

УДК 624.016

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.250226.152.1219

КОНСТРУКТИВНЕ РІШЕННЯ ДЕРЕВОЗАЛІЗОБЕТОННОЇ СТІНОВОЇ ПАНЕЛІ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНИХ БУДІВЕЛЬ

ШЕХОРКІНА С. Є.^{1*}, докт. техн. наук, проф.,
ЗАХАРОВ М. О.², асп.

^{1*} Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 021-84-44, e-mail: svitlana.shekhorkina@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7799-2250

² Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 630-03-10, e-mail: Vilenas.dir@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-6336-6884

Анотація. Постановка проблеми. Масштаби руйнувань внаслідок воєнних дій вимагають розробки інноваційних будівельних рішень. Традиційні методи будівництва, що використовують матеріали з високим вуглецевим слідом, стають неефективними з екологічної точки зору. Особливо актуальним є пошук альтернатив, які поєднували б швидкість монтажу, доступність матеріалів та мінімальний вплив на довкілля. Вирішення цієї проблеми потребує комплексного підходу, що враховує як технічні характеристики матеріалів, так і їх екологічну ефективність протягом усього життєвого циклу. **Мета статті** – розробка конструктивного рішення стінової панелі, що відповідатиме вимогам щодо екологічної ефективності та теплоізоляційних характеристик. **Висновки.** Запропоноване конструктивне рішення деревозалізобетонної стінової панелі, яка складається з трьох шарів: 1) внутрішнього несучого шару з перехресно-клеєної деревини; 2) зовнішнього бетонного шару на вторинному заповнювачі для захисту внутрішніх шарів від умов зовнішнього середовища та наступного оздоблення фасадів будівлі; 3) теплоізоляційного шару з матеріалів природного походження. Проведено систематизацію та аналіз характеристик теплопровідності та шкідливих викидів протягом життєвого циклу різних видів природної теплоізоляції, визначено її товщину для забезпечення необхідного опору теплопередачі стінової панелі. Надано рекомендації щодо вибору природної теплоізоляції з точки зору екологічних показників. Конструкція панелі поєднує переваги деревини, бетону на вторинному заповнювачі та біоізоляції, що робить її перспективною для швидкої відбудови зруйнованої інфраструктури з одночасним зниженням впливу будівництва на навколишнє середовище. Конструктивне рішення враховує особливості загальноприйнятих технологій виробництва та монтажу, що спрощує впровадження запропонованого рішення у практику будівництва.

Ключові слова: стінові панелі; перехресно-клеєна деревина; вторинний бетон; біоізоляція; екологічна ефективність

STRUCTURAL SOLUTION OF TIMBER-CONCRETE WALL PANEL FOR ECOLOGICAL BUILDINGS

SHEKHORKINA S.Yev.^{1*}, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
ZAKHAROV M.O.², Postgrad. Stud.

^{1*} Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (095) 021-84-44, e-mail: svitlana.shekhorkina@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7799-2250

² Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 630-03-10, e-mail: Vilenas.dir@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-6336-6884

Abstract. Problem statement. The scale of destruction caused by military actions requires the development of innovative construction solutions. Traditional construction methods that use materials with high carbon footprints are becoming environmentally unsustainable. Of particular relevance is the search for alternatives that combine rapid installation, material availability, and minimal environmental impact. Solving this problem requires a comprehensive approach that considers both the technical characteristics of materials and their environmental efficiency throughout the entire life cycle. **The purpose of the article** is the development of a wall panel structural solution that meets requirements for both environmental efficiency and thermal insulation performance. **Conclusion.** The proposed structural solution for

a timber-reinforced concrete wall panel consists of three layers: 1) an inner load-bearing layer made of cross-laminated timber; 2) an outer concrete layer with recycled aggregate, designed to protect internal layers from environmental exposure and serve as a base for building facade finishing; 3) a thermal insulation layer composed of natural bio-based materials. The study includes systematic analysis of thermal conductivity characteristics and life cycle emissions of natural insulation materials, with determination of optimal insulation thickness to achieve required thermal resistance. Recommendations are provided for selecting natural insulation materials based on environmental performance indicators. This panel design combines the advantages of timber, recycled concrete and bio-based insulation, making it particularly suitable for rapid reconstruction of damaged infrastructure while simultaneously reducing the environmental impact of construction. The structural solution incorporates conventional manufacturing and installation techniques, facilitating practical implementation in construction projects.

