

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ПРОЄКТУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Лаврінєнко Л. І.¹, Афанасєєва Л. В.²

^{1,2}Київський національний університет будівництва і архітектури

пр. Повітряних Сил, 31, м. Київ, 03037, Україна

E-mail: ¹ludmila.lavrinenko@gmail.com

²afanasieva2709@gmail.com

Анотація. Показано, що будівельна галузь чинить суттєвий антропогенний тиск на довкілля та вимагає ширшого використання поновлюваних матеріалів, які зменшують виснаження ресурсів та вирішують низку енергетичних та екологічних проблем. Велика увага приділяється екологічним аспектам будівництва протягом усіх етапів життєвого циклу будівлі.

Ключові слова: екологічні характеристики, вуглецевий слід, бетон, дерев'яне будівництво, енергоефективність.

Будівництво є однією з галузей діяльності, що призводить до найбільш значних антропогенної впливів на навколишнє середовище. Такі впливи є результатом видобутку, переробки та виробництва будівельних матеріалів та компонентів. Це призводить до виснаження сировинних, енергетичних і водних ресурсів; втрати місць проживання; забруднення води та ґрунту; зниження якості повітря; та зміни клімату. Виробництво деяких найпоширеніших будівельних матеріалів, таких як бетон, сталь, скло та алюміній, викликає найбільше занепокоєння у спеціалістів [1]. В науковій спільноті зростає усвідомлення необхідності ширшого використання поновлюваних матеріалів, які зменшують виснаження ресурсів та вирішують низку енергетичних та екологічних проблем [2].

На будівельну галузь (будівництво та експлуатація) припадає близько 40 % світового споживання енергії, 25 % світового споживання води та близько 30 % викидів глобальних парникових газів [1]. Ці потреби в ресурсах і викиди призводять до негативного впливу на довкілля, а велика кількість зусиль спрямовується на поліпшення стану навколишнього середовища. Значні зусилля докладаються для зменшення впливу на навколишнє середовище в сфері експлуатації будівель. Проте менше уваги приділяється впливу на навколишнє середовище, пов'язаного з виробництвом матеріалів та будівельною діяльністю. Виробничі процеси традиційних матеріалів, що використовуються в будівництві, таких як бетон, сталь та скло, щонайбільше пов'язані із споживанням сировини, енергії, води та викидами парникових газів. Напри-

клад, при виробництві цементу утворюється до 3 % світових викидів CO₂, що відносяться до діяльності людини [2].

Було досягнуто значних покращень щодо екологічних характеристик таких матеріалів, як бетон і сталь. Наприклад, заміна певної кількості сировини, що використовується для виробництва бетону, переробленим матеріалом знижує його вплив на навколишнє середовище.

Для порівняння в таблиці 1 наведені деякі усереднені показники вуглецевого сліду найпоширеніших будівельних матеріалів та конструкцій. Сучасні довідкові ресурси надають значення та виконують розрахунки еквівалентного викиду парникових газів та енерговитрат з урахуванням всіх етапів життєвого циклу будівлі включно з виробництвом, транспортуванням, монтажем, експлуатацією та утилізацією.

Вуглецевий слід – це загальна кількість парникових газів, що викидаються в атмосферу в процесі виробництва, використання та утилізації матеріалів чи продукції. У будівництві вуглецевий слід різних матеріалів є важливим аспектом, оскільки ця галузь є одним із найбільших джерел викидів CO₂. Важливо враховувати вуглецевий слід кожного будівельного матеріалу, щоб знизити вплив на клімат та допомогти у боротьбі зі зміною клімату.

