. Екологічність — походження, біорозкладність, вуглецевий слід.
7. Ціна утеплення 1 м<sup>2</sup>, грн — економічний фактор.
8. Довговічність / технічна стабільність — вплив на термін служби.
9. Конструктивна універсальність — можливість бути самостійним елементом огороження.
10. Простота монтажу / технологічність.

SMART (Simple Multi-Attribute Rating Technique) — це метод багатокритеріального рейтингу, який полягає в:

1. **Визначення альтернатив і критеріїв.** Обираються варіанти для оцінки (наприклад, різні утеплювачі) та критерії, за якими їх оцінюють (екологічність, ціна, технологічність тощо).
2. **Присвоєння ваг критеріям.** Кожен критерій отримує ваговий коефіцієнт, що відображає його відносну важливість. Сума ваг дорівнює 1.
3. **Оцінка альтернатив за кожним критерієм.** Кожна альтернатива оцінюється за шкалою (зазвичай від 0 до 1 або від 1 до 5) відносно кожного критерію. Для коректності використовують нормалізацію.
4. **Обчислення інтегральної оцінки.**
5. **Порівняння і вибір.** Альтернативи ранжуються за значеннями інтегрального показника, і вибирається найкраща за сукупністю критеріїв.

Оціночна таблиця (бальна шкала 1–5, де 5 — найкраще значення)

Матеріал	$\lambda$ (Вт/м·К)	Товщина	Паропроникність	Еко	Ціна	Вогнестійкість	Щільність	Універсальність	Технологічність	Сума
Солома	4	4	5	5	5	2	3	3	2	33
Ековата	5	4	5	5	4	3	4	2	3	35
Льон / конопля	5	4	5	5	3	3	4	3	3	35
Масивна деревина	2	2	3	5	2	5	5	5	4	33
CLT-панелі	2	3	3	5	2	5	5	5	5	35
Газобетон	3	3	4	4	4	5	4	4	5	36
Арболіт (конопля)	4	3	5	5	4	4	4	3	3	35
Деревокомпозит	3	3	4	4	4	3	4	4	4	33
Піногіпс	3	3	4	4	5	5	4	3	5	36
Пінополістирол	5	5	1	1	5	2	2	2	5	28



### Висновки багатокритеріального аналізу

- 1. Найбільш збалансовані матеріали — газобетон, CLT-панелі, арболіт з костриці, ековата та льон/конопля.** Вони мають високі теплотехнічні, екологічні та практичні характеристики.
- 2. Пінополістирол,** хоча й має найкращі теплоізоляційні показники, значно програє в екологічності, паропроникності та пожежній безпеці.
- 3. CLT-панелі** виграють за універсальністю: поєднують несучу здатність та ізоляцію, особливо у поєднанні з натуральними утеплювачами.
- 4. Солома** – економічно найвигідніша й екологічно досконала, але вимагає ретельного захисту від вологи і вогню.

Розроблено інтегральний коефіцієнт ефективності з формулою типу:

$$K_{\text{ІНТ}} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i$$

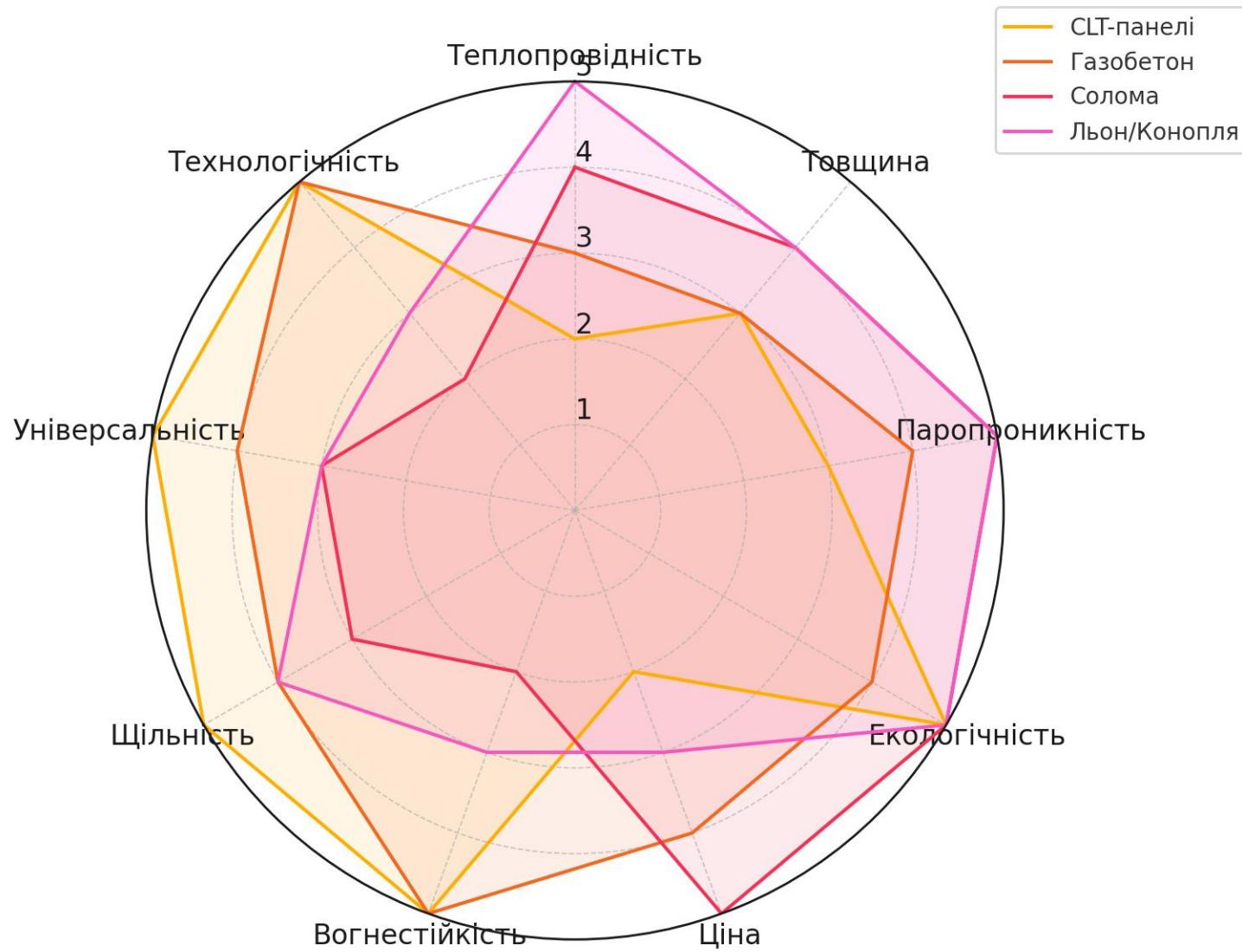
де  $w_i$ — ваговий коефіцієнт критерію (наприклад,  $\lambda$  – 0,2, вогнестійкість – 0,15);

$x_i$ — нормалізоване значення критерію.

Це дозволить:

- обґрунтувати **вибір матеріалу** для реального проєкту (наприклад, CLT+льон);
- провести **різні сценарії**: пріоритет економії, екології чи монтажної зручності.

# Spider-діаграма ефективності утеплювачів



## Вагові Коефіцієнти AHP/SMART

Критерій	Позначення	Ваговий коефіцієнт	
1	Теплопровідність	$\lambda$	0.15
2	Товщина шару	d	0.1
3	Паропроникність	$\mu$	0.1
4	Екологічність	ECO	0.2
5	Ціна	C	0.15
6	Вогнестійкість	FR	0.1
7	Щільність	$\rho$	0.05
8	Конструктивна універсальність	U	0.1
9	Технологічність	TECH	0.05

## Інтегральний Рейтинг Утеплювачів

Матеріал	Інтегральний рейтинг
1 Ековата	4.1
2 Льон/Конопля	4.05
3 Арболіт (конопля)	4.05
4 Солома	4.0
5 Піногіпс	3.95
6 Газобетон	3.9
7 CLT-панелі	3.7
8 Деревокompозит	3.65
9 Масивна деревина	3.55
10 Пінополістирол	3.05

Інтегральна оцінка ефективності утеплювачів була виконана за методом SMART із використанням дев'яти критеріальних показників, кожен з яких отримав визначену вагу відповідно до експертного значення в системі енергоефективного та екологічного житлового будівництва. **Найвищі інтегральні рейтинги** отримали:

- **Ековата (4.10)** – за рахунок поєднання низької теплопровідності, високої паропроникності, екологічності та добрих технологічних властивостей.

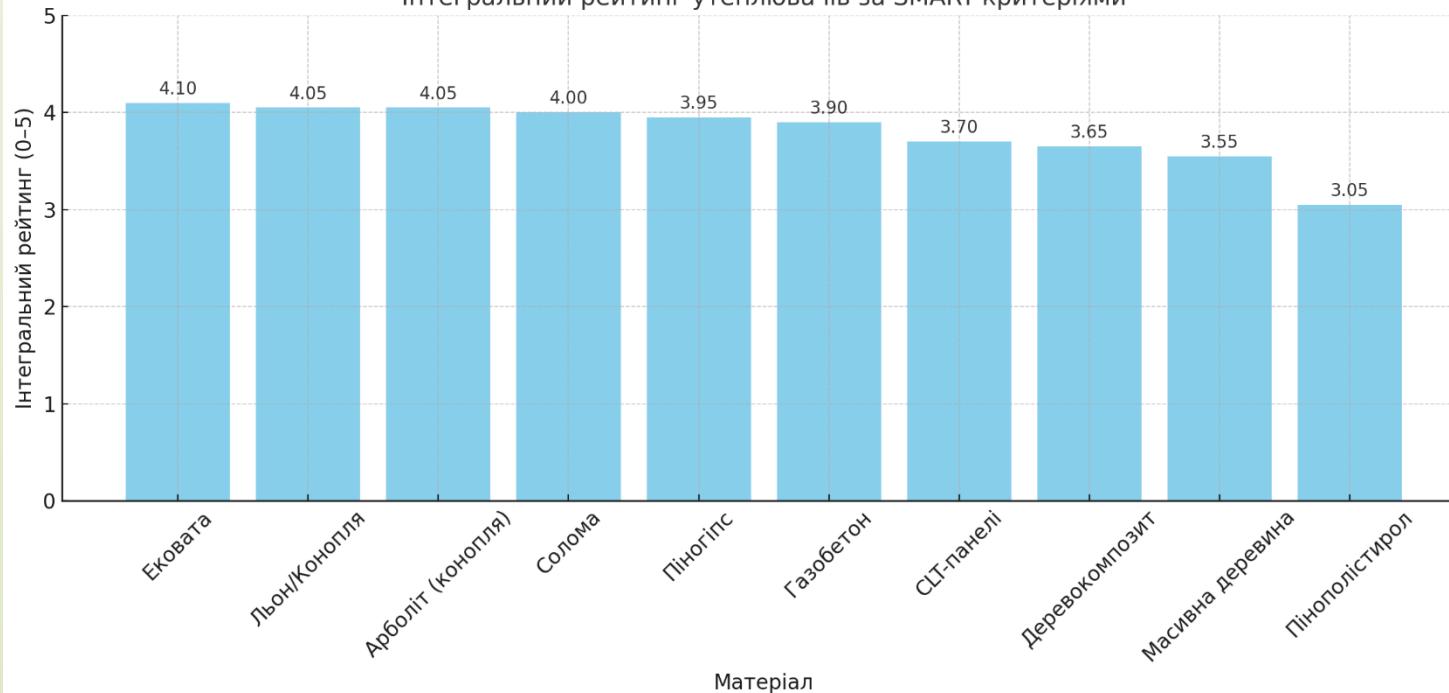
- **Льоноволокно та арболіт з конопляної костриці (по 4.05)** – матеріали з природним походженням, хорошими теплофізичними характеристиками та помірною вартістю, що добре пристосовані до кліматичних умов України.

- **Солома (4.00)** – матеріал із найкращою екологічною характеристикою та низькою собівартістю, однак із меншими балами за вогнестійкість і технологічність монтажу.

- **CLT-панелі, газобетон і піногіпс (у межах 3.85–3.95)** – продемонстрували баланс між конструктивністю, пожежною безпекою та екологічними параметрами, хоча поступаються органічним утеплювачам за паропроникністю та ціною.

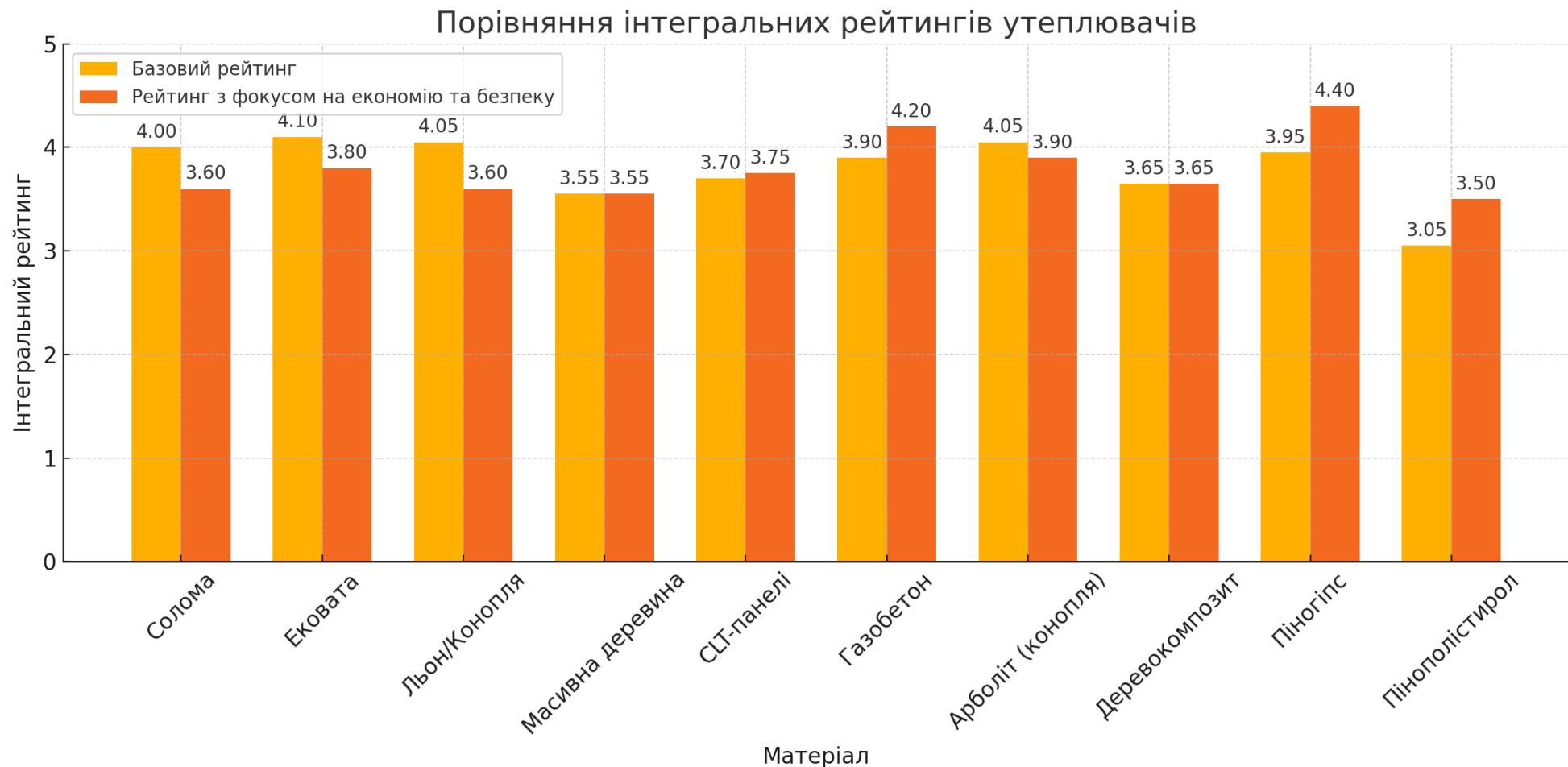
**Найменшу інтегральну оцінку (2.85)** отримав пінополістирол, незважаючи на високу теплоізоляційну здатність. Основною причиною цього є його **низька екологічність, горючість і відсутність паропроникності**, що не відповідає сучасним вимогам сталого будівництва.

