



Co-funded by the
European Union

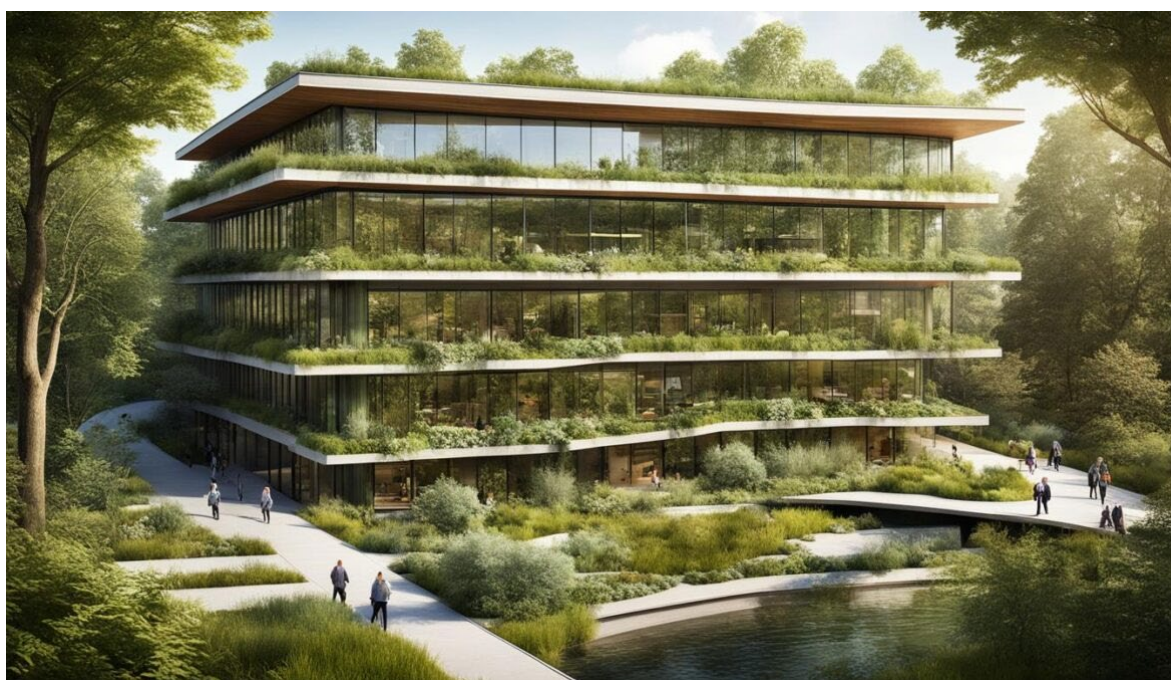
The **Bridge**
IM

architecture
engineering
construction



ВПЛИВ БУДІВЕЛЬ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ ПРОТЯГОМ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК



2025

УДК 69:502/504:620.92:004.9(075.8)

В 80

Рекомендовано до видання Вченою радою ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» (Протокол №3 від 23.10.2025 р.)

Авторський колектив:

Микола Савицький, проректор з науково-педагогічної роботи, міжнародної діяльності та інноваційного розвитку Українського державного університету науки і технологій (УДУНТ), д.т.н., професор; **Світлана Шехоркіна**, професор кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій УДУНТ, д.т.н., професор; **Марина Бордун**, доцент кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій УДУНТ, доктор філософії, доцент; **Артем Сопільняк**, завідувач кафедри нарисної геометрії та графіки УДУНТ, к.т.н., доцент; **Тетяна Нікіфорова**, декан будівельного факультету УДУНТ, д.т.н., професор; **Марина Бабенко**, старший науковий співробітник науково-дослідної групи при кафедрі залізобетонних і кам'яних конструкцій, к.т.н.; **Зінкевич Оксана**, доцент кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій УДУНТ, к.т.н., доцент.

Рецензенти:

Назаренко І. І., д-р техн. наук, професор, президент Академії будівництва України

Данішевський В.В., д-р техн. наук, професор, директор ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Українського державного університету науки і технологій

Вплив будівель на навколишнє середовище протягом життєвого циклу:

В 80

навчальний посібник / М. Савицький, С. Шехоркіна, М. Бордун А. Сопільняк, Т. Нікіфорова, М. Бабенко, О. Зінкевич. – Дніпро : Український державний університет науки і технологій, 2025. – 154 с.