Keywords: wall panel; cross-laminated timber; recycled concrete; bio-based insulation; ecoefficiency

Постановка проблеми, огляд публікацій. Масштабні руйнування об'єктів житлового фонду та соціальної інфраструктури внаслідок воєнних дій обумовлюють необхідність пошуку ефективних рішень щодо відбудови. Застосування індустріального технологій збірного (модульного) будівництва з попередньо виготовлених конструкцій дозволить зменшити терміни зведення при забезпеченні відносної дешевизни [1]. Даний підхід до зведення будівель характеризується меншою кількістю технологічних операцій та будівельних відходів в порівнянні з традиційними методами [2], а також є перспективним з точки зору автоматизації виготовлення та монтажу з використанням останніх досягнень в галузі інформаційного моделювання, робототехніки та штучного інтелекту [3].

Одним із поширених елементів у збірному будівництві є стінові панелі. За конструктивним рішенням вони можуть бути одношаровими з подальшим утепленням безпосередньо на будівельному майданчику, та тришаровими, які складаються із зовнішнього та внутрішнього шарів з важкого бетону і розташованого між ними теплоізоляційного шару [4]. В якості теплоізоляції як правило використовують пінополістирол, пінопласт або мінеральну вату. Недоліком відомих конструкцій стінових панелей є низька екологічна ефективність, оскільки матеріали, які сьогодні застосовуються для їх виготовлення, характеризуються значними обсягами шкідливих викидів протягом всього життєвого циклу – від видобутку сировини до утилізації [5]. З огляду на це,

одним із напрямків удосконалення стінових панелей є розробка конструктивних рішень з підвищеними характеристиками екологічної безпеки та ресурсоефективності. При цьому з точки зору швидкого впровадження у практику будівництва доцільним є застосування усталених технологій виробництва та монтажу.

Як показав аналіз існуючих досліджень з аналогічної проблематики щодо різних типів будівельних конструкцій, перспективним є використання відновлюваних матеріалів рослинного походження, вторинної сировини, а також поєднання різних матеріалів в одній конструкції [6–8]. До таких матеріалів відносяться, наприклад, деревина та бетон на заповнювачах вторинного походження (рециклінговий бетон).

Сучасні стратегії скорочення викидів вуглекислого газу (CO₂) в будівельному секторі пов'язані із поліпшенням теплоізоляційних характеристик огорожувальних конструкцій, що забезпечить підвищення ефективності витрат на опалення та комфортні параметри мікроклімату приміщень. Вибір теплоізоляційних матеріалів має найбільший потенціал зниження викидів CO₂ протягом періоду експлуатації будівлі. Енергія, заощаджена завдяки ефективній теплоізоляції, може компенсувати енергію, витрачену в процесі її виробництва. Істотний внесок у досягнення мети нульового рівня викидів у будівельному секторі можуть забезпечити ізоляційні матеріали на основі біосировини [9]. Ці матеріали являють собою екологічно чисті альтернативи традиційним синтетичним утеплювачам і виготовляються

з відновлюваної природної сировини рослинного або тваринного походження, побічних продуктів сільськогосподарського виробництва тощо. Дані види ізоляції потенційно є біорозкладаними або придатними для повної переробки з мінімальним рівнем залишкових продуктів[10].

Таким чином, застосування в будівельних конструкціях відновлюваних матеріалів та сировини вторинного походження є ключем до майбутньої трансформації будівельної галузі в аспектах мінімізації шкоди навколишньому

середовищу та досягнення кліматичної нейтральності.

Мета роботи – розробка конструктивного рішення стінової панелі, що відповідатиме вимогам щодо екологічної ефективності та теплоізоляційних характеристик.