1. **Бетон** – один з найпоширеніших будівельних матеріалів у світі. Однак його виробництво спричиняє значну кількість викидів вуглекислого газу, особливо через використання цементу, основного компонента бетону. Виробництво цементу потребує великих енерговитрат і пов'язане з викидами CO₂ через термічне розкладання вапняку. За даними деяких досліджень, виробництво 1 тонни бетону припадає до 0,9 т CO₂. Це робить бетон одним з найвуглецевіших матеріалів у будівництві. Втім, існують засоби зниження вуглецевого сліду бетону, такі як використання альтернативних матеріалів для цементу (наприклад, повітряного вапняку або кальцинованих глин), додавання до складу бетону різних перероблених матеріалів (наприклад, склотари або відходів залізної руди) та перехід на більш енергоефективні технології виробництва.

Таблиця 1

**Орієнтовні показники вуглецевого сліду
для матеріалів та деяких видів конструкцій**

Матеріал	Вуглецевий слід*	Конструкція	Вуглецевий слід*
Сталь	0,7 – 3,0 кг CO ₂ /кг	Залізобетонна плита перекриття	150–350 кг CO ₂ /м ³
Бетон	0,08 – 0,9 кг CO ₂ /кг	Колони монолітні	200–400 кг CO ₂ /м ³
Цемент	0,8 – 2,0 кг	Фундамент стрічковий	200–350 кг

	CO ₂ e/кг		CO ₂ e/м ³
Деревина суцільна**	-0,5 кг CO ₂ e/кг	Цегляна стіна (38 см)	120–200 кг CO ₂ e/м ²
Деревина клеєна**	-0,6 ... +0,5 кг CO ₂ e/кг	Каркасна стіна дерев'яна	20–60 кг CO ₂ e/м ²
Керамічна цегла	0,25 – 1,0 кг CO ₂ e/кг	Стіна з газобетону (300–400 мм)	60–140 кг CO ₂ e/м ²
Силікатна цегла	0,07 – 0,15 кг CO ₂ e/кг	Металочерепиця	8–15кг CO ₂ e/м ²
Блоки газобетону	0,1 кг CO ₂ e/кг	Бітумна черепиця	4–8 кг CO ₂ e/м ²
Мінеральна вата	1,0 – 1,5 кг CO ₂ e/кг	Керамічна черепиця	12–20 кг CO ₂ e/м ²
Пінополістирол (EPS/XPS)	1,5 – 3 кг CO ₂ e/кг		
ППУ (спрей-піна)	3–8 кг CO ₂ e/кг		
Целюлозна вата	0,1 – 0,3 кг CO ₂ e/кг		
Будівельне скло	0,7 – 1,5 кг CO ₂ e/кг		
Склопакет	2,0–4,0 кг CO ₂ e/кг		
*Вуглецевий слід еквівалентний CO ₂ e включає вплив в т.ч. інших парникових газів; **деревина може мати негативний вуглецевий слід через збереження CO ₂ , поглинутого деревом			

2. **Сталь.** Виробництво сталі також пов'язане із високими викидами CO₂. Сталь виробляється у доменних печах з використанням коксу та вугілля, що сприяє емісії вуглекислого газу. Однак, на відміну від бетону, сталь має відмінні механічні властивості та довговічність, що може компенсувати її високий вуглецевий слід у довгостроковій перспективі. Виробництво 1 т сталі може призвести до викиду до 1,8 т CO₂, що робить цей матеріал ще більш вуглецевим, ніж бетон. Важливо відзначити, що вуглецевий слід можна значно знизити з використанням низьковуглецевих технологій, таких як водневе виробництво або переробка металобрухту.

3. **Деревина,** на відміну від бетону і сталі, є більш екологічним матеріалом, оскільки дерева, що ростуть, поглинають вуглекислий газ з атмосфери, тим самим допомагаючи в боротьбі зі зміною клімату. Більше того, деревина є відновлюваним ресурсом, якщо його видобуток здійснюється у рамках сталого лісівництва. Хоча заготівля деревини та її обробка вимагають енергії, вуглецевий слід деревини значно нижчий

порівняно з бетоном та сталлю. Вуглецевий слід деревини з розрахунку на 1 м³ матеріалу становить близько 0,1–0,3 т СО₂. Важливо, що деревина продовжує зберігати вуглець навіть після використання у будівництві, що робить її вуглецево-нейтральним матеріалом, якщо вона не розкладається або не спалюється. Крім того, деревина має хороші теплоізоляційні властивості, що знижує потребу в опаленні та охолодженні будівель, а отже, сприяє скороченню викидів парникових газів у майбутньому.