ISBN_978-617-8314-83-5

У навчальному посібнику розглянуто сучасні підходи до оцінки екологічного впливу будівель протягом їх життєвого циклу. Представлено аналіз глобальних екологічних викликів та міжнародних програм і стратегій їх подолання, розкрито роль будівельної галузі у зменшенні вуглецевого сліду. Висвітлено основні етапи життєвого циклу будівель та методи оцінки впливу будівель на навколишнє середовище на кожному етапі, нормативно-правову базу, особливості використання екологічних матеріалів, стандарти екологічної сертифікації (LEED, BREEAM, DGNB) та практичні приклади їх упровадження. Окрему увагу приділено BIM-інтегрованим технологіям аналізу життєвого циклу та цифровим інструментам OneClickLCA для моделювання приєднаних викидів. Посібник призначений для здобувачів вищої освіти будівельних і архітектурних спеціальностей, науковців та фахівців у галузі архітектури, будівництва та виробництва будівельних матеріалів.

Навчальний посібник підготовлено в рамках виконання Міжнародного проекту за програмою 101127884 — The Bridge — ERASMUS-EDU-2023-CBHE «Подолання розриву між університетом і промисловістю: інноваційна магістерська навчальна програма, що підтримує розвиток зелених робочих місць і цифрових навичок в українському будівельному секторі»

Проект співфінансується Європейським Союзом, проте висловлені погляди та думки належать лише авторам цього проєкту і не обов'язково відображають погляди Європейського Союзу чи Європейського виконавчого агентства з питань освіти та культури. Ні Європейський Союз, ні грантодавець не можуть нести за них відповідальність.

УДК 69:502/504:620.92:004.9(075.8)

© Український державний університет науки і технологій, ННІ ПДАБА, 2025

ЗМІСТ

ЗМІСТ	3
ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. ГЛОБАЛЬНІ ЕКОЛОГІЧНІ ВИКЛИКИ ТА МІЖНАРОДНІ ПІДХОДИ ДО ЇХ ПОДОЛАННЯ.....	6
1.1. Екологічні глобальні загрози	6
1.2. Міжнародні стратегії та програми подолання екологічних загроз	13
1.3. Вуглецевий слід. Роль будівельної галузі у зменшенні вуглецевого сліду	27
РОЗДІЛ 2. ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ БУДІВЕЛЬ І МЕТОДИ ЙОГО ОЦІНКИ	33
2.1. Основні етапи життєвого циклу будівель.....	33
2.2. Оцінка життєвого циклу.....	39
2.3. Програмне забезпечення та бази даних для аналізу життєвого циклу будівель.....	46
2.4. Системи екологічної сертифікації будівельних об'єктів.....	54
РОЗДІЛ 3. СУЧАСНІ ЕКОЛОГІЧНІ БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ	65
3.1. Екологічні матеріали для несучих конструкцій.....	65
3.2. Ефективні екологічні теплоізоляційні матеріали.....	75
3.3. Стратегії поводження з будівельними відходами та матеріалами.....	81
3.5. Бази даних екологічних параметрів будівельної продукції і процесів.....	95
РОЗДІЛ 4. ЕКОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ	102
4.1. Вплив типології архітектурно-будівельних систем на екологічні показники життєвого циклу	102
4.3. Екологічна оцінка життєвого циклу на етапі проектування.....	113
4.4. Приклад оцінки життєвого циклу та аналіз результатів	117
РОЗДІЛ 5. BIM-ІНТЕГРОВАНА ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ БУДІВЕЛЬ.....	130
5.1. Автоматизація оцінки життєвого циклу за допомогою веб-платформи OneClickLCA.....	130
5.2. Інтерфейс веб-платформи OneClickLCA та попередні налаштування проєкту.....	132
5.3. Внесення даних для аналізу життєвого циклу на веб-платформі OneClickLCA.....	138
5.4. Перегляд результатів аналізу життєвого циклу на веб-платформі OneClickLCA.....	143
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	147

ВСТУП

Сучасний світ перебуває на етапі глибоких трансформацій, пов'язаних із глобальними екологічними викликами, серед яких — зміна клімату, виснаження природних ресурсів, деградація екосистем, урбанізаційний тиск та зростання енергоспоживання. Відповіддю на ці виклики стає пошук шляхів сталого розвитку, що передбачає баланс між економічними, соціальними та екологічними аспектами людської діяльності. Однією з ключових галузей, здатних суттєво вплинути на цей баланс, є будівництво, адже саме воно споживає понад 40 % світових енергетичних ресурсів і генерує близько третини викидів парникових газів у глобальному масштабі.