Виклад матеріалу. Виходячи з проведеного аналізу останніх досліджень в галузі екологічного будівництва було розроблено конструктивне рішення деревозалізобетонної стінової панелі, схематичне зображення якого приведено на рисунку 1.

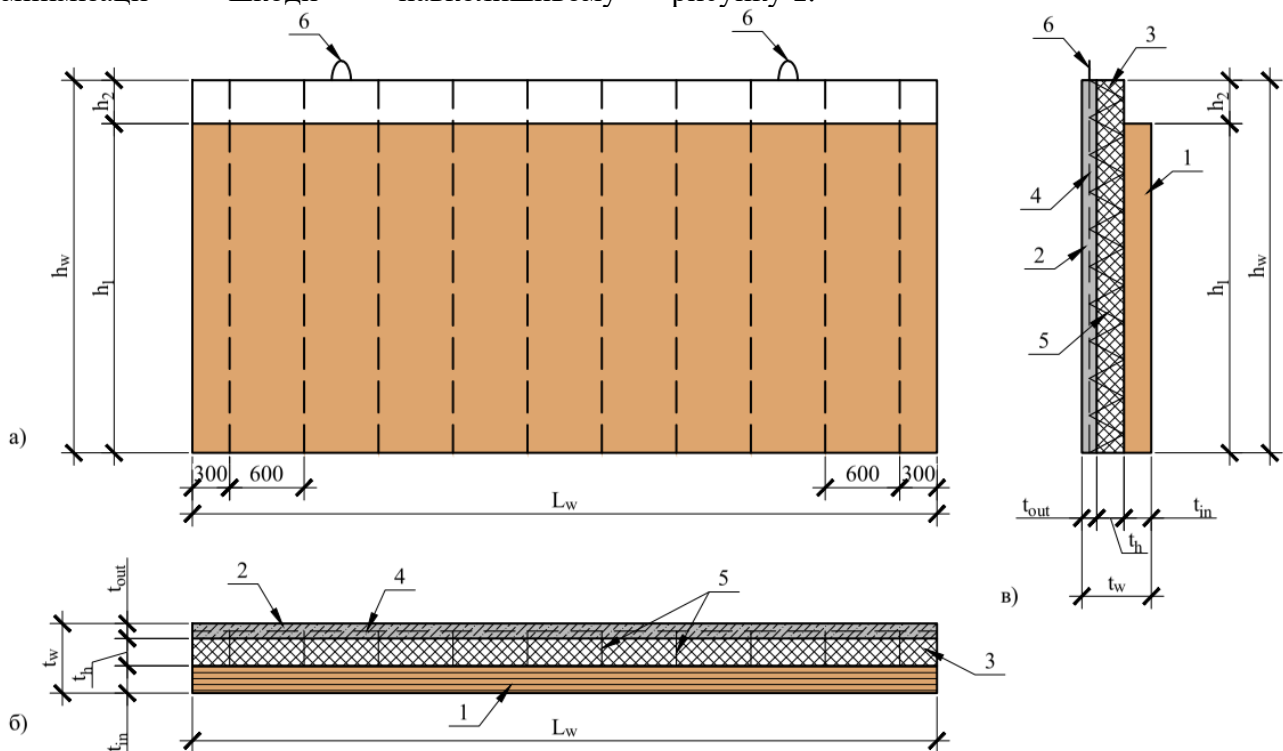


Рис. 1. Конструктивне рішення гібридної деревозалізобетонної стінової панелі: а – вид спереду; б – вид зверху; в – вид збоку; 1 – внутрішній шар з перехресно-клеєної деревини; 2 – зовнішній шар із залізобетону; 3 – теплоізоляційне заповнення; 4 – арматурна сітка; 5 – гнучкі зв'язки; 6 – монтажні петлі

Пропонована стінова панель складається з трьох елементів, що об'єднуються в єдину конструкцію:

- 1 – внутрішній несучий шар з перехресно-клеєної деревини;
- 2 – зовнішній ненесучий (фасадний) шар із бетону на вторинному заповнювачі;
- 3 – заповнення теплоізоляційним матеріалом природного походження.