Інтегральний рейтинг утеплювачів за SMART-критеріями



## Інтегральний Рейтинг З Фокусом На Економію, Пожежну Безпеку Та Технологічність

	Матеріал	Новий інтегральний
1	Піногіпс	4.4
2	Газобетон	4.2
3	Арболіт (конопля)	3.9
4	Ековата	3.8
5	CLT-панелі	3.75
6	Деревокомпозит	3.65
7	Солома	3.6
8	Льон/Конопля	3.6
9	Масивна деревина	3.55
10	Пінополістирол	3.5



Графік порівняння двох інтегральних рейтингів:

- **Базовий рейтинг** відображає збалансовану оцінку за всіма критеріями.
- **Новий рейтинг** враховує пріоритет економії, пожежної безпеки та монтажної простоти.

Новий рейтинг показав, що **піногіпс, газобетон і арболіт (конопляний)** є найефективнішими варіантами за умов пріоритету економії, пожежної безпеки та простоти монтажу/виготовлення.

**Ековата, солома, льон/конопля** втратили перевагу через нижчі показники з вогнестійкості та вищу трудомісткість монтажу. **CLT-панелі** залишилися на високому рівні завдяки високим конструктивним властивостям і вогнестійкості.

Це особливо важливо для:

- **соціального житла**, де вартість має критичне значення;
- **модульного та швидкокомтованого будівництва**;
- **державних програм утеплення** з підвищеними вимогами до пожежної безпеки.

### Інтегральний Рейтинг – Багатоповерхове Будівництво

	Матеріал	Рейтинг
1	CLT-панелі	4.1
2	Газобетон	4.1
3	Піногіпс	4.05
4	Масивна деревина	3.9
5	Арболіт (конопля)	3.8
6	Льон/Конопля	3.7
7	Ековата	3.65
8	Деревокомпозит	3.6
9	Солома	3.4
10	Пінополістирол	3.05

### Інтегральний Рейтинг – Приватне Будівництво

	Матеріал	Рейтинг (приватне)
1	Піногіпс	4.25
2	Газобетон	4.1
3	Ековата	4.05
4	Арболіт (конопля)	4.05
5	Солома	3.9
6	Льон/Конопля	3.9
7	CLT-панелі	3.8
8	Деревокомпозит	3.75
9	Масивна деревина	3.6
10	Пінополістирол	3.2

Оцінка показала, що:

• Для **приватного житлового будівництва** найбільш ефективними утеплювачами є:

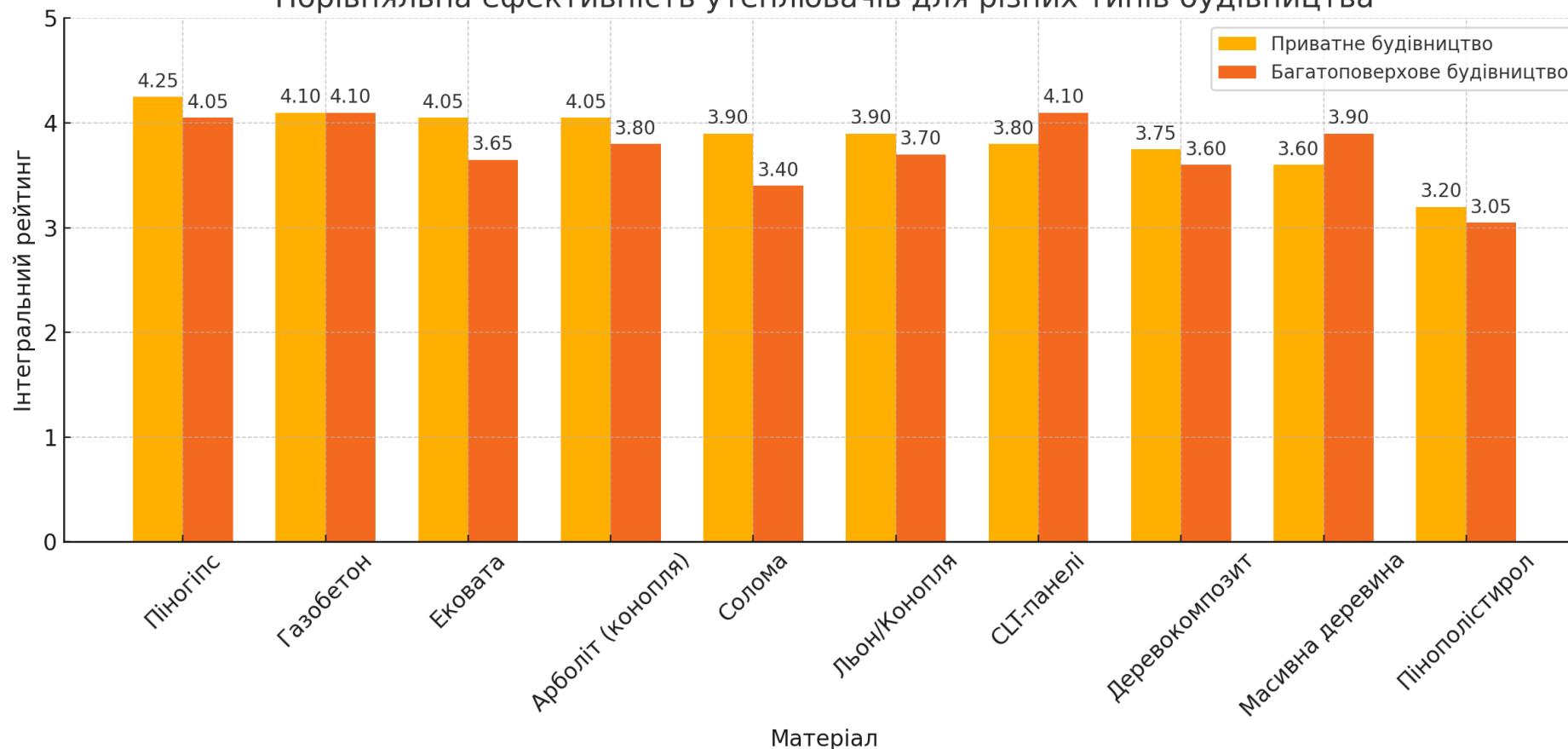
- **Ековата**
- **Солома**
- **Льон/конопля**
- **Арболіт з костриці**
- **Піногіпс**

Ці матеріали мають високі показники екологічності, паропроникності та простоти монтажу при прийнятній вартості.

• Для **багатоповерхових будівель** перевагу мають:

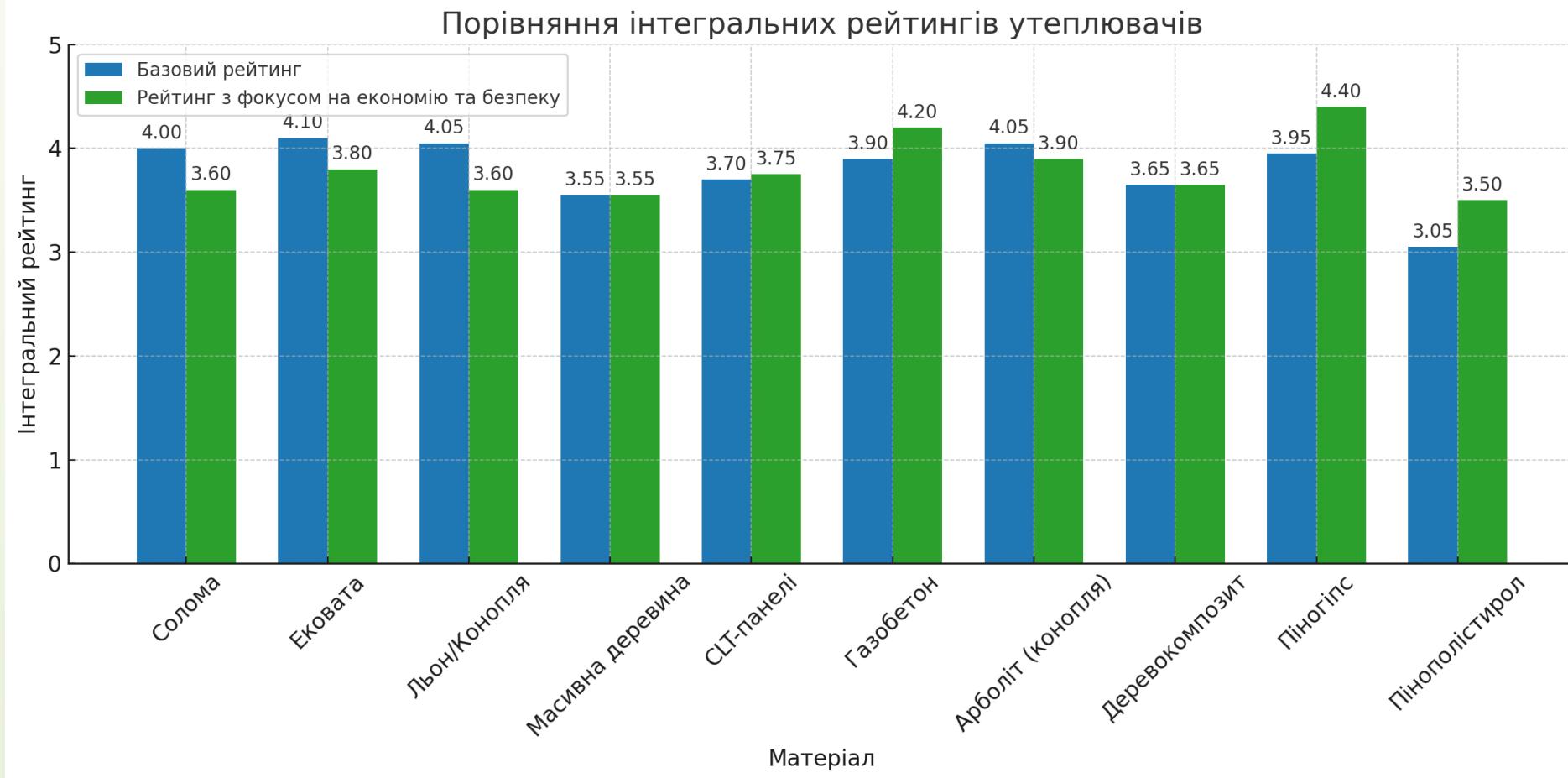
- **CLT-панелі**
- **Газобетон**
- **Піногіпс**
- **Масивна деревина**
- **Арболіт (конопля)**

Порівняльна ефективність утеплювачів для різних типів будівництва



У цих умовах важливими є вогнестійкість, несуча здатність, щільність і технологічна адаптивність.

Таким чином, **тип будівництва** є визначальним фактором при виборі теплоізоляційного матеріалу, і багатокритеріальна оцінка повинна виконуватись з **урахуванням архітектурно-планувального контексту**.



## ЗАЛЕЖНІСТЬ ІНТЕГРАЛЬНОГО КОЕФІЦІЄНТА ЕФЕКТИВНОСТІ ВІД КЛЮЧОВИХ ПАРАМЕТРІВ УТЕПЛЮВАЧА

### 1. Рівняння регресії

Нехай інтегральний коефіцієнт ефективності  $K_{int}$  залежить від двох параметрів утеплювача  $x$  і  $y$  (наприклад, теплопровідність  $\lambda$  та товщина шару  $d$ ). Загальне квадратичне рівняння регресії:

$$K_{int} = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y + \beta_3 x^2 + \beta_4 y^2 + \beta_5 xy + \epsilon,$$

де  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_5$  – коефіцієнти регресії, які визначаються методом найменших квадратів;  $\epsilon$  – випадкова помилка.

$$K_{int} = \beta_0 + \beta_1 \lambda + \beta_2 d + \beta_3 \lambda^2 + \beta_4 d^2 + \beta_5 \lambda d + \epsilon,$$

де  $\lambda$  – теплопровідність,  $d$  – товщина утеплювача,

$\beta_i$  – коефіцієнти моделі, які будуть оцінені на основі даних,

$\epsilon$  – випадкова похибка.

### Вхідні дані (усереднені)

Матеріал	Тепло-провідність $\lambda$ (Вт/м·К)	Товщина (мм)	Інтегральний коефіцієнт ефективності $K_{int}$ (з раніше розрахованих)
Солома	0.045	225	0.825
Ековата	0.038	100	0.862
Пінополістирол	0.0335	135	0.420
Газобетон	0.12	375	0.700
Піногіпс	0.11	100	0.780
Арболіт	0.065	260	0.750
CLT-панелі	0.125	175	0.690