У XXI столітті будівельна галузь набуває нового змісту — від традиційного зведення споруд до створення енергоефективного, екологічно збалансованого та комфортного середовища для життя. З огляду на це, надзвичайно важливим стає розуміння екологічного впливу будівель протягом усього їх життєвого циклу - від добування сировини та виробництва матеріалів до експлуатації та демонтажу. Саме підхід «життєвого циклу» (Life Cycle Assessment, LCA) дозволяє об'єктивно оцінити сумарний вплив будівлі на навколишнє середовище та розробити стратегії мінімізації негативних наслідків.

У світі сформовано розгалужену систему нормативних, методичних та програмних інструментів для оцінки екологічної ефективності будівель. Міжнародні стандарти екологічної сертифікації — LEED (США), BREEAM (Велика Британія), DGNB (Німеччина) — встановлюють високі вимоги до енергоефективності, якості внутрішнього середовища, раціонального використання ресурсів і управління відходами. Вони стимулюють проєктувальників і забудовників орієнтуватися на принципи «зеленого» будівництва, що сьогодні є не лише проявом соціальної відповідальності, а й важливим конкурентним чинником у глобальній економіці.

Разом із тим, розвиток цифрових технологій відкрив нові можливості для моделювання екологічних параметрів будівель. Інтеграція методології оцінки життєвого циклу (LCA) у BIM-середовище (Building Information Modeling) дає

змогу проводити аналіз екологічного впливу ще на етапі проєктування, оперативно коригуючи рішення та оптимізуючи вибір матеріалів і конструкцій. Цифрові інструменти забезпечують автоматизований розрахунок приєднаних викидів вуглецю (embodied carbon), аналіз впливу різних проєктних варіантів і формування звітності відповідно до міжнародних стандартів.

Український будівельний сектор, інтегруючись у європейський простір, активно запроваджує принципи сталого розвитку та екологічного менеджменту. Актуальність впровадження підходів LCA, «зелених» стандартів і цифрових технологій у вітчизняну практику обумовлена необхідністю модернізації будівельної галузі, підвищення її енергоефективності та зниження вуглецевого сліду національної економіки. Це, у свою чергу, потребує підготовки фахівців нового покоління - інженерів, архітекторів, проєктувальників, здатних мислити системно, розуміти взаємозв'язок технічних рішень з екологічними наслідками та використовувати сучасні цифрові інструменти для ухвалення сталих проєктних рішень.

Метою цього навчального посібника є формування у здобувачів вищої освіти цілісного розуміння екологічного аспекту діяльності у будівництві — від концепції сталого розвитку до практичних методів оцінки впливу будівель на довкілля. Посібник покликаний надати теоретичні знання та практичні навички застосування сучасних інструментів екологічного аналізу, ознайомити з міжнародними підходами до екологічної сертифікації, нормативно-правовими вимогами, а також з методами оцінки життєвого циклу будівель і будівельних матеріалів.

Навчальний посібник підготовлено в рамках виконання Міжнародного проєкту за програмою 101127884 — The Bridge — ERASMUS-EDU-2023-CBHE «Подолання розриву між університетом і промисловістю: інноваційна магістерська навчальна програма, що підтримує розвиток зелених робочих місць і цифрових навичок в українському будівельному секторі»

РОЗДІЛ 1. ГЛОБАЛЬНІ ЕКОЛОГІЧНІ ВИКЛИКИ ТА МІЖНАРОДНІ ПІДХОДИ ДО ЇХ ПОДОЛАННЯ

1.1. Екологічні глобальні загрози

Сучасне містобудування стикається з безпрецедентними викликами, спричиненими глобальними ризиками. Зміна клімату, економічні кризи, технологічні загрози, пандемії та соціальна нестабільність кардинально впливають на планування, будівництво та управління міськими територіями. Швидка урбанізація та зростання населення вимагають нових підходів до створення безпечних, стійких та адаптивних міст, здатних протистояти сучасним загрозам.