Габаритні розміри стінової панелі визначаються виробничими параметрами обладнання та сортаментом виробів з

перехресно-клеєної деревини. Загалом, довжина панелі L_w не перевищує 6м.

Шар з перехресно-клеєної деревини (поз. 1, рис. 1) забезпечує сприйняття всіх навантажень, що діють на стіну, та є елементом несучої системи будівлі, на який спираються елементи перекриття. Товщина несучого шару t_{in} визначається розрахунком панелі за несучою здатністю та експлуатаційною придатністю. При визначенні товщини несучого шару слід керуватися сортаментом перехресно-клеєної

деревини за її товщиною. Зокрема, на сьогодні виготовляються 3, 5 7 та 9-шарові перехресно-клеєні панелі, мінімальна товщина становить – 60 мм, максимальна – 360 мм. Товщина приймається кратно 20–30 мм згідно технології виготовлення масивної деревини.

Шар із бетону на вторинному заповнювачі (поз. 2, рис. 1) має функцію захисту внутрішніх матеріалів (теплоізоляції та деревини) від умов зовнішнього середовища, а також слугує основою для оздоблення фасадів будівлі. Армування бетонного шару приймається конструктивно, сіткою з арматури класу A240C Ø6 мм з розміром клітинки 200x200 мм (поз. 4, рис. 1). Товщина бетонного шару t_{out} приймається мінімально можливою, виходячи з умов забезпечення захисного шару для арматури. Товщина захисного шару визначається наступним чином [11]:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}, \quad (1)$$

$$c_{min} = \max \begin{cases} c_{min,b} \\ c_{min,dur} \\ 10\text{мм} \end{cases}, \quad (2)$$

де Δc_{dev} – допустиме проектне відхилення, приймається 10 мм; $c_{min,b}$ – визначається з умов зчеплення арматури з бетоном, приймається рівним діаметру арматури ($c_{min,b} = 6$ мм); $c_{min,dur}$ – визначається в залежності від умов експлуатації (наприклад, для конструкції класу S4 в умовах середовища класу впливу XC3 «Помірно вологе» $c_{min,dur} = 25$ мм).

Таким чином, при $c_{min} = 25$ мм, необхідна товщина захисного шару $c_{nom} = 35$ мм, а товщина залізобетонного елемента панелі становитиме $t_{out} = 2c_{nom} = 70$ мм.

З'єднання зовнішнього та внутрішнього шарів панелі виконується за допомогою гнучких зав'язків (поз. 5, рис. 1), які виготовляються із гладкої стержневої сталі. Кріплення гнучких зав'язків до дерев'яного шару забезпечується через сталеві кутники на саморізах, а до залізобетонного шару – шляхом зв'язування із арматурною сіткою. Крок розташування гнучких зв'язків

становить 600 мм, що визначається типорозмірами рулонної або плитної теплоізоляції.

Загальна висота стінової панелі h_w визначається необхідною висотою приміщення. При цьому висота внутрішнього несучого шару h_1 залежить від сортаменту перехресно-клеєної деревини, проте не має перевищувати 3,5 м. Для обпирання елементів перекриття будівлі в стіновій панелі передбачено опорну ділянку на внутрішньому елементі висотою h_2 , величина якої залежить від загальної товщини несучих конструкцій перекриття і приймається в межах $h_2 = 200\text{--}350$ мм.

Для захвату стінової панелі при монтажі передбачаються монтажні петлі (поз. 6, рис. 1). Міцність монтажних петель слід перевіряти розрахунком на навантаження, що відповідають стадії монтажу.

Товщина теплоізоляційного шару (поз. 3, рис. 1) t_h приймається за теплотехнічним розрахунком, виходячи з мінімально допустимого значення опору теплопередачі стінової панелі для заданого регіону будівництва з урахуванням характеристик теплопровідності матеріалів.