4. **Цегла.** Виробництво цегли потребує значних енерговитрат, оскільки процес їх випалу здійснюється за високих температур. Втім, цегла залишається досить поширеним матеріалом завдяки своїй довговічності та здатності до терморегуляції. Для виробництва 1 тонни цегли викидається близько 0,3–0,5 т СО₂. Це робить цеглу менш вуглецевою, ніж бетон і сталь, але все одно робить певний внесок у загальний вуглецевий слід будівельних матеріалів.

5. **Скло.** Виробництво скла пов'язане з плавленням піску та інших компонентів за високих температур, що потребує багато енергії. Однак, скло є одним із матеріалів, які можна переробляти нескінченно, що значно знижує його вуглецевий слід у довгостроковій перспективі.

Вуглецевий слід скла: для виробництва 1 тонн скла викидається близько 0,5–0,7 т СО₂. Важливо відзначити, що переробка скла знижує викиди СО₂, оскільки потребує менше енергії, ніж виробництво нового скла.

У сучасному будівництві вуглецевий слід матеріалів є важливим фактором, який необхідно враховувати під час виборів будівельних компонентів. Деревина, завдяки своїм відновлюваним і вуглецево нейтральним властивостям, є одним із екологічно чистих матеріалів. Однак для зниження вуглецевого сліду будівельних об'єктів необхідно прагнути комбінованого підходу, що використовує більш стійкі матеріали, такі як перероблені компоненти або інноваційні технології. У той час як бетон, сталь та цегла залишаються популярними матеріалами, важливо розвивати та впроваджувати екологічні альтернативи, щоб мінімізувати їх вплив на навколишнє середовище.

Матеріали на основі целюлози, такі як деревина, є альтернативними при використанні у будівництві. Хоча деревина використовувалася у будівництві протягом багатьох століть, останнім часом спостерігається відродження використання деревини як заміна традиційних бетонних і сталевих конструкцій, особливо у відповідь на екологічні виклики.

Масове дерев'яне будівництво розглядається як потенційно життєздатна альтернатива для вирішення цих проблем, що водночас відповідає вимогам до сучасних будівель, таким як збільшення прольотів і висот споруд, швидкості їх будівництва та забезпечення вогнестій-

кості. Багато досліджень присвячені характеристикам цього матеріалу та вогнестійкості складних елементів та вузлів [3,4]. З точки зору екологічних вимог використання конструктивних форм дерев'яних конструкцій має вирішальне значення, оскільки це вважається однією основних переваг деревини.

Дослідження [5] встановлює основу оцінки екологічних переваг дерев'яного будівництва. Його ціль полягає в тому, щоб забезпечити оптимізований підхід, який дозволяє ключовим зацікавленим сторонам будівельного проекту оцінити потенціал деревини для забезпечення екологічних переваг порівняно з традиційними методами будівництва в конкретному будівельному проекті. У наукових та практичних роботах в Україні широко застосовують інструмент LCA на основі ISO 14040/14044 Екологічна декларація продукту для аналізу будівель і матеріалів. Цей документ орієнтований на повний життєвий цикл споруди та реальну екологію.

Україна як держава з великими лісовими ресурсами приділяє значну увагу до екологічної безпеки у будівництві та, особливим чином, до застосування деревини в будівельних конструкціях. Екологічні стандарти і регламенти у цій галузі мають за мету зменшення впливів на навколишнє середовище, підвищення енергоефективності та охорону здоров'я людей.