Глобальне потепління та екстремальні погодні явища змушують архітекторів та інженерів переглядати принципи проектування і будівництва, впроваджуючи інноваційні рішення, енергоефективні технології та екологічно чисті матеріали.

З середини XX століття людство почало усвідомлювати масштабні екологічні загрози, спричинені технологічним прогресом та інтенсивною господарською діяльністю. Перші наукові дослідження, зокрема знакова доповідь Римського клубу «Межі зростання» (1972), яку підготували фахівці Массачусетського технологічного інституту, застерігали: якщо не змінити модель споживання, планеті загрожує екологічний колапс [1].

Окрім проблем надмірного споживання, у 1987 році науковці визначили ще одну критичну загрозу – зміна клімату, виділивши її як один з найнебезпечніших викликів для майбутнього людства [2].

Звіт Всесвітнього економічного форуму «Global Risks Report 2006» був першим систематичним дослідженням, присвяченим комплексному аналізу глобальних ризиків у коротко- та довгостроковій перспективі, а сьогодні став постійним дослідницьким інструментом для їх моніторингу [3]. Його методологічна основа полягала в ідентифікації та оцінці актуальних і нових загроз, дослідженні їх взаємозв'язків та аналізі потенційного впливу на різні сектори економіки, а також формуванні основи для розробки превентивних стратегій їх

пом'якшення. Проблеми, що викликають глобальне занепокоєння, згруповано в п'ять класів – економічні, геополітичні, екологічні, соціальні та технологічні.

«Глобальний ризик» визначається як можливість настання події або умови, яка, якщо вона відбудеться негативно вплине на значну частку глобального ВВП, населення або природних ресурсів [4].

Сучасний аналіз глобальних ризиків констатує їхню системну природу та неізолюваний характер прояву. Каскадна взаємодія різномірних ризиків здатна генерувати кумулятивні явища, так звані «ідеальні шторми» - синергетичні події, де сумарний деструктивний ефект значно перевищує адитивну суму наслідків окремих ризиків. Усі категорії ризиків взаємопов'язані, і цей взаємозв'язок може призводити до ефекту «доміно», коли виникнення одного ризику провокує каскадний розвиток інших, підсилюючи їхній загальний негативний вплив на суспільство, економіку та довкілля [5].

Глобальні ризики відрізняються не лише за характером і наслідками, але й за швидкістю розвитку. Деякі з них розгортаються поступово, протягом тривалого часу, і можуть залишатися непомітними до моменту, коли їхній вплив стає незворотним. Яскравим прикладом є зміна клімату, яка відбувається десятиліттями, спричиняючи підвищення температур, екстремальні погодні явища, втрату біорізноманіття та деградацію екосистем. Хоча цей процес є повільним, його наслідки мають катастрофічний та глобальний характер.

Сприйняття глобальних ризиків змінюється з часом і розвитком людства. Зміни пріоритетів, як в довгостроковій, а особливо, в короткостроковій перспективі показують всю мінливість ландшафту ризиків. За 20 років дослідження глобальних ризиків змінилося не тільки сприйняття ризику в рейтингу глобальних впливів, а і само наповнення категорій ризиків, які постійно поповнюються новими загрозами (табл. 1.1).

Згідно представленому в Global risk report 2025 аналізу щодо зміни ключових ризиків і категорій ризиків за останні два десятиліття найбільш стабільними загрозами, які очолюють рейтинги протягом цього періоду – є загрози, пов'язані із зміною клімату, а саме: критичні зміни в системах Землі, екстремальні погодні

явища, втрата біорізноманіття та руйнування екосистем, дефіцит природних ресурсів і забруднення, тощо [4, 5].