Як теплоізоляція деревозалізобетонної панелі пропонується використовувати натуральну ізоляцію, що виготовляється з сировини природного походження. Виходячи з доступних варіантів, для порівняльного аналізу було обрано декілька видів біоізоляції [12–15]:

- рослинного походження з конопляних, лляних та деревинних волокон, газонної трави та солом'яної стружки;

- тваринного походження з овечої вовни повторного використання;

- вторинного походження з відходів паперової промисловості (целюлоза).

Розрахунок необхідної товщини шару теплоізоляції деревозалізобетонної стінової панелі проводився, враховуючи сучасні норми щодо опору теплопередачі огорожувальних конструкцій [16]:

$$R_{\Sigma pr} \geq R_{qmin}, \quad (3)$$

де $R_{\Sigma pr}$ – опір теплопередачі огорожувальної конструкції; R_{qmin} –

мінімально допустиме значення опору теплопередачі огорожувальної конструкції.

Мінімально допустимі значення опорів теплопередачі непрозорих огорожувальних конструкцій залежать від виду огорожувальної конструкції та температурної зони експлуатації будинку. Розрахунок теплоізоляції виконуємо для температурної зони II ($R_{qmin} = 4.0 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$).

Приведений опір теплопередачі зовнішніх стінових огорожувальних конструкцій визначається згідно з [166]:

$$R_{\Sigma np} = \frac{1}{\alpha_6} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_{ip}} + \frac{1}{\alpha_3}, \quad (4)$$

де α_6 – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні стінової конструкції; α_3 – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні стінової конструкції; δ_{ip} – товщина i -го шару огорожувальної конструкції; λ_{ip} – теплопровідність матеріалу i -го шару огорожувальної конструкції в розрахункових умовах експлуатації.

Для зовнішніх стін коефіцієнти тепловіддачі становлять $\alpha_6 = 8,7 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$, $\alpha_3 = 23 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$. Відповідно до даних [15] теплопровідність перехресно-клеєної деревини становить $\lambda_{in} = 0,12 \text{ Вт/(м·К)}$. Для розрахунку теплоізоляції приймаємо товщину дерев'яного шару 120 мм. Коефіцієнт теплопровідності бетону $\lambda_{out} = 2,04 \text{ Вт/(м·К)}$. Прийнята товщина бетонного шару – 70 мм.

Виходячи з вищенаведеного, необхідна товщина шару теплоізоляції стінової панелі становитиме:

$$t_{in} = 2.807 \lambda_{in}. \quad (5)$$

Зведені дані про характеристики теплопровідності, шкідливих викидів протягом життєвого циклу (вуглецевий слід) та результати визначення необхідної товщини теплоізоляції природного походження для запропонованого конструктивного рішення стінової панелі приведені в таблиці.

Таблиця

Зведені дані про характеристики та результати визначення товщини теплоізоляції природного походження для деревозалізобетонної стінової панелі

Найменування	Питома вага, кг/м ³	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	Вуглецевий слід, кг CO ₂ екв/кг	Розрахункова товщина теплоізоляції, мм
Конопляні мати	30–42	0,038	-2,11	107
Солом'яна ізоляція	90–100	0,041	-16,9	115
Лляна рулонна ізоляція	20–30	0,038	-1,27	107
Целюлозна ізоляція	28–65	0,037	-1,21	104
Деревинна волокниста ізоляція	35–38	0,041	-2,88	115
Вовняні мати	18–20	0,038	6,58	107
Трав'яні мати	30–80	0,04	-8,04	112

Виходячи із отриманих результатів та з урахуванням даних виробників щодо товщин продукції, фактична товщина теплоізоляції природного походження для деревозалізобетонної стінової панелі приймається $t_{in} = 120 \text{ мм}$. З урахуванням екологічних характеристик теплоізоляції, що приведені в таблиці, найбільш доцільним з точки зору мінімізації впливу на навколишнє середовище є ізоляційні матеріали з солом та газонної трави.