За основу екологічного регулювання використання деревини є законодавство та Лісовий кодекс України, якими передбачається стійке лісовикористання, контроль за незаконним вирубуванням лісів та програми відновлення лісів. Використання деревини підтримує місцеву економіку, створюючи робочі місця в лісовій та деревообробній промисловості. Це сприяє розвитку стійких економік, де враховуються екологічні, соціальні та економічні фактори.

До того ж, переробка деревини та виробництво виробів з неї потребує менших витрат на транспортування, що зменшує викиди CO₂, пов'язані з логістикою. Чинні будівельні норми та правила визначають вимоги до екологічної безпеки під час використання деревини. Ці норми регулюють як якість самих будівельних матеріалів, так і їх вплив на довкілля у процесі експлуатації. Одним із способів сертифікації є отримання «зеленого» сертифікату, що підтверджує відповідність будівлі міжнародним стандартам екологічної безпеки.

У цій галузі визначальними є наступні аспекти.

Сертифікація деревини. Одним із основних стандартів деревини є сертифікація деревини за міжнародною системою FSC (Forest Stewardship Council) та PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification). Ці сертифікати гарантують, що деревина, яка використо-

вується у будівництві, надходить з лісів, керованих відповідно до екологічних, соціальних та економічних стандартів. Це включає в себе:

- збереження біологічної різноманітності;
- запобігання вирубці лісів, які не відновлюються;
- дотримання прав місцевих спільнот та корінних народів.

Вимоги до екологічно чистих матеріалів. Згідно з екологічними стандартами, при виготовленні дерев'яних конструкцій мають використовуватися сертифіковані матеріали, що відповідають міжнародним екологічним вимогам.

Чинні в Україні норми проектування, що регулюють застосування дерев'яних конструкцій, зокрема ДБН В.2.6-161:2017 «Дерев'яні конструкції. Основні положення», ДБН В.2.2-15:2019 «Будинки і споруди. Житлові будинки. Основні положення», визначають вимоги до проектування, виготовлення та монтажу дерев'яних конструкцій. В Україні існує тенденція до використання екологічно чистих матеріалів, тому будівельні стандарти включають вимоги до використання природних антисептиків та засобів обробки деревини, що мінімізують вплив на здоров'я людей та навколишнє середовище (наприклад, обробка деревини природними оліями, антисептиками на водній основі та іншими безпечними речовинами). Використання екологічно чистих антисептиків та захисних покриттів допомагає запобігти забрудненню екосистем та гарантує довговічність дерев'яних конструкцій.

Існують міжнародні екологічні стандарти для обробки деревини, які регулюють використання хімічних засобів та їх вплив на довкілля. Серед них: EN 335 – класифікація деревини за стійкістю до впливу біологічних факторів, таких як грибки та комахи, EN 350 – стандарти щодо довговічності та класифікації деревних матеріалів за їх термінами служби у різних кліматичних умовах.

Все частіше в Україні в будівництві дерев'яних будівель використовуються екологічно чисті покриття та оздоблювальні матеріали. Наприклад, для обробки фасадів або внутрішнього оздоблення застосовуються екологічно безпечні лаки, фарби та покриття на водній основі, що сприяє покращенню екологічних умов експлуатації.

Енергетична ефективність. Деревина – ефективний утеплювач, який може істотно знизити потребу в енергоємних опалювальних системах. У зв'язку з цим багато уваги приділяється стандартизації теплотехнічних характеристик дерев'яних конструкцій. У Європі для цього використовується низка нормативних документів:

- EN ISO 13789 – стандарт, що регулює розрахунок тепловтрат через будівельні елементи, у тому числі через дерев'яні конструкції;

– Passive House Standard – стандарт для енергоефективних будівель, який розглядає деревину як основний будівельний матеріал.