Таблиця 1.1

Зміна категорій глобальних ризиків з часом на прикладі
екологічних загроз [3, 4, 6]

Клас глобальних ризиків	Категорії глобальних загроз		
	2006	2015	2025
Екологічні загрози	- тропічні циклони; - землетруси; - зміна клімату - втрата екосистемних послуг.	- екстремальні погодні явища (повені, шторми, тощо); - провал адаптації до зміни клімату; - значна втрата біорізноманіття та руйнування екосистем (на суші або в океані); - великі природні катастрофи (землетрус, цунамі, виверження вулканів, геомагнітні бурі); - техногенні екологічні катастрофи (наприклад, розлив нафти, радіоактивне забруднення тощо).	- втрата біорізноманіття та руйнування екосистем; - критичні зміни в системах Землі; - екстремальні погодні явища (повені, спека тощо); - дефіцит природних ресурсів (їжі, води); - стихійні лиха, не пов'язані з погодою (землетруси, виверження вулканів, цунамі, сонячні спалахи тощо); - забруднення (повітря, ґрунту, води тощо).

Основними чинниками, які призводять до цих загроз є: забруднення повітря, ґрунту, води, викиди парникових газів (CO₂, CH₄, N₂O) від спалювання викопного палива для виробництва енергії, роботи транспорту, виробництва різних продовольчих і непродовольчих товарів, вирубка лісів, промисловість, будівництво і експлуатація будівель та сільське господарство. Це далеко не повний список

чинників, але наведені є одними із найбільш впливових. Наслідки від процесів, пов'язаних із зміною клімату, як і від інших глобальних загроз, можуть бути прямими і непрямими, які спричиняють вторинні ефекти. До прямих наслідків можна віднести: підвищення температур, екстремальні погодні явища (цунамі, посухи, повіні, тощо), підвищення рівню океану, скорочення видів, тощо. До непрямих наслідків відносяться: виснаження природних ресурсів, дефіцит продовольства або води в окремих районах, енергетичні кризи, бідність і міграція, соціальна нестабільність.

Згідно останнього звіту «Global risk report 2025» екологічні ризики сьогодні представлені шістьма категоріями (таблиця 1.2), п'ять з яких входять в десятку найбільш серйозних загроз в найближче десятиліття, чотири перших очолюють цей рейтинг, а саме: екстремальні погодні явища, втрата біорізноманіття та руйнування екосистеми, критична зміна земних систем, дефіцит природних ресурсів, забруднення (рис. 1.1) [4].