Висновки

Запропоноване конструктивне рішення деревозалізобетонної стінової панелі, яка складається з внутрішнього несучого шару з перехресно-клеєної деревини, зовнішнього бетонного шару на вторинному заповнювачі та шару біоізоляції, дозволяє суттєво знизити шкідливий вплив на навколишнє середовище при забезпеченні вимог щодо енергоефективності будівель.

Конструкція стінової панелі поєднує переваги деревини, бетону на вторинному заповнювачі та біоізоляції, що робить її перспективною для швидкої відбудови зруйнованої інфраструктури з одночасним зниженням впливу будівництва на

навколишнє середовище. Конструктивне рішення враховує особливості загальноприйнятих технологій виробництва та монтажу, що спрощує впровадження пропонуваного рішення у практику будівництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Lopez D., Froese T. M. Analysis of Costs and Benefits of Panelized and Modular Prefabricated Homes. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 145. Pp. 1291–1297. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.166> (дата звернення: 16.06.2025).
2. Zohourian M. et al. Modular Construction : A Comprehensive Review. *Buildings*. 2025. Vol. 15, № 12. P. 2020. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings15122020> (дата звернення: 16.06.2025).
3. Rangasamy V., Yang J.-B. The convergence of BIM, AI and IoT : Reshaping the future of prefabricated construction. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 84. P. 108606. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108606> (дата звернення: 16.06.2025).
4. Kovalsky V., Abramovych V. Analysis of existing wall panels and development of own structural solution for the construction of energy efficient multiplum buildings. *Modern technology, materials and design in construction*. 2020. Vol. 27, № 2. Pp. 46–51. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-2-46-51> (дата звернення: 16.06.2025).
5. Moura B. et al. Eco-Efficiency of Concrete Sandwich Panels with Different Insulation Core Materials. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, № 4. P. 1687. URL: <https://doi.org/10.3390/su17041687> (дата звернення: 16.06.2025).
6. Li Z., Tsavdaridis K. D., Katenbayeva A. Reusable Timber Modular Buildings, Material Circularity and Automation : The role of inter-locking connections. *Journal of Building Engineering*. 2024. P. 110965. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110965> (дата звернення: 16.06.2025).
7. Revilla-Cuesta V. et al. Using recycled aggregate concrete at a precast-concrete plant : a multi-criteria company-oriented feasibility study. *Journal of Cleaner Production*. 2022. P. 133873. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133873> (дата звернення: 16.06.2025).
8. Pastori S., Sergio Mazzucchelli E., Wallhagen M. Hybrid timber-based structures: A state of the art review. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 359. pp. 129505. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129505> (дата звернення: 16.06.2025).
9. Cosentino L., Fernandes J., Mateus R. A Review of Natural Bio-Based Insulation Materials. *Energies*. 2023. Vol. 16. no. 12. pp. 4676. URL: <https://doi.org/10.3390/en16124676> (date of access: 16.06.2025).
10. Cascione V. et al. Evaluating environmental impacts of bio-based insulation materials through scenario-based and dynamic life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02425-4> (дата звернення: 16.06.2025).
11. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2 : Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings. [Чинний від 23.12.2004]. European Committee for Standardization, 2004. 230 p.
12. Seile A., Spurina E., Sinka M. Reducing Global Warming Potential Impact of Bio-Based Composites Based of LCA. *Fibers*. 2022. Vol. 10, № 9. P. 79. URL: <https://doi.org/10.3390/fib10090079> (дата звернення: 17.06.2025).
13. Cosentino L., Fernandes J., Mateus R. A Review of Natural Bio-Based Insulation Materials. *Energies*. 2023. Vol. 16, № 12. P. 4676. URL: <https://doi.org/10.3390/en16124676> (дата звернення: 17.06.2025).
14. Kymäläinen H.-R., Sjöberg A.-M. Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. *Building and Environment*. 2008. Vol. 43, № 7. Pp. 1261–1269. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.03.006> (дата звернення: 17.06.2025).
15. EPD International. *EPD International*. URL: <https://www.environdec.com/> (дата звернення: 17.06.2025).
16. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоєфективність будівель. [Чинний від 2022-09-01]. Вид. офіц. Київ : Мінірегіон України, 2022. 27 с.