Ці стандарти сприяють підвищенню енергоефективності будівель та зниженню їх впливу на кліматичні зміни. Будівництво дерев'яних будинків в Україні стає все популярнішим завдяки високій теплоізоляції деревини. Відповідно до будівельних норм України ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель» дерев'яні конструкції повинні забезпечувати необхідні теплоізоляційні властивості та мінімізувати тепловтрати, що сприяє зменшенню вуглецевого сліду.

Використання переробленої деревини і утилізація відходів.

Одним з найважливіших принципів сталого будівництва є мінімізація відходів та шкідливих викидів, а також використання матеріалів, які можна переробити. Закони та стандарти, зокрема Закон України про охорону навколишнього середовища, встановлюють вимоги до скорочення викидів забруднюючих речовин у повітря та водні ресурси під час виробництва та обробки деревних матеріалів.

У рамках підвищення екологічності будівництва на території України активно розвиваються технології переробки деревини. Перероблена деревина (наприклад, OSB, фанера, ДСП) використовується як альтернатива первинній сировині, що знижує навантаження на лісові ресурси. Процес переробки деревини включає різні етапи, в т. ч. – повторне використання старих дерев'яних конструкцій або переробку деревних відходів в паливо і будівельні матеріали. Це дозволяє значно скоротити кількість відходів та зробити використання деревини більш циклічним.

У зв'язку з цим встановлені європейські стандарти, що регулюють збір, переробку та повторне використання деревних відходів:

- EN 14081 – стандарт, що регулює використання деревини, отриманої з перероблених матеріалів, як будівельні елементи;
- CEN/TC 338 – стандарти щодо деревних матеріалів, отриманих із вторинних джерел.

Одним з актуальних питань є правильна утилізація відходів деревини, що утворюються під час будівництва та експлуатації дерев'яних конструкцій. В Україні існує низка стандартів, що регулюють переробку деревних відходів, включаючи використання їх як паливо (пелети, брикети) або переробку в інші будівельні матеріали. Важливо, щоб цей процес був екологічно безпечним і не завдавав шкоди довкіллю.

Екологічні стандарти України у сфері деревини та дерев'яних конструкцій спрямовані на покращення якості життя, збереження природних ресурсів та мінімізацію негативного впливу на екологію. Це потребує комплексного підходу, включаючи стійке лісокористування,

якісну переробку деревних відходів, впровадження інноваційних технологій та використання екологічно чистих матеріалів. Українські будівельні та екологічні стандарти допомагають підтримувати баланс між розвитком економіки та збереженням природи, роблячи дерев'яні конструкції більш популярними та безпечними для навколишнього середовища. Важливо зазначити, що в Україні активно розвивається екологічна свідомість, і будівельні компанії переважно орієнтуються на міжнародні екологічні стандарти, зокрема щодо використання сертифікованої деревини та екологічно чистих матеріалів.

Список використаних джерел

1. Gustavsson, L., & Sathre, R.(2006). Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials. *Building and Environment*, 41, 940–951.

2 Crawford, R., Bartak, E., Stephan, A., & Jensen, C. (2016) Evaluating the life cycle energy benefits of energy efficiency regulations for buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, 435–451.

3. Nekora, V., Sidnei, S., Shnal, T., Nekora, O., Lavrinenko, L., & Pozdieiev, S.(2021). Thermal effect of a fire on a steel beam with corrugated wall with fireproof mineral-wool cladding. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 113, 24–32.

4. Лавріненко Л., Афанасьєва Л. Деякі аспекти проектування будівельних конструкцій відповідно до вимог вогнестійкості. Зб. пр. XIX Міжнар. конф. «Сучасні досягнення в науці та освіті», Ізраїль, Нетанія, 2024, с. 125–130.

5. Robert H., Crawforda, X., & Cadorela, A.(2017). Framework for assessing the environmental benefits of mass timber construction. *Primosten, Croatia. Procedia Engineering*, 196, 838–846.