## Поверхні відгуку

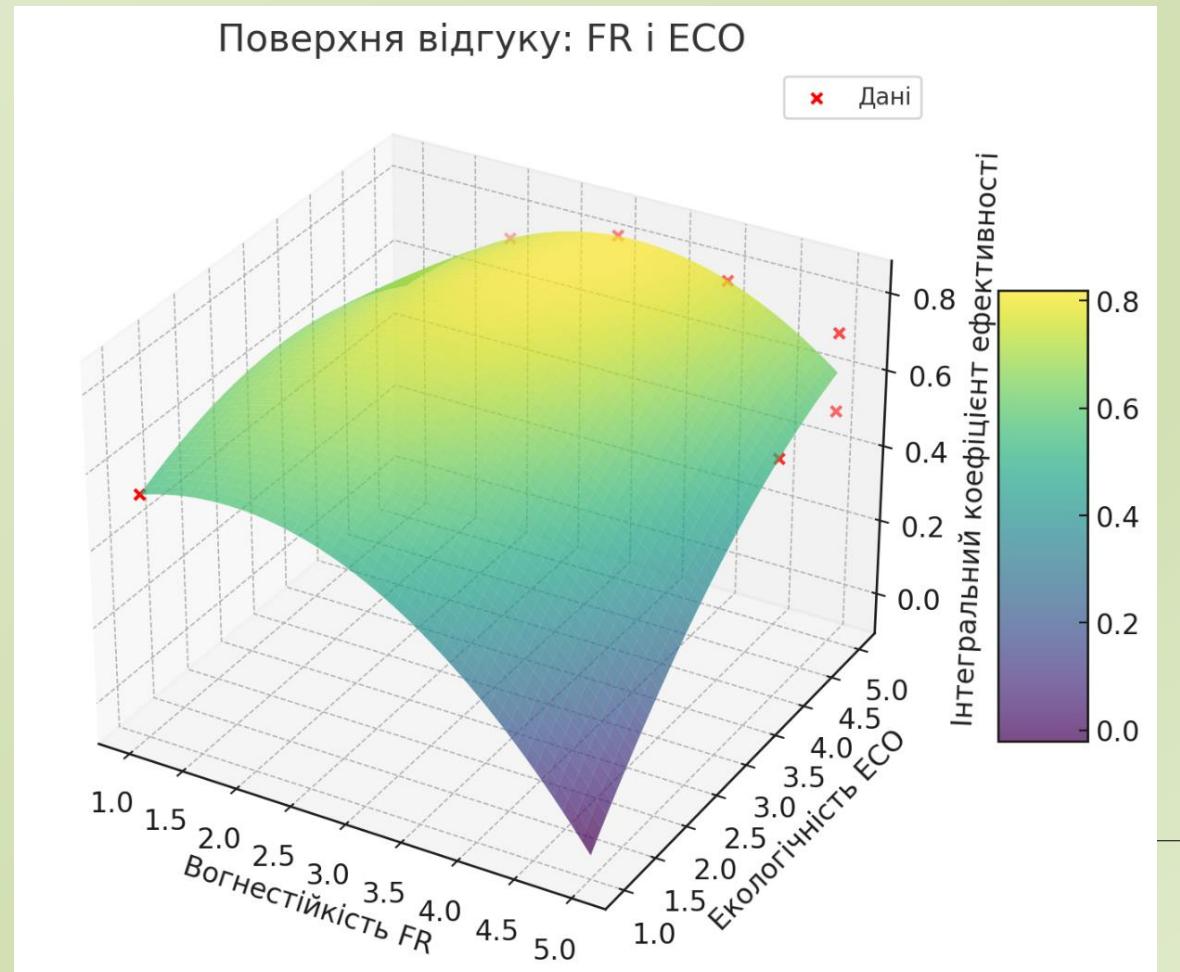
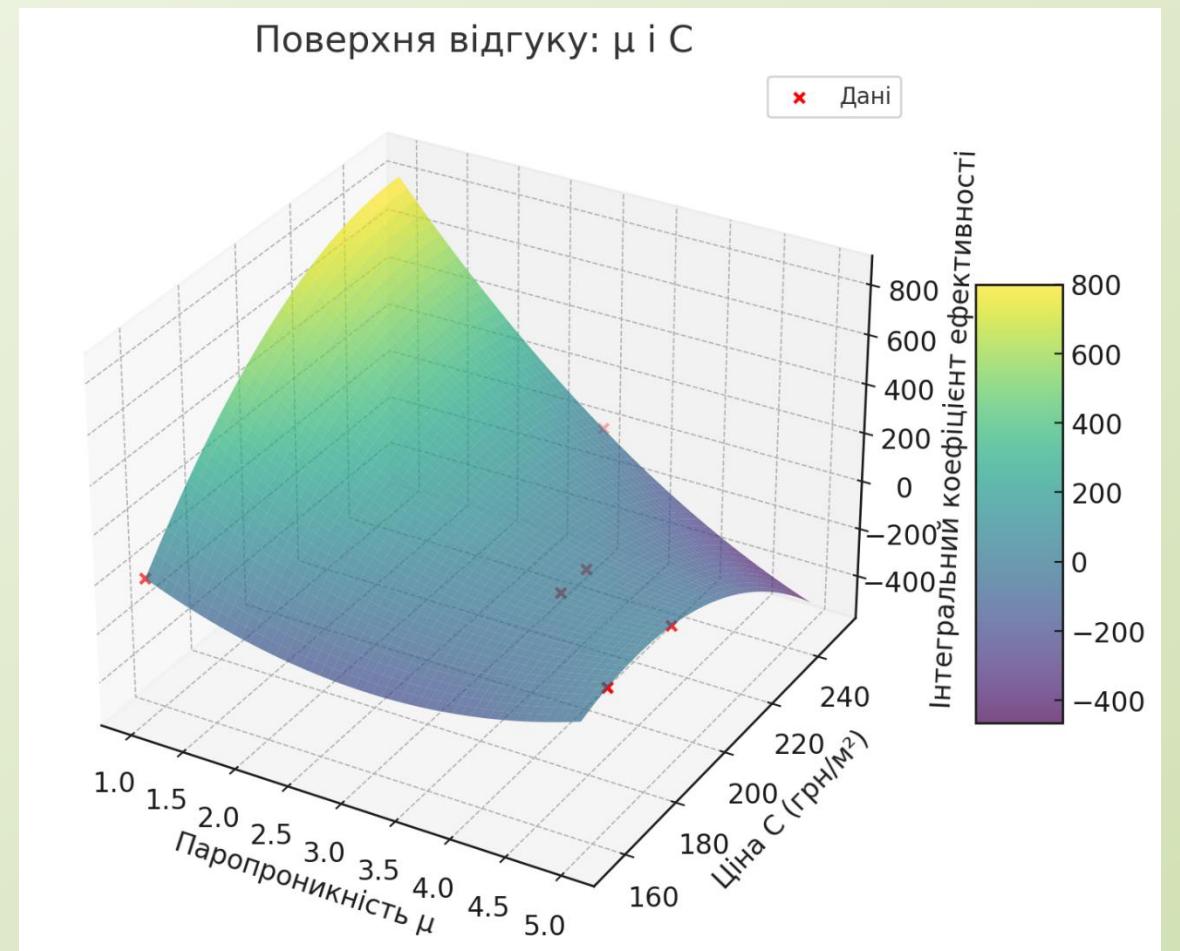
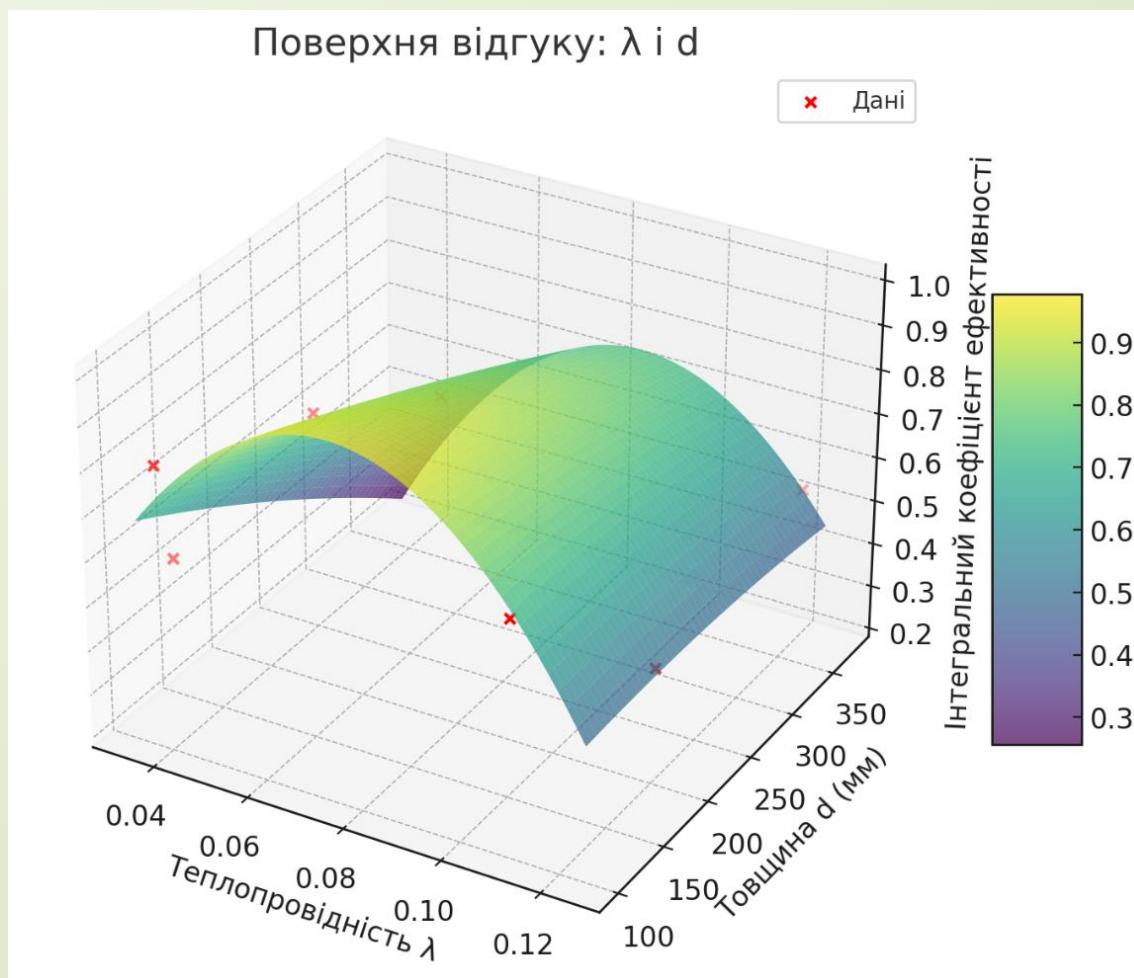
Згенеровані поверхні відгуку інтегрального коефіцієнта ефективності утеплювачів залежно від трьох пар ключових параметрів:

**1. Теплопровідність ( $\lambda$ ) та товщина ( $d$ )** — показує, як зміна теплофізичних характеристик впливає на загальну ефективність.

**2. Паропроникність ( $\mu$ ) та ціна ( $C$ )** — ілюструє баланс між технологічною характеристикою і економічною доцільністю.

**3. Вогнестійкість ( $FR$ ) та екологічність ( $ECO$ )** — відображає вплив безпеки і сталості на інтегральний показник.

На кожній поверхні червоними точками позначені реальні виміряні дані.



**Багатокритеріальний аналіз ефективності застосування екологічно чистих утеплювачів у житловому будівництві з урахуванням таких критеріїв, як:**

- екологічність (експлуатаційна),
- ціна,
- технологічність монтажу,
- вогнестійкість,
- витрати на виготовлення,
- екологічність виготовлення.

Матеріал	Інтегральний коефіцієнт ефективності
Арболіт	0.829
Ековата	0.801
Солома	0.791
Піногіпс	0.622
Газобетон	0.572
CLT-панелі	0.500
Пінополістирол*	0.475

**1. Формування набору критеріїв та їхніх ваг**

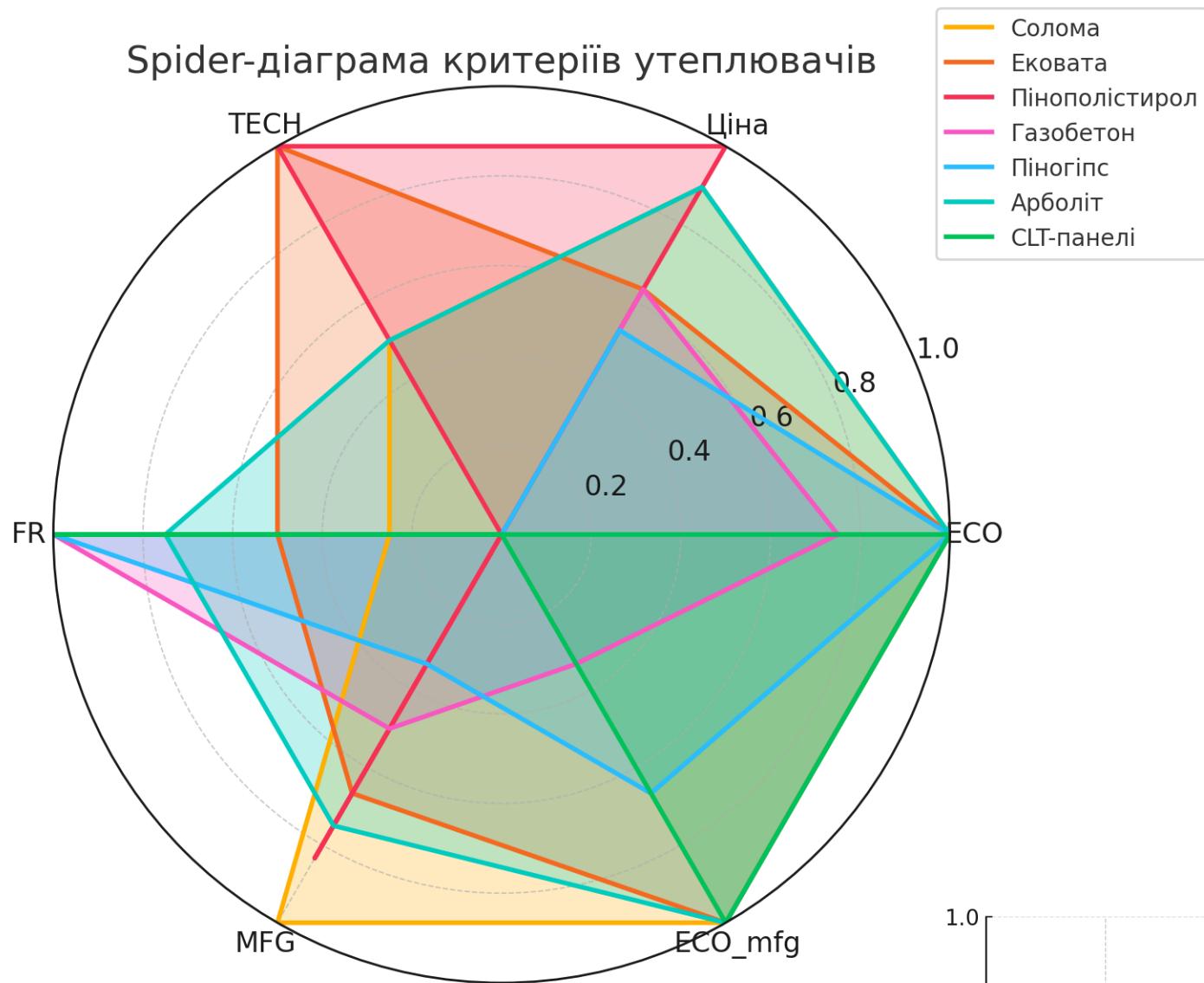
Критерій	Позначення	Вага, $w_i$	Примітка
Екологічність	ECOECO	0.25	Враховує вплив на довкілля при експлуатації
Ціна	CC	0.20	Вартість матеріалу за одиницю площі
Технологічність монтажу	TECHTECH	0.15	Оцінка простоти і швидкості монтажу
Вогнестійкість	FRFR	0.15	Ступінь пожежної безпеки
Витрати на виготовлення	MFGMFG	0.15	Економічні витрати на виробництво
Екологічність виготовлення	ECO <sub>mfg</sub>	0.10	Вплив виробництва на екологію

**2. Таблиця початкових даних**

Матеріал	ECO (1–5)	Ціна (грн/м <sup>2</sup> )	TECH (1–5)	FR (1–5)	MFG (грн/м <sup>2</sup> )	ECO <sub>mfg</sub> (1–5)
Солома	5	165	4	2	80	5
Ековата	5	190	5	3	100	5
Пінополістирол*	1	155	5	1	90	2
Газобетон	4	190	3	5	110	3
Піногіпс	5	200	3	5	120	4
Арболіт	5	165	4	4	95	5
CLT-панелі	5	250	3	5	140	5