REFERENCES

1. Lopez D. and Froese T. M. Analysis of Costs and Benefits of Panelized and Modular Prefabricated Homes. *Procedia Engineering*. 2016, vol. 145, pp. 1291–1297. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.166> (date of application : 16.06.2025).
2. Zohourian M. et al. Modular Construction : A Comprehensive Review. *Buildings*. 2025, vol. 15, no. 12, p. 2020. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings15122020> (date of application : 16.06.2025).
3. Rangasamy V. and Yang J.-B. The convergence of BIM, AI and IoT : Reshaping the future of prefabricated construction. *Journal of Building Engineering*. 2024, vol. 84, p. 108606. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108606> (date of application : 16.06.2025).

4. Kovalsky V. and Abramovych V. Analysis of existing wall panels and development of own structural solution for the construction of energy efficient multiplum buildings. *Modern Technology, Materials and Design in Construction*. 2020, vol. 27, no. 2, pp. 46–51. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-2-46-51> (date of application : 16.06.2025).
5. Moura B. et al. Eco-Efficiency of Concrete Sandwich Panels with Different Insulation Core Materials. *Sustainability*. 2025, vol. 17, no. 4, p. 1687. URL: <https://doi.org/10.3390/su17041687> (date of application : 16.06.2025).
6. Li Z., Tsavdaridis K.D. and Katenbayeva A. Reusable Timber Modular Buildings, Material Circularity and Automation : The role of inter-locking connections. *Journal of Building Engineering*. 2024, p. 110965. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110965> (date of application : 16.06.2025).
7. Revilla-Cuesta V. et al. Using recycled aggregate concrete at a precast-concrete plant : a multi-criteria company-oriented feasibility study. *Journal of Cleaner Production*. 2022, p. 133873. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133873> (date of application : 16.06.2025).
8. Pastori S., Sergio Mazzucchelli E. and Wallhagen M. Hybrid timber-based structures : a state of the art review. *Construction and Building Materials*. 2022, vol. 359, p. 129505. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129505> (date of application : 16.06.2025).
9. Cosentino L., Fernandes J. and Mateus R. A Review of Natural Bio-Based Insulation Materials. *Energies*. 2023, vol. 16, no. 12, p. 4676. URL: <https://doi.org/10.3390/en16124676> (date of access : 16.06.2025).
10. Cascione V. et al. Evaluating environmental impacts of bio-based insulation materials through scenario-based and dynamic life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02425-4> (date of application : 16.06.2025).
11. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2 : Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings. Valid 23.12.2004. European Committee for Standartization, 2004, 230 p.
12. Seile A., Spurina E. and Sinka M. Reducing Global Warming Potential Impact of Bio-Based Composites Based of LCA. *Fibers*. 2022, vol. 10, no. 9, p. 79. URL: <https://doi.org/10.3390/fib10090079> (date of application : 17.06.2025).
13. Cosentino L., Fernandes J. and Mateus R. A Review of Natural Bio-Based Insulation Materials. *Energies*. 2023, vol. 16, no. 12, p. 4676. URL: <https://doi.org/10.3390/en16124676> (date of application : 17.06.2025).
14. Kymäläinen H.-R. and Sjöberg A.-M. Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. *Building and Environment*. 2008, vol. 43, no. 7, pp. 1261–1269. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.03.006> (date of application : 17.06.2025).
15. EPD International. EPD International. URL: <https://www.environded.com/> (date of application : 17.06.2025).
16. DBN V.2.6-3:2021. *Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel. Chynnyi vid 2022-09-01. Vyd. ofits.* [DBN V.2.6-3:2021. Thermal insulation and energy efficiency of buildings. Valid from 2022-09-01. Official edition]. Kyiv : Minregion of Ukraine, 2022, 27 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 18.11.2025.