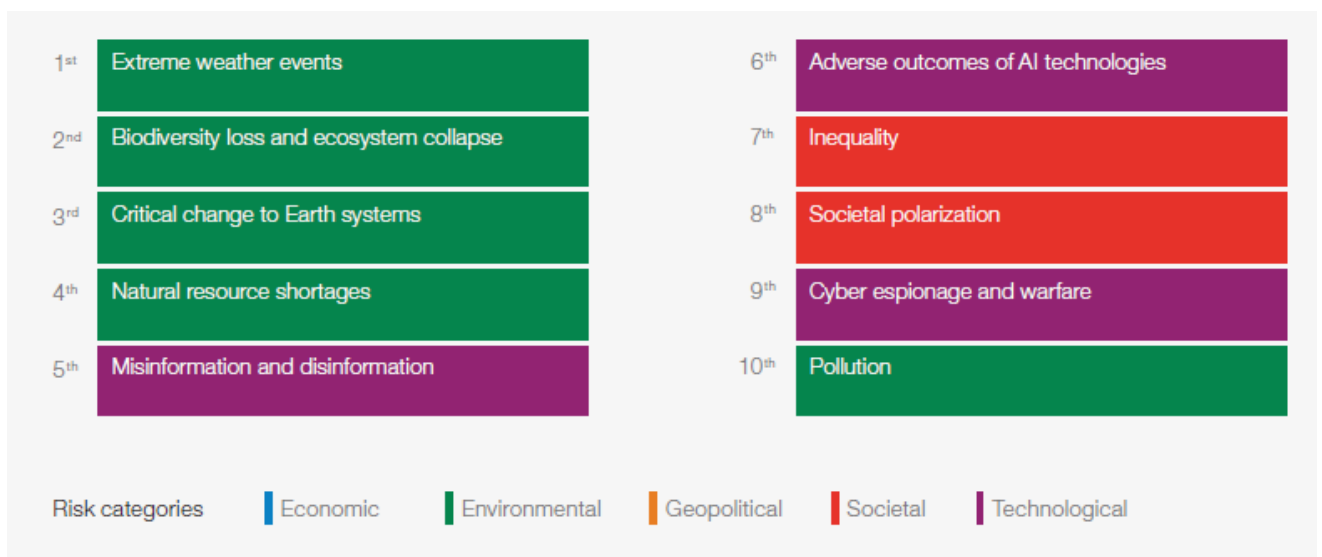


Рис. 1.1 – Рейтинг глобальних ризиків протягом довгострокової перспективи (10 років), ранжовані за ступенем серйозності. Джерело: Опитування сприйняття глобальних ризиків Всесвітнього економічного форуму 2024-2025 [4]

Категорії екологічних глобальних загроз і їх визначення [4]

Екологічні загрози	Втрата біорізноманіття та руйнування екосистем	Тяжкі наслідки для довкілля, людства та економічної діяльності через руйнування природного капіталу внаслідок вимирання або скорочення видів, що охоплює як наземні, так і морські екосистеми
	Критичні зміни в системах Землі	Довгострокові, потенційно незворотні та самовідновлювані загрози для критично важливих планетарних систем внаслідок перевищення критичного кліматичного чи екологічного порогу або «переломного моменту» на регіональному чи глобальному рівнях. Сюди входять, але не обмежуються: підвищення рівня моря через руйнування льодовикового покриву, вивільнення вуглецю через танення вічної мерзлоти та порушення океанічних або атмосферних течій.
	Екстремальні погодні явища (повені, спека тощо)	Втрата людських життів, пошкодження екосистем, знищення майна та/або фінансові втрати внаслідок екстремальних погодних явищ. Включає, але не обмежується: наземні (наприклад, лісові пожежі), водні (наприклад, повені), атмосферні та температурні (наприклад, спека) явища, в тому числі ті, що посилюються зміною клімату.
	Дефіцит природних ресурсів (продовольства, води)	Дефіцит продовольства або води для потреб населення, промисловості або екосистем, що проявляється у вигляді відсутності продовольчої та водної безпеки на місцевому, регіональному або глобальному рівнях, спричинений, зокрема, надмірною експлуатацією та нераціональним використанням людиною критично важливих природних ресурсів, зміною клімату (включаючи посуху та опустелювання) та/або відсутністю відповідної інфраструктури.
	Стихійні лиха, не пов'язані з погодою (землетруси, вулкани, цунамі, сонячні спалахи тощо)	Втрата людських життів, пошкодження екосистем, знищення майна та/або фінансові втрати внаслідок стихійних лих, не пов'язаних з погодними умовами. Включає, але не обмежується: наземні (наприклад, землетруси, вулкани), водні (наприклад, цунамі) та позаземні (наприклад, астероїдні удари та геомагнітні бурі) події.
	Забруднення (повітря, ґрунту, води тощо)	Потрапляння шкідливих матеріалів у повітря, воду та ґрунт внаслідок людської діяльності, що призводить до впливу на втрати людських життів, фінансових втрат та/або шкоди екосистемам. Включає, але не обмежується: побутову та промислову діяльність; екологічні аварії, такі як розливи нафти; радіоактивне забруднення.

Кліматичні зміни та природні катаклізми становлять серйозну загрозу для всіх людських поселень, проте найбільш значний їх вплив є саме на міські екосистеми. Міста, як осередки концентрації населення, економічної діяльності та критичної інфраструктури, демонструють підвищену вразливість до кліматичних змін, що безпосередньо загрожує їхній стабільності та довгостроковому розвитку.

Згідно з даними Світового банку, кожна шоста людина планети мешкає в містах, а за прогнозами ООН до 2050 року частка міського населення зросте до 70%. При цьому міста займають лише 2% загальної території суші, проте виробляють 70% валового внутрішнього продукту (ВВП), понад 60% світового споживання енергії, 70% викидів парникових газів, та 70% глобальних відходів (рис. 1.2).