\*пінополістирол досліджувався для порівняння

## Spider-діаграма критеріїв утеплювачів



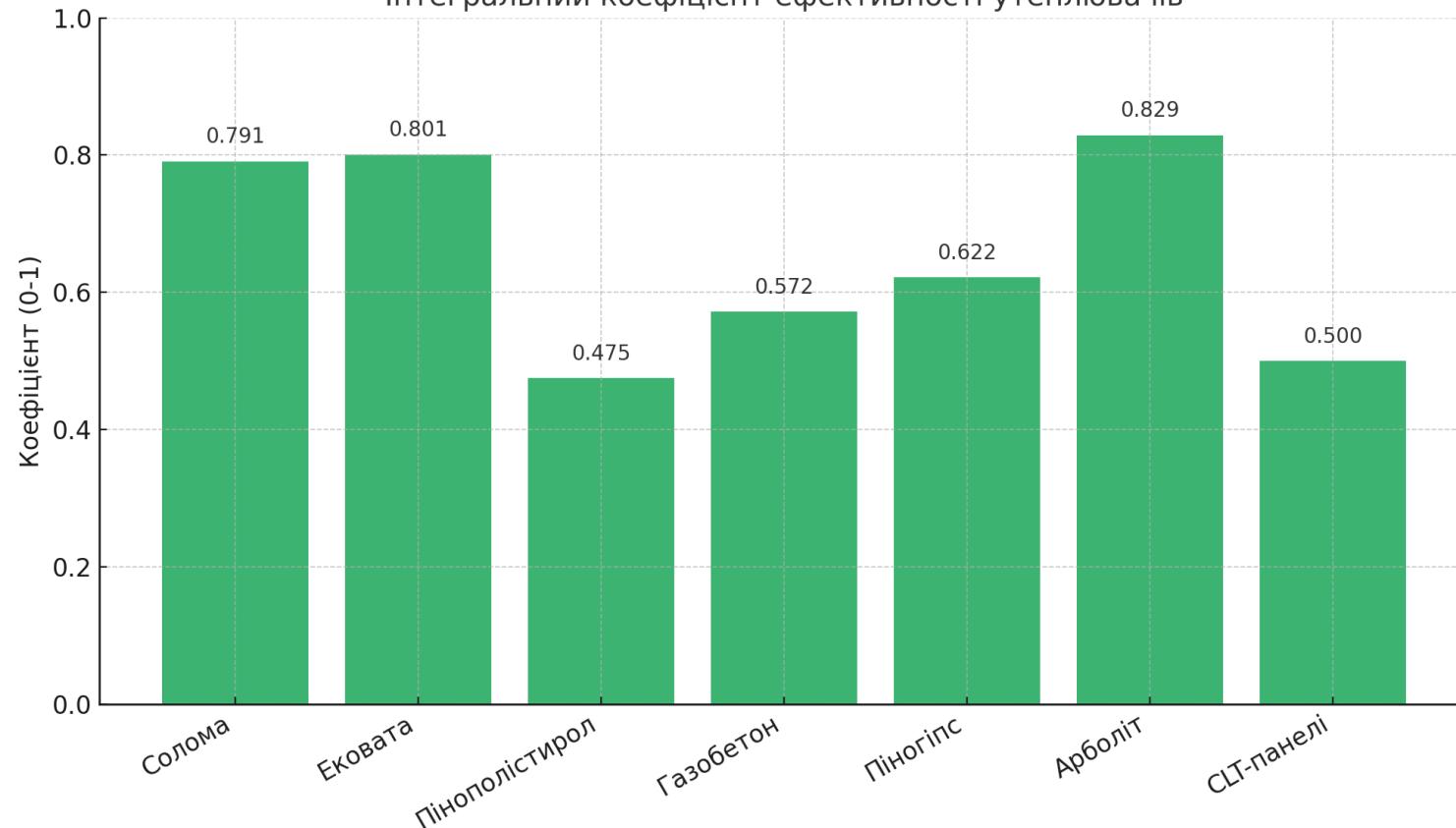
### Аналіз результатів:

- Найвищий інтегральний коефіцієнт мають натуральні утеплювачі: арболіт, ековата, солома. Це пояснюється високими оцінками за екологічність, технологічність монтажу і прийнятною ціною.
- Пінополістирол та CLT-панелі мають найнижчі оцінки, що пов'язано з нижчою екологічністю і високою вартістю виготовлення.
- Газобетон і піногіпс займають проміжні позиції, поєднуючи добрі пожежні характеристики та середню екологічність.

### ПЕРЕВАГИ CLT-панелей

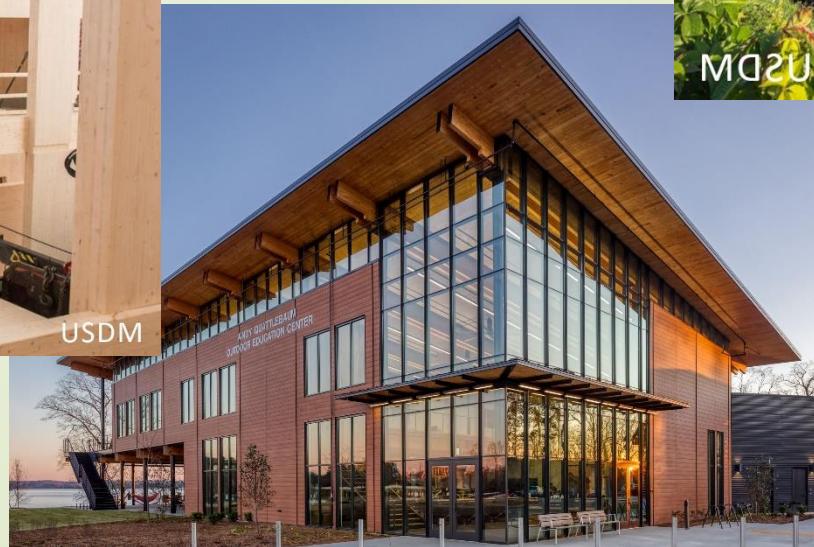
- Конструктивна ефективність.** CLT-панелі — це масивні дерев'яні елементи, виготовлені з кількох шарів дошки, склеєних перпендикулярно один до одного. Така крос-ламінована структура забезпечує:
  - високу несучу здатність у двох напрямках;
  - стійкість до деформацій та стабільність розмірів;
  - можливість застосування у багатоповерховому будівництві (до 8–10 поверхів).
- Швидкість і точність монтажу.**
- Екологічність.**
- Енергоефективність.**
- Противопожежна безпека.**
- Архітектурна гнучкість.**

Інтегральний коефіцієнт ефективності утеплювачів



# ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ CLT-ПАНЕЛЕЙ У ЖИТЛОВОМУ БУДІВНИЦТВІ

Використання CLT-панелей у житловому будівництві є **технічно обґрунтованим, екологічно безпечним та економічно доцільним рішенням**, особливо у проєктах, де пріоритетами є **сталий розвиток, енергоефективність та швидкість реалізації**. У поєднанні з екологічним утепленням (солома, ековата тощо) CLT дозволяє реалізувати концепцію **"зеленого будинку"**.



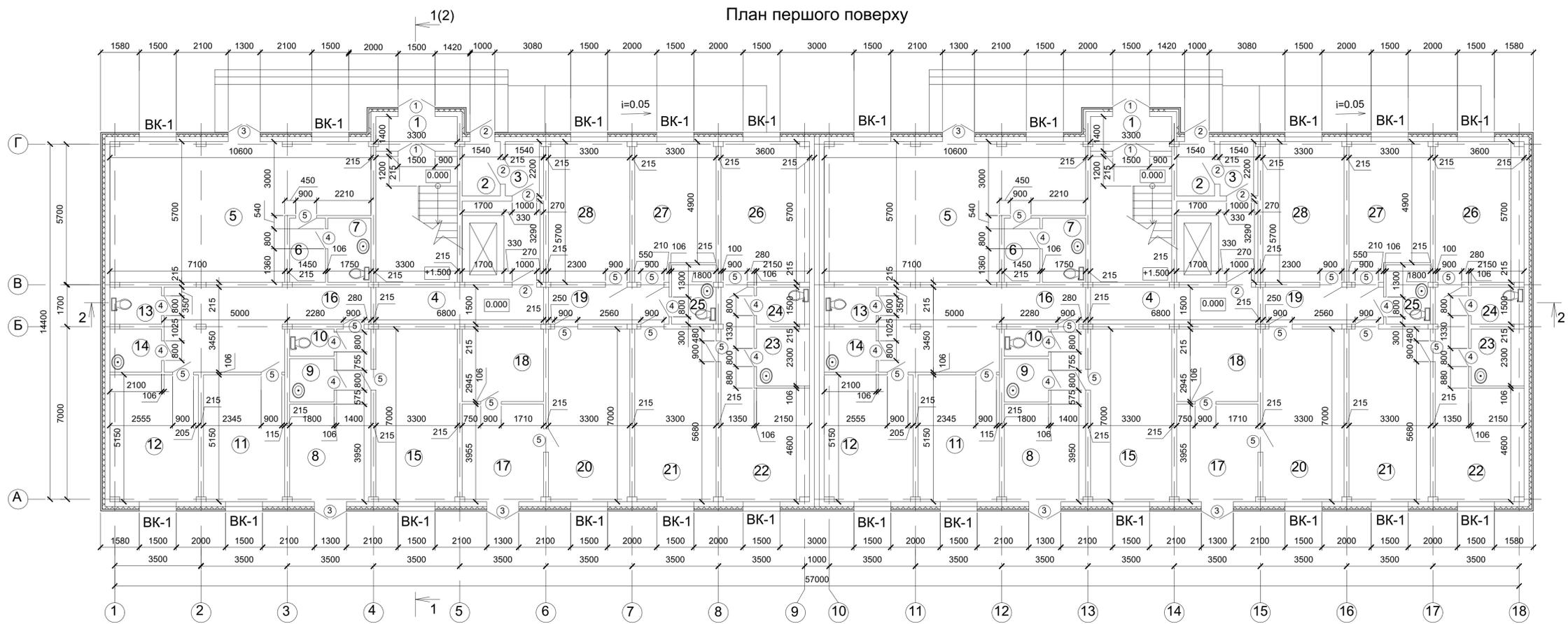
Багатопверхівка у Лондоні загальною площею 155 000 м кв., зведена за 18 місяців із CLT-панелей



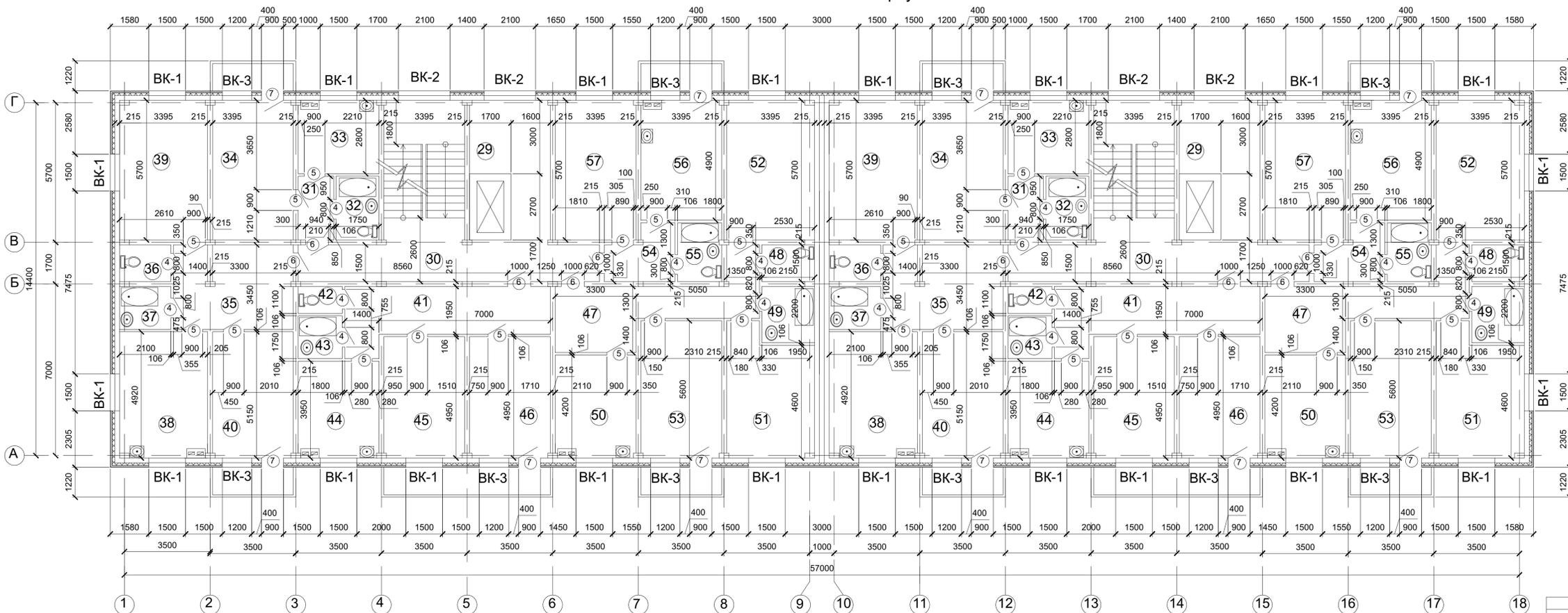
## Порівняння CLT-панелей з традиційними матеріалами в житловому будівництві

Критерій	CLT-панелі	Газобетон	Залізобетон	Цегла
Несуча здатність	Висока в обох напрямках	Середня	Висока	Висока
Швидкість монтажу	Дуже висока (збірка з готових панелей)	Середня	Низька	Низька
Маса конструкції	Легка	Легка	Важка	Важка
Теплопровідність	Низька ( $\approx 0.12-0.14$ Вт/м·К)	Низька	Висока	Висока
Екологічність	Висока (деревина, низький CO <sub>2</sub> слід)	Середня (енерговитрати при випалі)	Низька (цемент, сталь)	Низька
Вогнестійкість	Висока (обвуглення, передбачувана поведінка)	Середня	Висока	Висока
Ціна будівництва	Вища за класичні, але компенсується швидкістю	Низька	Висока	Середня
Придатність до багаторазового використання	Висока	Обмежена	Низька	Низька

План першого поверху



План типового поверху



Склад квартир			
Показник	Одиниця виміру	Значення	
Кількість квартир	однокімнатних	шт	36
	двокімнатних	шт	36
	трикімнатних	шт	18
Середній розмір квартир	однокімнатних	м <sup>2</sup>	39,5
	двокімнатних	м <sup>2</sup>	66
	трикімнатних	м <sup>2</sup>	90

Експлікація приміщень			
№ п/п	Найменування	Площа, м <sup>2</sup>	Кат. прим.
Перший поверх			
1	Тамбур	6,6	
2	Тамбур	3,1	
3	Тамбур	3,1	
4	Сходово-ліфтовий вузол	6,25	
Осіс №1.4			
5	Торговельна зала	47,5	
6	Підсобні приміщення	4	
7	Санвузол	4	
Осіс №2.5			
8	Тамбур	16,6	
9	Санвузол	3	
10	Туалет	2	
11	Офісне приміщення	16	
12	Офісне приміщення	16	
13	Туалет	2	
14	Санвузол	3	
15	Офісне приміщення	22,4	
16	Коридор	27,3	
Осіс №3.6			
17	Тамбур	12,4	
18	Офісне приміщення	9,7	
19	Коридор	12,6	
20	Офісне приміщення	22,4	
21	Офісне приміщення	22,4	
22	Підсобні приміщення	16	
23	Санвузол	4	
24	Туалет	3	
25	Туалет	4	
26	Офісне приміщення	19	
27	Офісне приміщення	16,6	
28	Офісне приміщення	19	
Типовий поверх			
29	Сходово-ліфтовий вузол	13,6	
30	Загальний коридор	18,5	
Квартира №1.6			
31	Тамбур	4	
32	Санвузол	5	
33	Кухня	9	
34	Спальня	18	
Квартира №2.7			
35	Тамбур	16	
36	Туалет	2	
37	Ванна кімната	3	
38	Кухня	16	
39	Спальня	19	
40	Вітальня	16	
Квартира №3.8			
41	Тамбур	16	
42	Туалет	2	
43	Ванна кімната	3	
44	Кухня	12	
45	Спальня	16	
46	Вітальня	16	
Квартира №4.9			
47	Тамбур	17	
48	Туалет	3	
49	Ванна кімната	4	
50	Кухня	13	
51	Спальня	16	
52	Спальня	19	
53	Вітальня	18	
Квартира №5.10			
54	Тамбур	5	
55	Санвузол	4	
56	Кухня	16	
57	Спальня	19	

08-11.МКР.012 - АР

Житловий багатоквартирний будинок

Зм.	Кільк.	Арх.	Ніжк.	Підп.	Дата	Стадія	Лист	Листів
Розробив	Фурман О.І.							
Перевірив	Біс Ю. С.							
Керівник	Біс Ю. С.							
Н.контроль	Масвська І.В.							
Опонент	Панкевич О. Д.							
Затвердив	Шець В.В.							

Оцінка ефективності застосування екологічно чистих матеріалів для утеплення в житловому будівництві

План першого поверху, План типового поверху

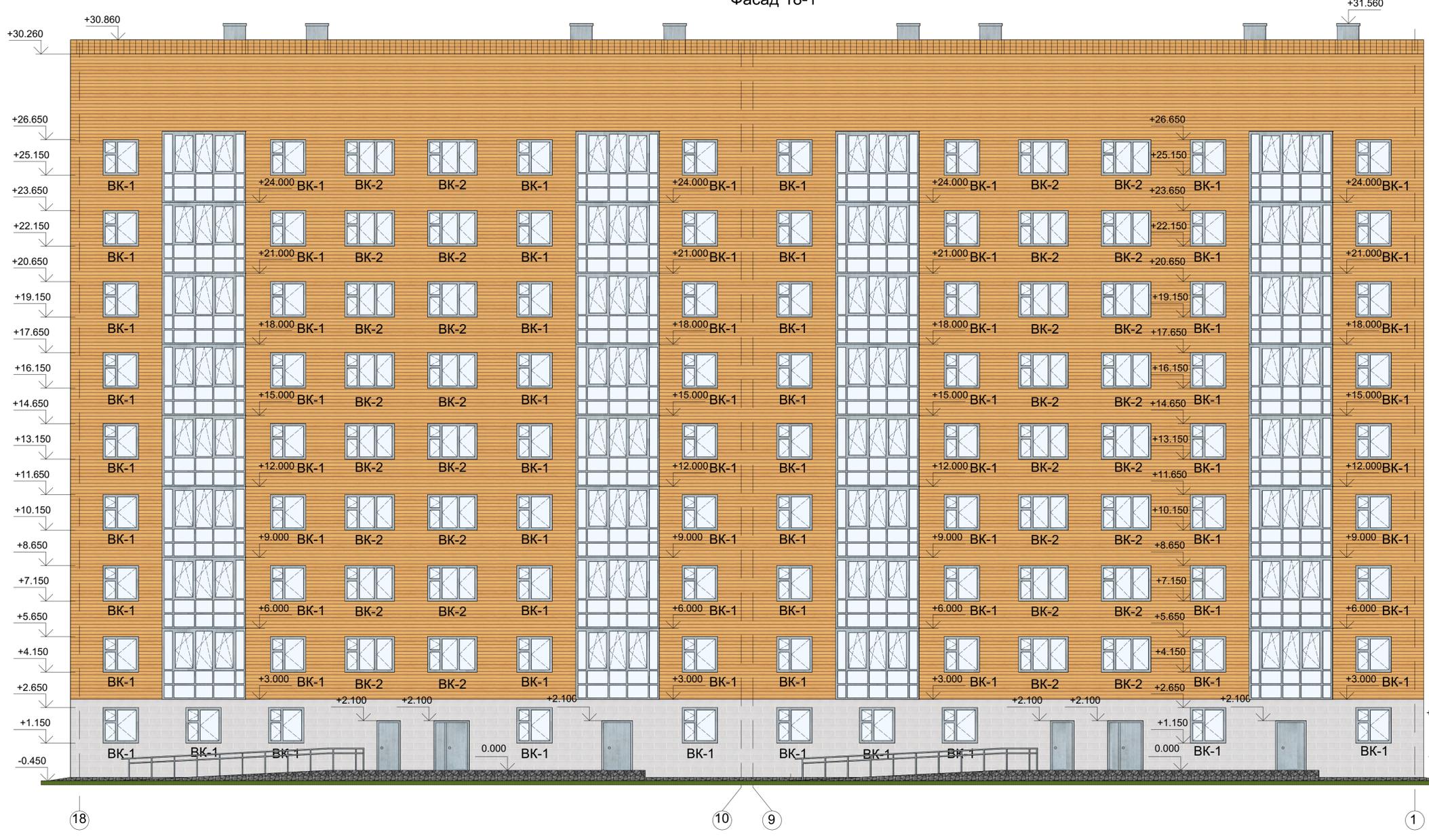
ВНТУ, Б-23мз

ПОСІДНЕННЯ:  
Замість івр. N  
Підпис Дата  
Івр. N орг.

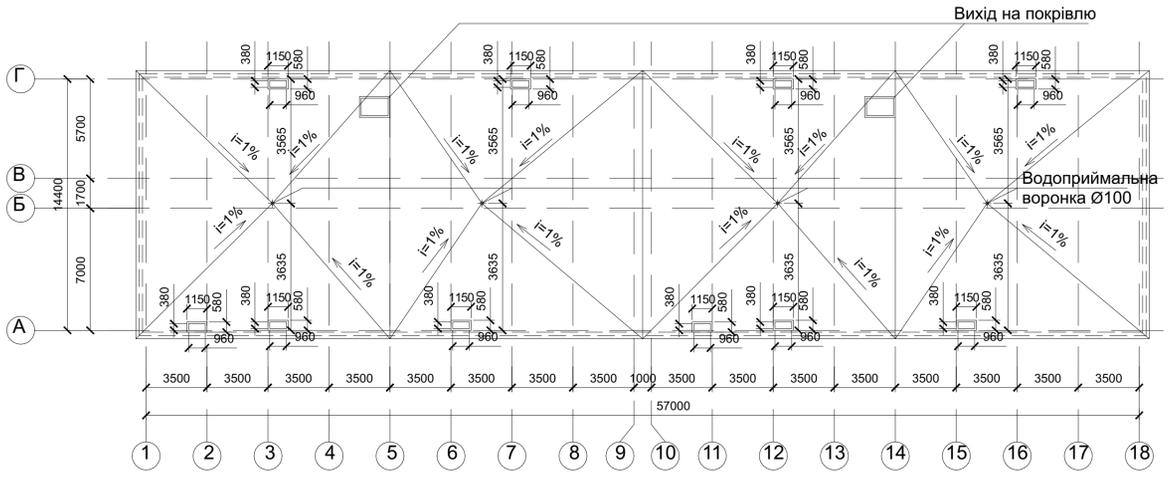
Розріз 1-1

- Гідроізоляційна мембрана 2 шари
- Панель OSB δ=10 мм
- Повітряний прошарок δ = 10 мм
- Ековата δ=200 мм
- Пароізоляція
- CLT-плита покриття δ=123 мм
- Планкен з модрини
- Повітряний прошарок δ = 10 мм
- Панель OSB δ=10 мм
- Ековата δ=90 мм
- CLT-панель δ=215 мм

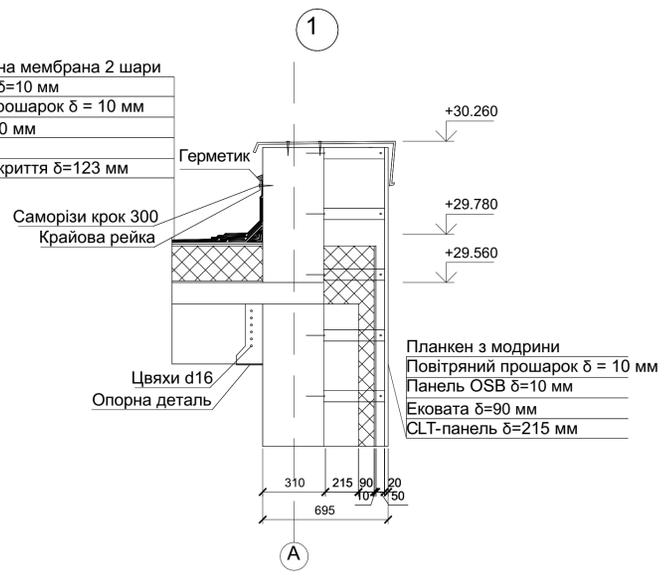
Фасад 18-1



План покрівлі



- Гідроізоляційна мембрана 2 шари
- Панель OSB δ=10 мм
- Повітряний прошарок δ = 10 мм
- Ековата δ=200 мм
- Пароізоляція
- CLT-плита покриття δ=123 мм



- 1 Працювати сумісно з листом 1
- 2 Відомість заповнення віконних та дверних прорізів див. пояснювальну записку
- 3 Відомість оздоблення приміщень див. пояснювальну записку
- 4 Експлікацію підлог див. пояснювальну записку

08-11.МКР.012 - AP

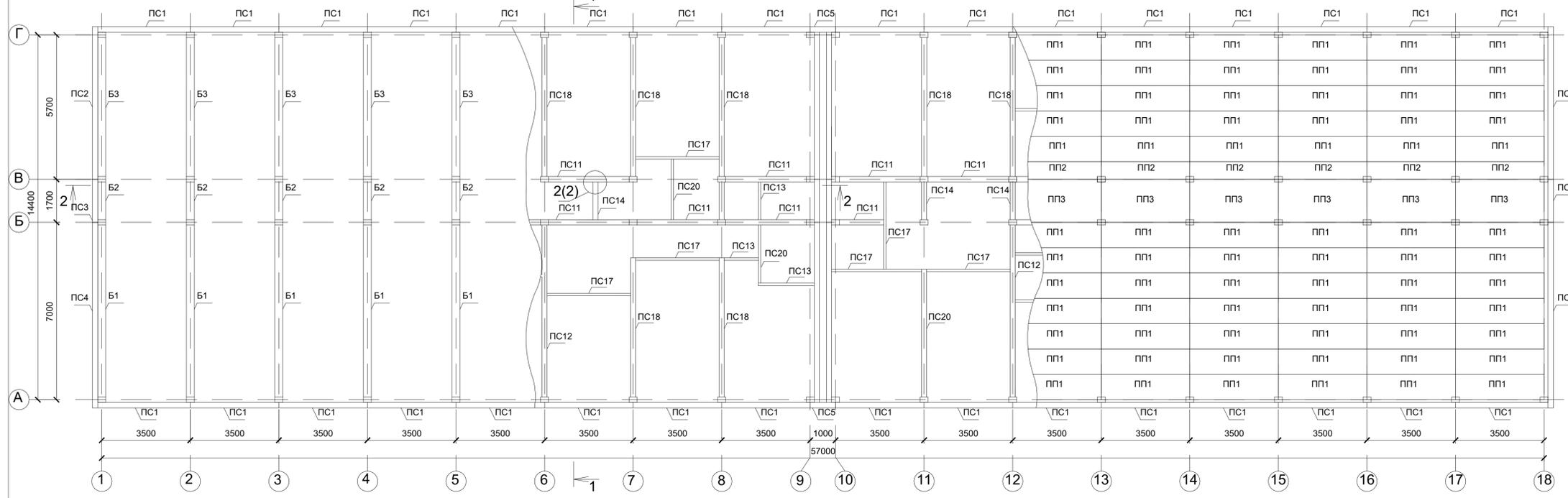
Житловий багатоквартирний будинок

Зм.	Кільк.	Арк.	Надрк.	Підп.	Дата	Оцінка ефективності застосування екологічно чистих матеріалів для утеплення в житловому будівництві	Стадія	Лист	Листів
Розробив	Фуриан О. І.						П	18	23
Перевірив	Бікс Ю. С.								
Керівник	Бікс Ю. С.								
Н. контроль	Масвська І. В.								
ОпONENT	Панквич О. Д.								
Затвердив	Шевць В. В.								

Фасад 18-1, Розріз 1-1, План покрівлі

ВНТУ, Б-23мз

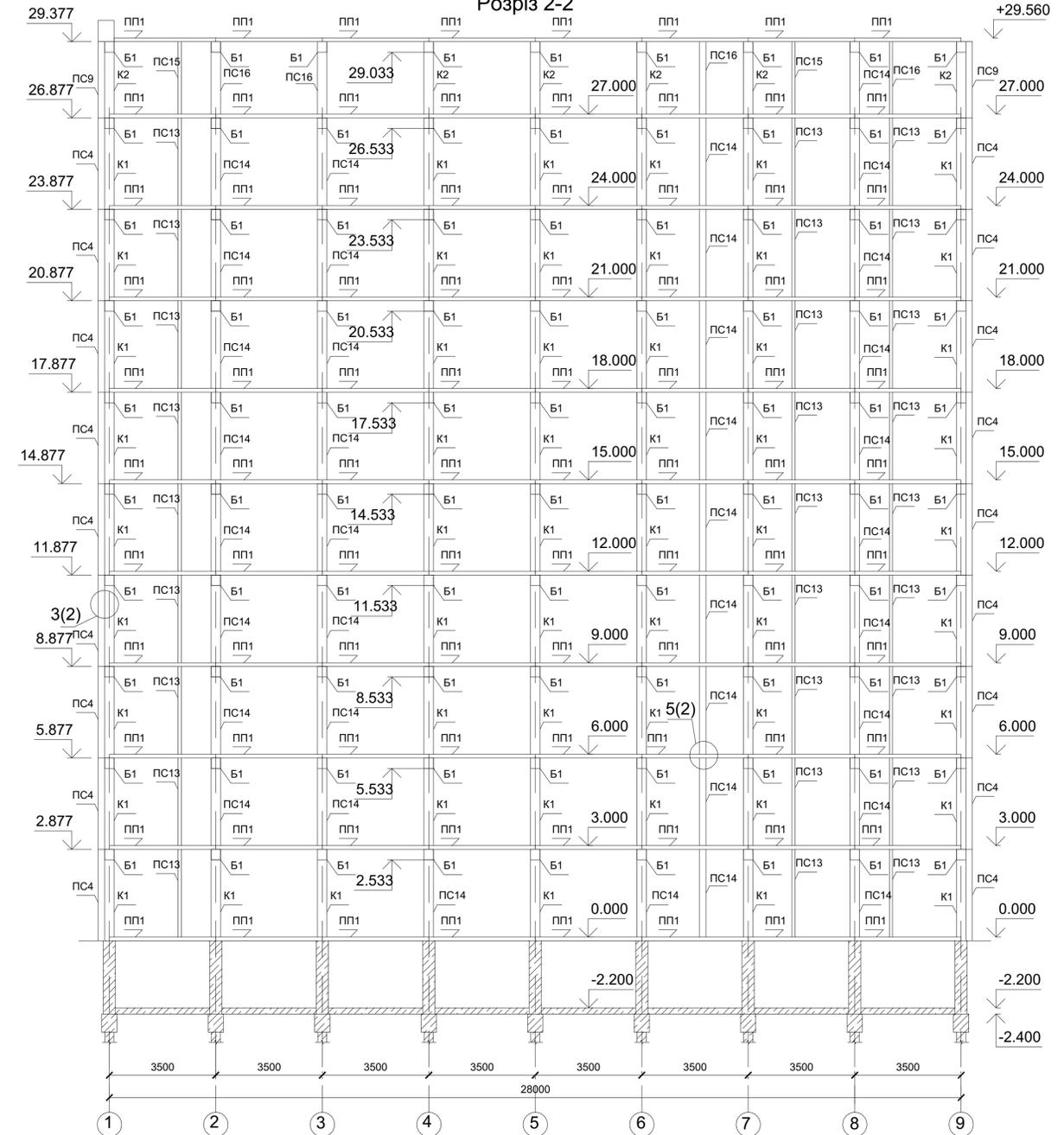
Схема розміщення основних елементів на відм. +3.000