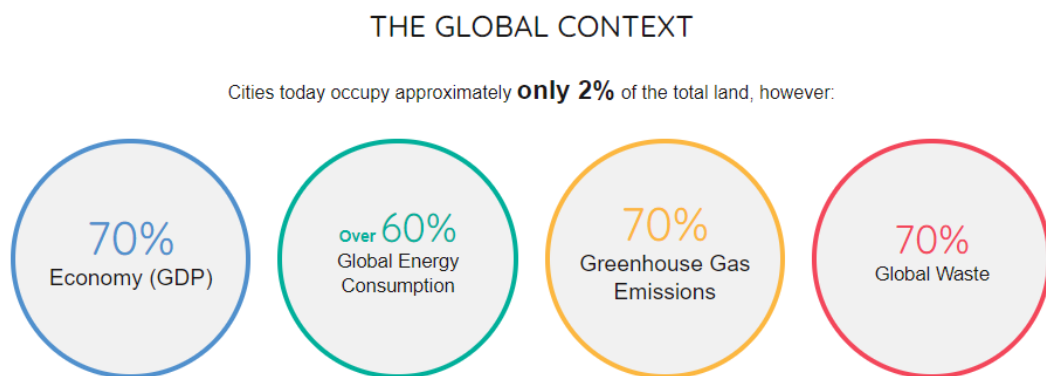


Рис. 1.2. Урбанізація: трансформаційна сила та нові виклики для людства [8]

Основні наслідки кліматичних змін та природних катаклізмів для міського середовища включають:

- *Підвищення температури та ефект міського теплового острова.* Зміна клімату сприяє підвищенню середньорічних температур у містах, що посилюється через ефект міського теплового острова (Urban Heat Island Effect). Це призводить до зростання навантаження на енергетичні системи, підвищеної смертності від теплових хвиль, погіршення якості повітря;

- *Зміна погодних умов, посухи та дефіцит водних ресурсів.* Збільшення кількості екстремальних опадів спричиняє частіші та масштабніші повені, що пошкоджують дороги, будівлі, транспортні мережі. Дефіцит водних ресурсів

внаслідок змін клімату ставить під загрозу водопостачання та каналізаційні системи міст;

- *Загроза прибережним містам через підвищення рівня моря.* Зростання рівня світового океану загрожує прибережним містам, підвищуючи ризик затоплень, ерозії ґрунтів, проникнення солоної води у підземні води. Втрата інфраструктури та необхідність переселення населення може мати катастрофічні економічні та соціальні наслідки;

- *Підвищення частоти природних катастроф.* Кліматичні зміни призводять до збільшення частоти та інтенсивності ураганів, тайфунів, лісових пожеж та землетрусів. Це в свою чергу спричиняє руйнування інфраструктури, пошкодження будівель та комунікацій, втрати людських життів і економічні збитки, які зростають у міському середовищі;

- *Погіршення екологічної ситуації та стану міських екосистем.* Забруднення повітря, що посилюється високими температурами, негативно впливає на здоров'я міських мешканців. Шкідливі викиди в атмосферу від роботи транспорту або промисловості, можуть викликати суттєві зміни метеорологічного режиму, що виявляється у процесі утворення туманів, які в свою чергу продукують кислотні дощі і тумани-смоги [6].

Екологічні глобальні загрози, зокрема зміна клімату, втрата біорізноманіття та екстремальні погодні явища, створюють безпрецедентні виклики для стабільності в майбутньому існуванні людства. Подолання глобальних екологічних загроз потребує системного, міждисциплінарного підходу, у якому одну з ключових ролей відіграє архітектурно-будівельна галузь. Саме від рішень у сфері проектування, будівництва та експлуатації будівель і споруд залежить рівень енергоспоживання, викидів парникових газів, ефективність використання ресурсів та адаптаційна спроможність міст до кліматичних змін.

Враховуючи глобальний характер екологічних загроз, їх подолання вимагає консолідованих зусиль на міжнародному рівні, що знаходить своє втілення в міждержавних програмах та стратегічних ініціативах спрямованих на створення стійкого і безпечного середовища для нинішніх і майбутніх поколінь.