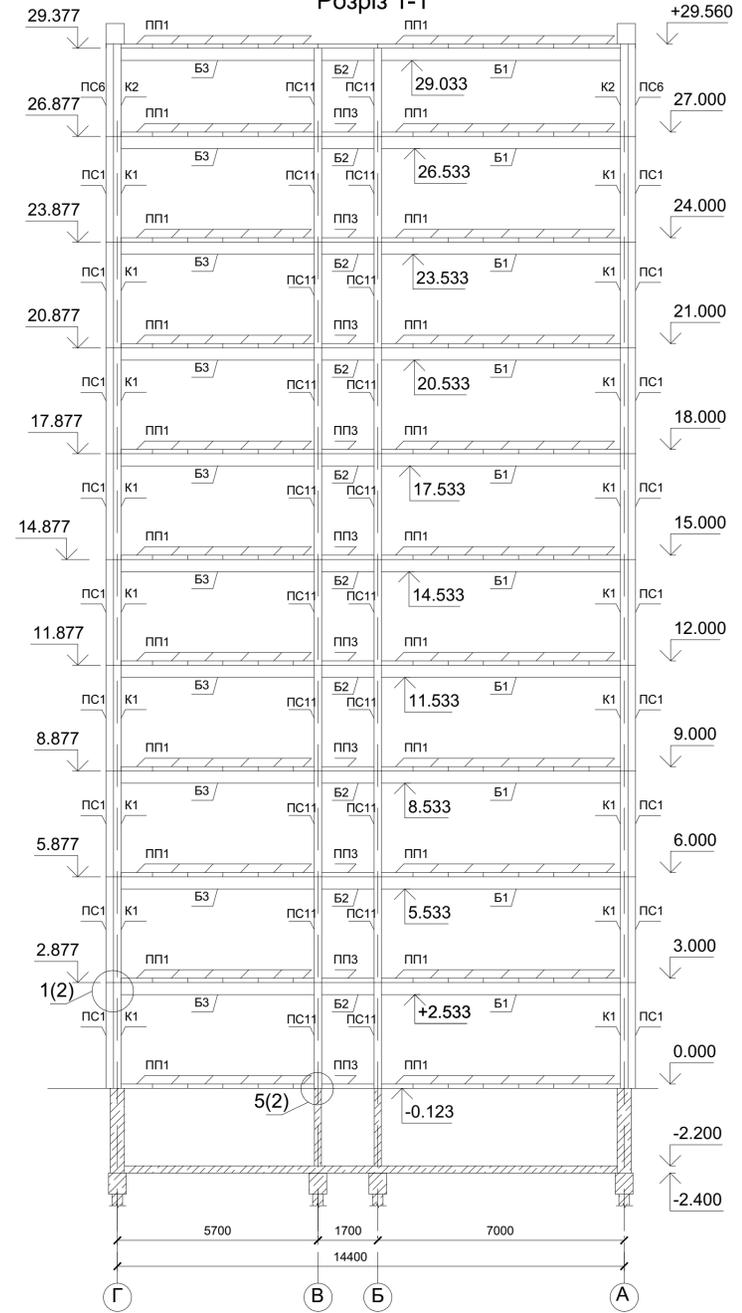
Специфікація елементів

№	Позначення	Найменування	Кільк.	Маса од., кг	Прим.
1	К1	Клесдерев'яна колона 310x215 x3000	648	99	
2	К2	Клесдерев'яна колона 310x215 x2600	72	87	
3	Б1	Клеєна балка 310x344 x7000	162	370	
4	Б2	Клеєна балка 310x195 x1700	162	91	
5	Б3	Клеєна балка 310x195 x5700	162	172	
6	СМ1	Сходовий марш 1575x3000	36	2363	
7	ПП1	CLT-панель перекриття (покриття) 1000x123x3500	2040	215	
8	ПП2	CLT-панель перекриття (покриття) 700x123x3500	340	151	
9	ПП3	CLT-панель перекриття (покриття) 1700x123x3500	36	366	
10	ПС1	CLT-панель стінова 3000x215x3500	306	1129	
11	ПС2	CLT-панель стінова 3000x215x6000	36	1052	
12	ПС3	CLT-панель стінова 3000x215x1700	36	528	
13	ПС4	CLT-панель стінова 3000x215x7300	36	2258	
14	ПС5	CLT-панель стінова 3000x215x1000	18	323	
15	ПС6	CLT-панель стінова 2500x215x3500	34	940	
16	ПС7	CLT-панель стінова 2500x215x6000	4	1613	
17	ПС8	CLT-панель стінова 2500x215x1700	4	457	
18	ПС9	CLT-панель стінова 2500x215x7300	4	1962	
19	ПС10	CLT-панель стінова 2500x215x1000	2	269	
20	ПС11	CLT-панель стінова 3000x215x3190	218	1029	
21	ПС12	CLT-панель стінова 3000x215x6785	56	2137	
22	ПС13	CLT-панель стінова 3000x106x1500	36	239	
23	ПС14	CLT-панель стінова 3000x215x1500	54	484	
24	ПС15	CLT-панель стінова 2500x106x1500	6	199	
25	ПС16	CLT-панель стінова 2500x215x1500	6	403	
26	ПС17	CLT-панель стінова 3000x106x3300	136	532	
27	ПС18	CLT-панель стінова 3000x215x5485	170	1769	
28	ПС19	CLT-панель стінова 3000x215x5000	36	1613	
29	ПС20	CLT-панель стінова 3000x106x2300	54	366	
30	ПС21	CLT-панель стінова 3000x106x2300	54	366	

Розріз 2-2

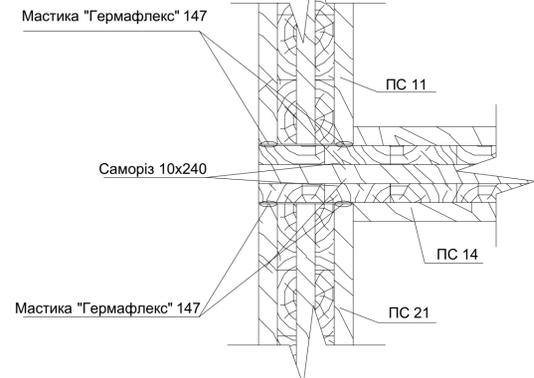
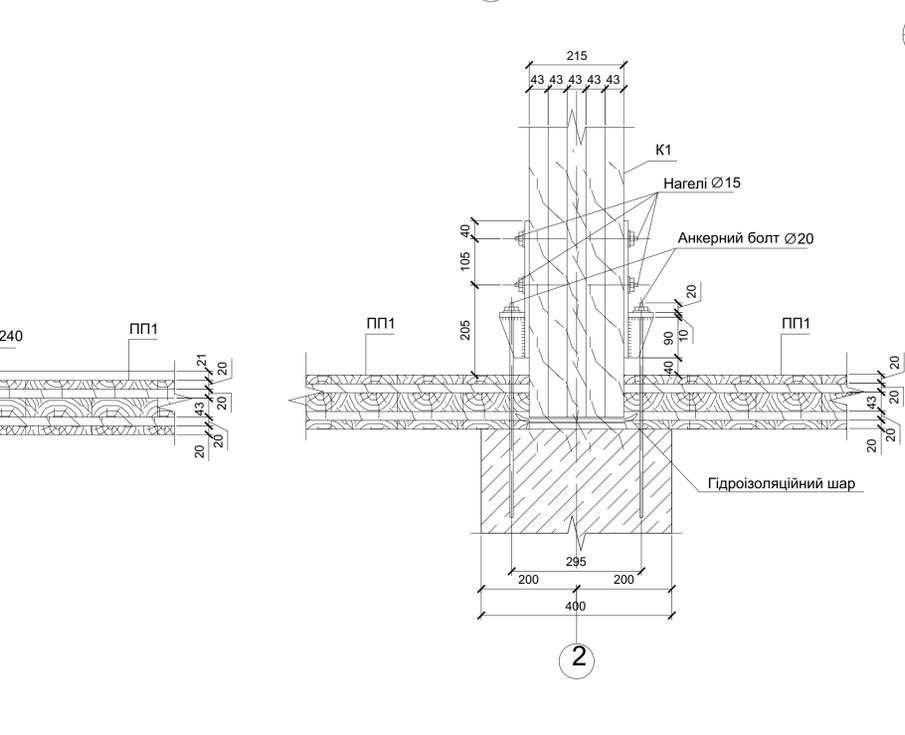
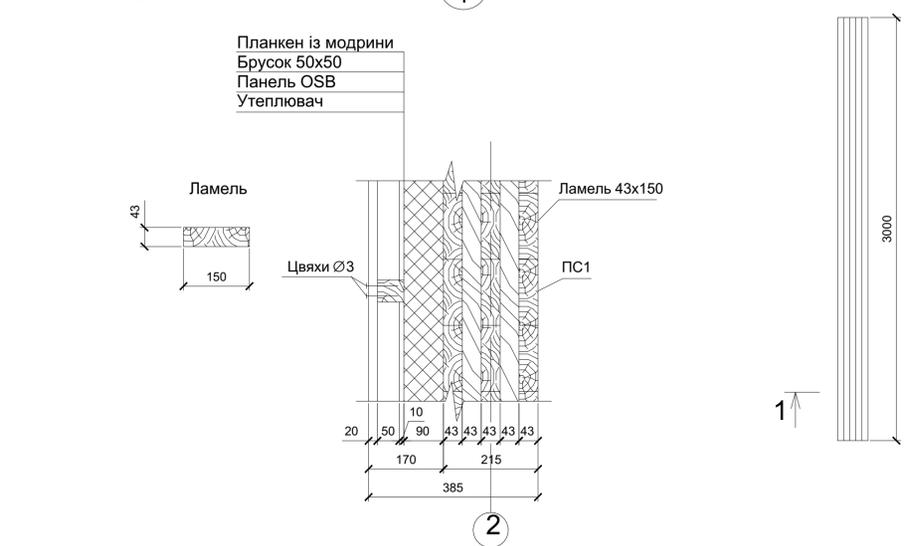
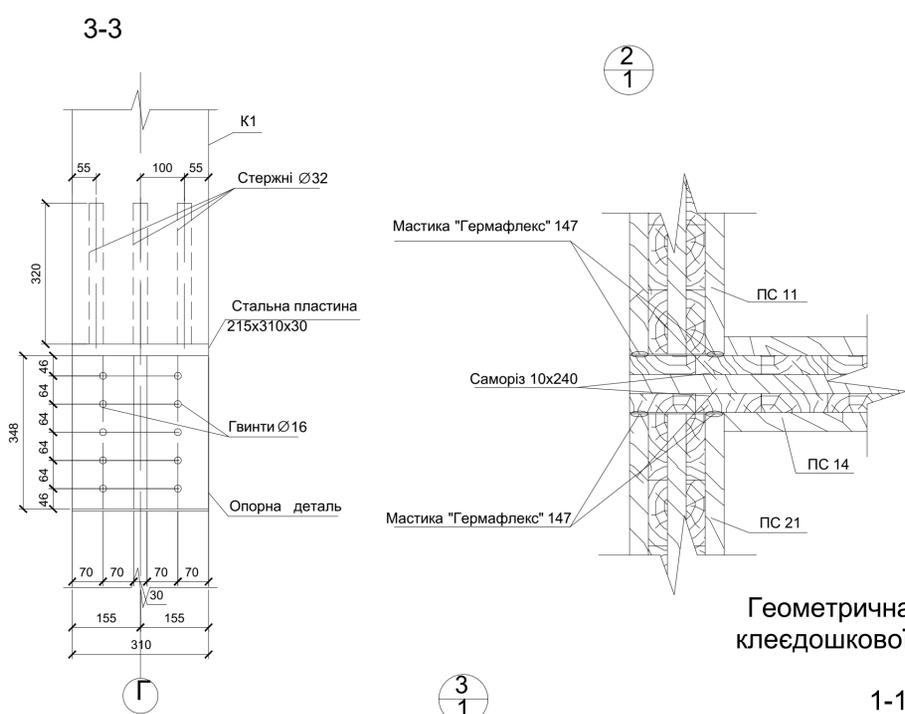
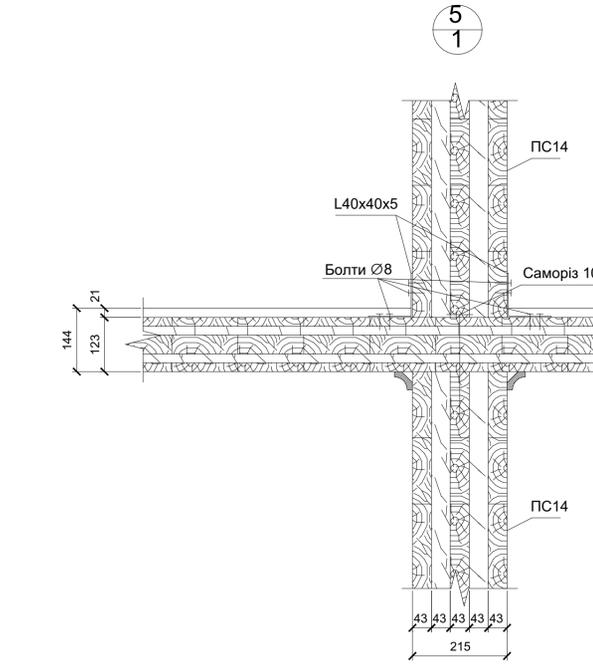
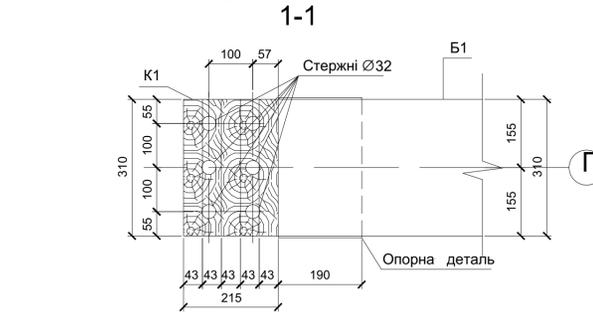
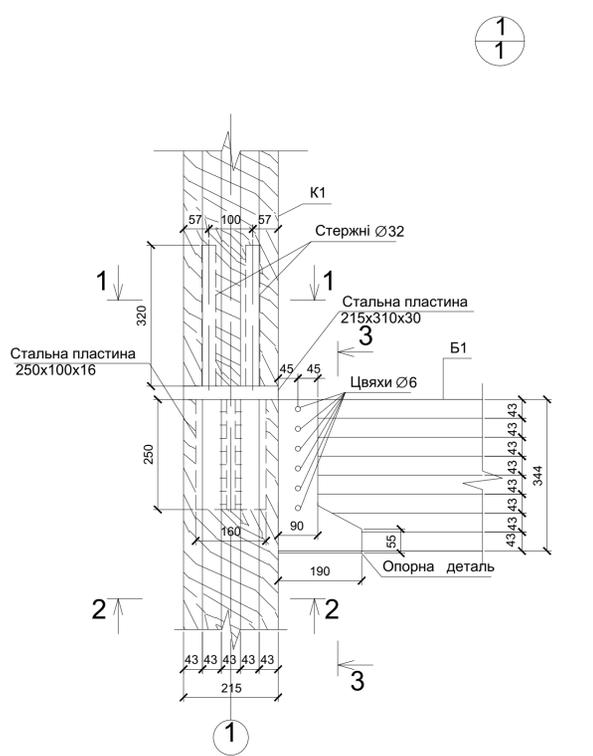


Розріз 1-1



- Будівля спроектована для експлуатації в районах зі сніговим навантаженням  $SQ=1,5$  кПа (IV район) і вітровим навантаженням  $W_0=0,48$  кПа (II район).
- Температурно-вологі умови експлуатації (експлуатація опалюваних будівель при температурі від 12 °С до 24 °С відносної вологості повітря від 50% до 60%).
- Основні будівельні конструкції: колони - клеєдерев'яні, несуча конструкція покриття - клеєна балка, стінове огородження - утеплені п'ятишарні CLT-панелі; перекриття - п'ятишарні CLT-панелі.
- За відмітку 0,000 прийнята відмітка чистої підлоги.
- В процесі експлуатації зволоження дерев'яних конструкцій не допускається. Нормативна вологість дерев'яних конструкцій не більше 12%.
- Для захисту фундаментів від зволоження по периметру будівлі влаштовують вимощення шириною не менше 1,2 м.

08-11.МКР.012 - КД					
Житловий багатоквартирний будинок					
Зм.	Кільк.	Арх.	Нідх.	Підл.	Дата
Розробив	Фурман О.І.				
Перевірив	Біс Ю. С.				
Керівник	Біс Ю. С.				
Н.контроль	Масьська І.В.				
Опонент	Панкевич О. Д.				
Затвердив	Щець В.В.				
Оцінка ефективності застосування екологічно чистих матеріалів для утеплення в житловому будівництві			Стадія	Лист	Листів
Схема розміщення основних елементів на відм. +3.000, Розріз 2-2, Розріз 1-1			п	20	23
ВНТУ, Б-23мз					



Геометрична схема клеєдошкової колони

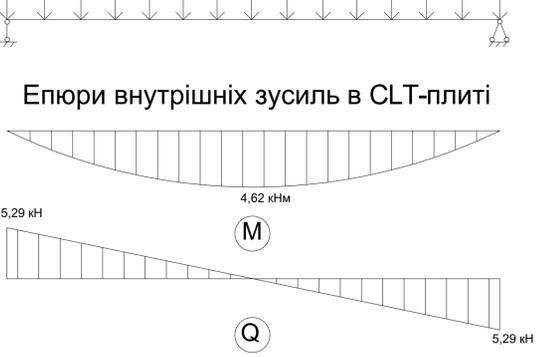
Розрахункова схема центрально стиснутої колони

Розрахункова схема позацентровано стиснутої колони

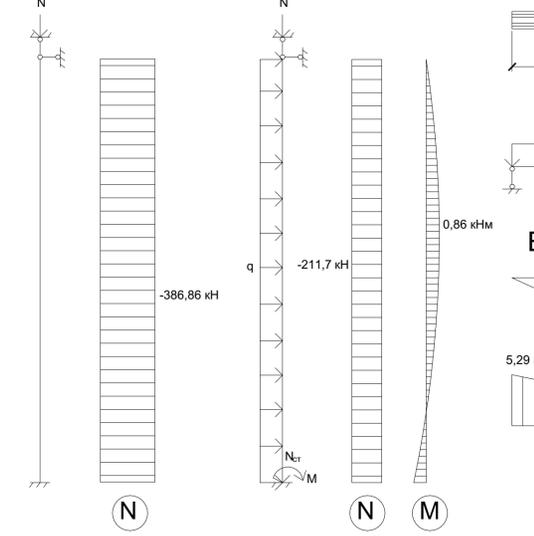
Геометрична схема CLT-плити 1-1



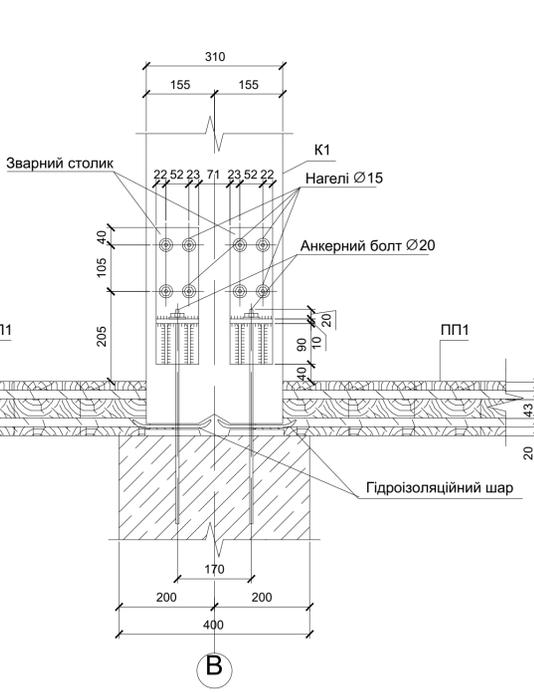
Розрахункова схема CLT-плити



Епюри внутрішніх зусиль в CLT-плиті



Епюри внутрішніх зусиль в балці



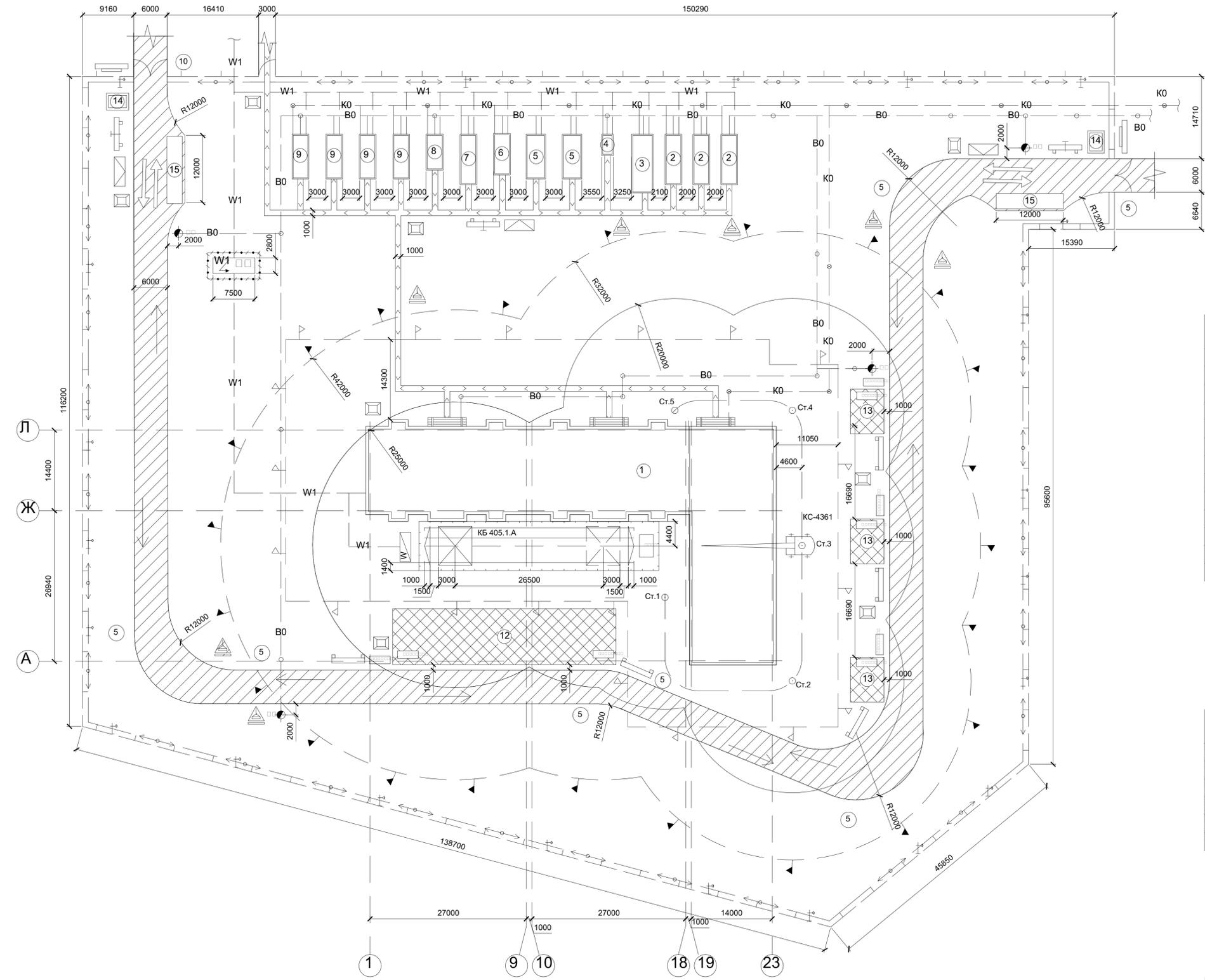
Гідроізоляційний шар

- Працювати сумісно з листом 1.
- Для виготовлення стінових CLT-панелей застосувати соснову деревину 3-го сорту вологістю 12%.
- Для виготовлення CLT-плит покриття і перекриття застосувати соснову деревину 3-госорту вологістю 12%.
- Для виготовлення клеєдошквих колон застосувати соснову деревину 3-го сорту вологістю 12%.
- Для виготовлення клеєних балок покриття застосувати соснову деревину 1-го сорту вологістю 12%.
- Для виготовлення всіх основних клеєних конструкцій прийняти поліуретановий клей.
- Зниження пожежної небезпеки елементів конструкції забезпечити застосуванням вогнезахисних складів.
- Для захисту дерев'яних конструкцій від корозії виконати антисептирування поверхні та покриття лакофарбними складами.
- Для влаштування з'єднань на клеєних стержнях використати епоксидний клей, стержні прийняти з арматури класу А400 з розрахунковим опором  $R=400$  МПа.
- Для влаштування з'єднань на цвяхах використати цвяхи  $d=6$  мм,  $l=200$  мм.
- Для влаштування болтових з'єднань використати болти класу точності В  $d=8$  мм.
- Для влаштування нагельних з'єднань використати нагелі  $d=15$  мм.
- Для влаштування з'єднань на анкерних болтах використати анкери  $d=20$  мм.
- Для влаштування з'єднань на гвинтах використати гвинти  $d=16$  мм,  $L=58$  мм.
- Металеві з'єднувальні деталі повинні бути захищені від корозії.

08-11.МКР.012 - КД					
Житловий багатоквартирний будинок					
Зм.	Кбгкз	Арх	Ніжк	Підл.	Дата
Розробив	Фурман О.І.				
Перевірив	Біс Ю. С.				
Керівник	Біс Ю. С.				
Н.контроль	Масвська І.В.				
Опонент	Панкевич О. Д.				
Затвердив	Швець В.В.				
Оцінка ефективності застосування екологічно чистих матеріалів для утеплення в житловому будівництві				Стадія	Лист
Схеми				П	21
				Листів	23
				ВНТУ, Б-23мз	



Об'єктний будгенплан на основний період будівництва



Експлікація будівель та споруд

Поз-	Найменування	Об'єм		Розміри в плані, мм	Тип, марка або короткий опис
		Зат-зм-	К-ть		
1	Будівля, що будується	шт	1	41340x73000	Проектоване
2	Гардеробна	шт	3	3000x9000	Інвентарне
3	Душова	шт	1	3900x10500	Контейнер
4	Змивальна	шт	1	2100x3800	3420-01
5	Сушильня	шт	2	2400x4000	ЛВ-157
6	Туалет	шт	1	3500x9000	494-4-14
7	Медпункт	шт	1	3100x6400	1129К
8	Столова	шт	1	3000x9000	ГОПП-20
9	Приміщення для відпочинку та прийому їжі	шт	4	3000x7400	312-00
12	Навіс	шт	1	10000x40000	
13	Навіс	шт	3	6000x8000	
14	КПП	шт	2	3000x4000	Інвентарне
16	Пункт миття коліс	шт	2	3000x11000	Проектоване

Техніко-економічні показники

Найменування	Зат-зм-	К-ть
Протяжність тимчасових доріг	км	0,37
Протяжність інженерних комунікацій	км	1,4
Протяжність огороження будмайданчику	км	0,61
Загальна площа майданчику	м <sup>2</sup>	23265
Площа зводимих будівель та споруд	м <sup>2</sup>	1410,95
Площа тимчасових будівель і споруд, включно зі складським господарством	м <sup>2</sup>	23265

Умовні позначення

	Лінія межі небезпечної зони при падінні предмета з будівлі		Контур заземлення		Бункер для прийому сміття		В'їзд на будмайданчик та виїзд
	Лінія межі зони дії крана		Ворота і хвіртка		Проектор на опори		Напрямок руху транспорту та кранів
	Лінія межі небезпечної зони під час роботи крана		Тимчасова пішохідна доріжка		Знак обмеження швидкості руху транспорту		Зони складування матеріалів та конструкцій
	Лінія огороження зони дії крана		Тимчасова дорога		Стоянка стрілових самохідних кранів		Місце зберігання вантажозахоплюючих пристроїв і тари
	Лінія попередження про обмеження зони дії крана		В'їзний стенд з транспортною схемою		Стоянка стрілових самохідних кранів		Місце прийому розчину та бетону
	Лінія попередження про обмеження зони дії крана		Стенд зі схемами стропування та таблицею мас вантажів		Стоянка стрілових самохідних кранів		Місце зберігання вантажозахоплюючих пристроїв і тари
	Лінія попередження про обмеження зони дії крана		Стенд з протипожежним інвентарем		Стоянка стрілових самохідних кранів		Місце зберігання вантажозахоплюючих пристроїв і тари
	Лінія попередження про обмеження зони дії крана		Навіс над входом в будівлю		Стоянка стрілових самохідних кранів		Місце зберігання вантажозахоплюючих пристроїв і тари
	Лінія попередження про обмеження зони дії крана		Стріловий пневмоколісний кран		Стоянка стрілових самохідних кранів		Місце зберігання вантажозахоплюючих пристроїв і тари
	Лінія попередження про обмеження зони дії крана		Стріловий пневмоколісний кран		Стоянка стрілових самохідних кранів		Місце зберігання вантажозахоплюючих пристроїв і тари
	Лінія попередження про обмеження зони дії крана		Стріловий пневмоколісний кран		Стоянка стрілових самохідних кранів		Місце зберігання вантажозахоплюючих пристроїв і тари

- Швидкість руху транспортних засобів на прямих ділянках не повинна перевищувати 10 км/год, а на прямих ділянках не повинна перевищувати 5 км/год.
- Адміністративно-побутові приміщення, майстерні, закриті склади та інші тимчасові будівлі і споруди, де перебувають люди, розміщуються за межами небезпечних зон.
- Оснастити майданчик біотуалетом
- Рух транспортних засобів здійснюється по тимчасовим дорогам. Схему руху автотранспорту по майданчику зазначено на плані.
- Майданчик забезпечити первинними засобами пожежогасіння
- Будівельне сміття має бути вивезене з майданчика у триденний термін.
- Висота огорожі будмайданчика повинна бути не менше 1,6 м, а ділянка робіт - не менше 1,2 м.
- Під час будівництва дотримуватися умов збереження навколишнього середовища.

08-11.МКР.012 - ПОБ					
Житловий багатоквартирний будинок					
Зм.	Кільк.	Арх.	Нач.	Підп.	Дата
Розробив	Фурман О.І.				
Перевірив	Біс Ю. С.				
Керівник	Біс Ю. С.				
Н.контроль	Масвська І.В.				
Опонент	Панкевич О. Д.				
Затвердив	Швець В.В.				

Оцінка ефективності застосування екологічно чистих матеріалів для утеплення в житловому будівництві

Стадія	Лист	Листів
П	23	23

Об'єктний бутгенплан на основний період будівництва

ВНТУ, Б-23мз

# ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЄКТУ

## Загальні показники:

- **Площа забудови:** 1215,5 м<sup>2</sup>
- **Загальна площа будівлі:** 10 939,5 м<sup>2</sup>
- **Кількість поверхів:** 9 житлових + технічні
- **Кількість квартир:** 72
- **Тривалість будівництва:** 10 місяців (≈210 робочих днів)

## Собівартість будівництва:

- **Загальна кошторисна вартість:** ≈ 88,1 млн грн
- **Середня собівартість 1 м<sup>2</sup> житла:** 8057 грн/м<sup>2</sup>

## Переваги CLT-технології:

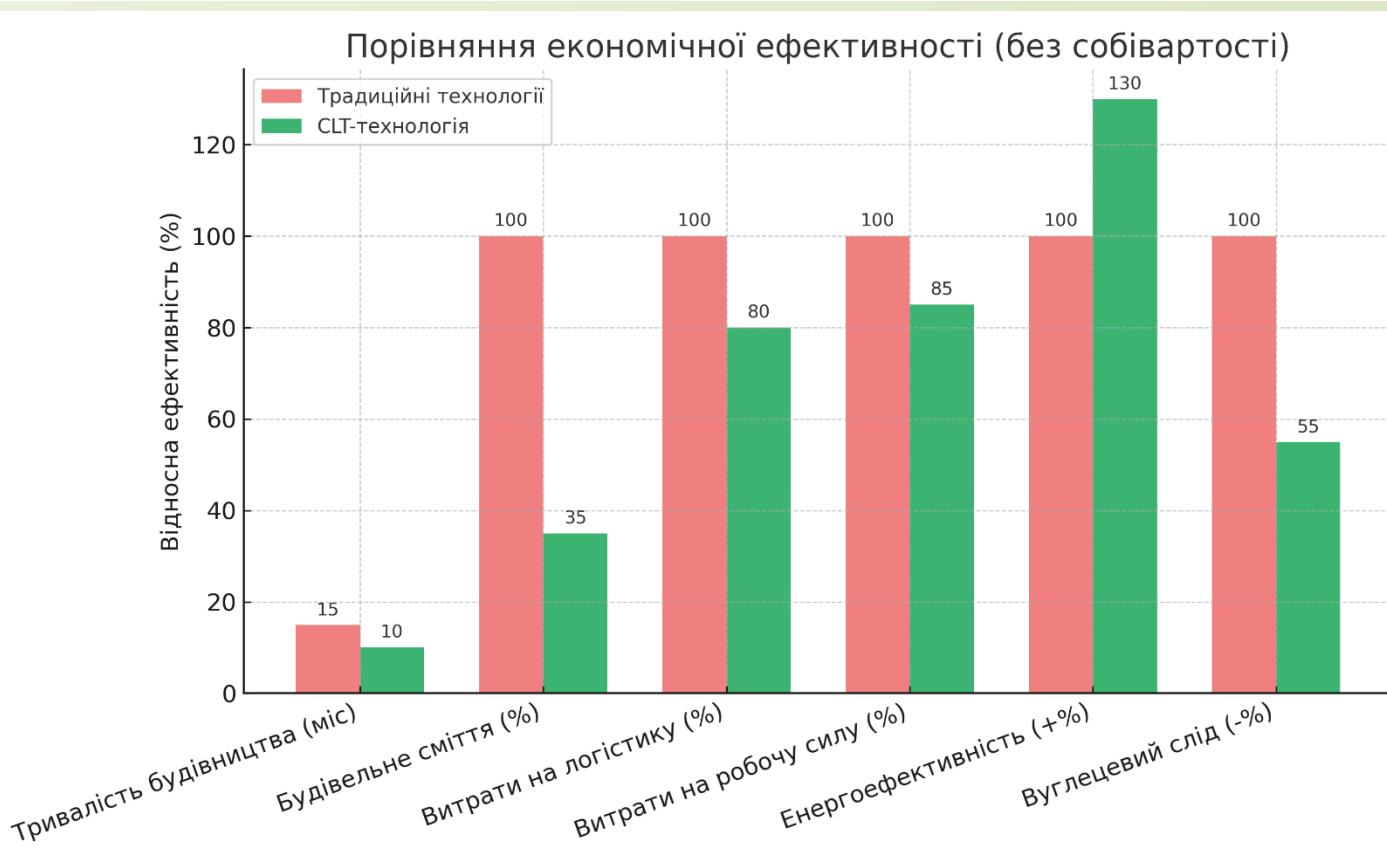
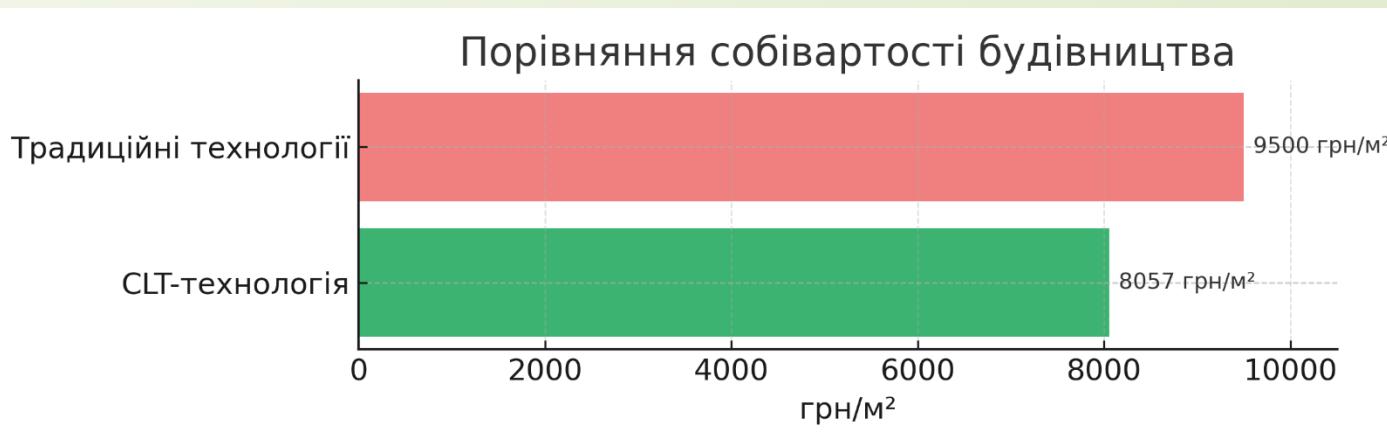
- Зниження витрат на робочу силу до **15%** завдяки швидкому монтажу
- Зменшення будівельного сміття на **60–70%**
- Витрати на логістику зменшені на **20%**
- Мінімальна потреба в важкій техніці

## Термін окупності:

- **При ринковій вартості 1 м<sup>2</sup> – 18 000 грн:**
  - **Очікуваний прибуток з продажу – ≈ 109 млн грн**
  - **Чистий прибуток: ≈ 21 млн грн**
  - **Термін окупності: 2,5–3 роки**

## Сталий розвиток:

- Енергоефективність на 30–40% вища за цегляні та бетонні будинки
- Зниження вуглецевого сліду на 45%
- Підвищення екологічного іміджу забудовника



## Висновок:

Використання CLT-панелей дозволяє:

- зменшити витрати на 12–17% у порівнянні з традиційними технологіями;
- пришвидшити здачу об'єкта в експлуатацію;
- забезпечити конкурентну рентабельність на ринку житла.

**ВІДГУК ОПОНЕНТА**  
**на магістерську кваліфікаційну роботу**

на тему: «Оцінка ефективності застосування екологічно чистих матеріалів для утеплення в житловому будівництві»

здобувача групи Б-23мз Фурмана Олександра Івановича

Представлена магістерська кваліфікаційна робота є змістовною, актуальною та своєчасною. Вона відповідає викликам сучасного будівництва, зокрема у сфері енергоефективності, декарбонізації та впровадження принципів сталого розвитку.

Автором проаналізовано широкий спектр природних і промислових матеріалів, які можуть бути застосовані як теплоізоляція: солома, масивна деревина, CLT-панелі, перліт, вермикуліт, гіпсові композиції, біокомпозити. Проведено всебічну оцінку фізико-механічних, екологічних та експлуатаційних характеристик матеріалів із залученням сучасних методів багатокритеріального аналізу, що свідчить про наукову зрілість автора.

До сильних сторін роботи можна віднести також аналіз та порівняння актуальних нормативних вітчизняних та зарубіжних норм у сфері енергозбереження, практичні висновки з рекомендаціями щодо впровадження натуральних утеплювачів.

Робота оформлена відповідно до вимог, містить повний комплект розділів, додатків і графічну частину, посилання на наукові джерела.

Окремо слід відзначити розробку практичної частини: технічного обґрунтування використання CLT-панелей у житловому будівництві, розробку архітектурно-конструктивних рішень багатоповерхового житлового будинку, а також будівельного генерального плану.

Виявлені такі незначні недоліки роботи:

- окремі розділи потребують глибшого порівняння з українською практикою впровадження екологічних стандартів;

- для сучасних реалій України у технічній частині раціональніше б було запроєктувати житловий будинок меншої поверховості (до 5-ти поверхів) та більш детально розглянути технологію швидкого монтажу представленого типу будівлі;

- на деяких графіках у науковій частині роботи розрізняється коефіцієнт теплопровідності CLT-панелей. Варто б було вказати які саме варіанти цих панелей були обрані для аналізу та оцінки.

Узагальнюючи, вважаю, що магістерська кваліфікаційна робота Фурмана О.І. відповідає всім вимогам, має інноваційність та новизну, практичну цінність, а її автор заслуговує на оцінку «відмінно» та присвоєння кваліфікації магістра за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Доцент кафедри ІСБ, к.т.н., доцент



Панкевич О. Д.

## ВІДГУК

керівника магістерської кваліфікаційної роботи  
здобувача групи Б-23мз Фурмана Олександра Івановича

Тема: «Оцінка ефективності застосування екологічно чистих матеріалів для утеплення в житловому будівництві»

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена важливій науково-практичній проблемі впровадження екологічно безпечних та енергоефективних рішень в огорожувальних конструкціях житлових будівель. Сучасні вимоги до сталого будівництва, директиви ЄС щодо енергоефективності, а також нагальна потреба зменшення вуглецевого сліду зумовлюють актуальність цієї тематики.

У процесі виконання роботи здобувач проявив високий рівень теоретичної підготовки, самостійності та наукової обґрунтованості. Автор систематизував великий обсяг нормативної, наукової та технічної інформації, виконав порівняльний аналіз традиційних і альтернативних утеплювачів (солома, масивна деревина, CLT-панелі, піногіпс, газобетон, деревокомпозити, арболіт тощо), застосував багатокритеріальні методи оцінювання ефективності матеріалів за енергетичними, економічними, екологічними та конструктивними параметрами. У своїй роботі Фурман О.І. продемонстрував глибоке розуміння проблематики, вміння системно аналізувати наукові джерела, нормативну документацію, а також успішно поєднав теоретичну частину з експериментально-аналітичними розрахунками.

Особливої уваги заслуговує проведення багатокритеріального SMART-аналізу ефективності утеплювачів на основі 5 критеріїв: теплопровідність, щільність, екологічність, паропроникність та вогнестійкість. Автор оцінив широкий спектр натуральних матеріалів (солома, льон, ековата, деревоплити, CLT-панелі), порівняв їх з традиційними (мінеральна вата, пінополістирол) і обґрунтував доцільність використання альтернативних рішень у масовому житловому будівництві.

У роботі грамотно поєднано аналітичні, експериментальні та проектні підходи. Результати представлені у вигляді таблиць, діаграм, узагальнюючих графіків, що свідчить про вміння студента візуалізувати дані та аргументувати висновки.

У графічній частині продемонстровано розробку архітектурних та конструктивних рішень багатоповерхового житлового будинку із CLT-панелей з ефективним мінеральним утеплювачем, виконано деталізацію організаційно-технологічного збірно-панельного монтажу будівлі. Текст пояснювальної записки структурований, аргументований, добре оформлений згідно з нормативними вимогами.

У процесі підготовки роботи студент виявив ініціативність, здатність до наукового пошуку, акуратність у технічному оформленні, а також вміння формулювати практичні рекомендації.

Недоліки магістерської кваліфікаційної роботи:

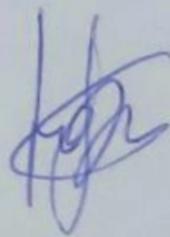
- обмежений обсяг експериментальної перевірки: у роботі подано переважно аналітичне обґрунтування ефективності матеріалів, але бракує власного експериментального дослідження (випробувань зразків утеплювачів, вимірювання коефіцієнта теплопровідності, вологопоглинання, міцності тощо);

- у тексті пояснювальної записки зустрічаються дрібні стилістичні повтори, деякі таблиці не мають повної легенди або пояснення до скорочень.

- відсутні розрахунки викидів CO<sub>2</sub> при виробництві матеріалів:

Робота виконана на високому рівні, відповідає всім вимогам магістерської підготовки та заслуговує на оцінку "відмінно". Виявлені недоліки не впливають на зміст та цінність роботи. Автор Фурман О.І. заслуговує на присвоєння кваліфікації магістра за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія», ОПП «Промислове та цивільне будівництво».

Керівник магістерської  
кваліфікаційної роботи,  
к.т.н., доцент каф. БМГА



Ю. С. Бікс