1.2. Міжнародні стратегії та програми подолання екологічних загроз

У відповідь на зростання масштабів екологічних викликів світова спільнота сформувала низку концепцій, стратегій і програм, покликаних забезпечити гармонійний баланс між розвитком суспільства, економічним зростанням і збереженням довкілля. Вони відображають еволюцію людського мислення — від усвідомлення екологічних проблем до пошуку системних рішень, що поєднують інновації, соціальну відповідальність і природоцентричний підхід. Серед найвідоміших міжнародних концепцій, які визначають сучасну екологічну політику, варто виокремити Концепцію Сталого розвитку, Циркулярну економіку, Регенеративний Дизайн, Взаємозв'язок «Енергія – Вода – Продовольство» та Green Deal — ініціативи, що стали фундаментом нової глобальної екологічної парадигми.

Перші міжнародні ініціативи екологічного спрямування з'явилися ще в середині XX століття, коли наслідки техногенного зростання та індустріалізації почали ставати загрозою для стабільності природних систем. Ключовою подією, що ознаменувала перехід до нового етапу глобальної екологічної свідомості, стала Конференція ООН з проблем навколишнього середовища (Стокгольм, 1972 р.) [9], яка вперше на міждержавному рівні визначила охорону довкілля як невід'ємну складову розвитку людства. Саме тоді було започатковано діяльність Програми ООН з навколишнього середовища (UNEP) — однієї з головних інституцій, що координує екологічну політику та ініціює глобальні програми сталого розвитку [10].

Подальший розвиток міжнародних екологічних ініціатив відбувався через послідовне формування нормативно-договірної бази. Важливу роль у цьому відіграли такі документи, як Всесвітня стратегія охорони природи (1980 р.) [11], Декларація Ріо-де-Жанейро (1992 р.), яка містить 27 основних принципів екологічного права та сталого розвитку [12], Порядок денний на XXI століття, Кіотський протокол (1997 р.) [13] та Паризька кліматична угода (2015 р.) [14]. Кожен із цих етапів засвідчив еволюцію міжнародних підходів — від локального реагування на окремі екологічні проблеми до усвідомлення необхідності

комплексних системних рішень, інтегрованих у соціально-економічну політику держав.

На сучасному етапі міжнародне екологічне співробітництво базується на принципах сталого розвитку, що поєднує економічну ефективність, соціальну справедливість і екологічну збалансованість. Цей підхід передбачає, що жоден аспект розвитку не може бути досягнутий за рахунок деградації природного середовища. У цьому контексті важливу роль відіграють також інші концепції — циркулярна економіка, регенеративний дизайн, Взаємозв'язок «Енергія – Вода – Продовольство» та Європейський зелений курс, які формують нові моделі взаємодії суспільства з природою.

Поняття сталого розвитку посідає центральне місце в сучасній системі міжнародних екологічних стратегій і є теоретико-методологічною основою глобальної політики у сфері збалансованого розвитку. Його сутність полягає у забезпеченні гармонійного співіснування людини, суспільства й природи на засадах раціонального використання ресурсів, соціальної справедливості та збереження екосистем для майбутніх поколінь.

Ідеї сталого розвитку сформувалися внаслідок усвідомлення обмеженості природних ресурсів та негативних наслідків індустріального зростання. Поворотною точкою у становленні цієї концепції стала публікація доповіді Всесвітньої комісії ООН з навколишнього середовища і розвитку під керівництвом Гру Гарлем Брундтланд «Наше спільне майбутнє» («Our common future») (1987 р.), у якій уперше було дано класичне визначення: *«Сталий розвиток — це розвиток, який задовольняє потреби нинішнього покоління, не ставлячи під загрозу здатність майбутніх поколінь задовольняти власні потреби»* [15, 16]. Це визначення заклало основу для формування міжнародної політики, орієнтованої на досягнення балансу між економічним зростанням, соціальним добробутом і збереженням природного середовища, а теорія сталого розвитку стала альтернативою парадигмі економічного зростання, яка ігнорує екологічну небезпеку від розвитку за екстенсивною моделлю.

Важливим етапом інституціоналізації сталого розвитку стала Конференція ООН з навколишнього середовища і розвитку в Ріо-де-Жанейро (1992 р.), де було ухвалено Декларацію Ріо та Порядок денний на XXI століття (Agenda 21). Ці документи визначили стратегічні напрями для національних політик держав, підкресливши, що економічний прогрес не може відбуватися за рахунок екологічної деградації [12].

Концепція сталого розвитку базується на об'єднанні трьох складових: економічної, соціальної та екологічної (рис. 1.3).

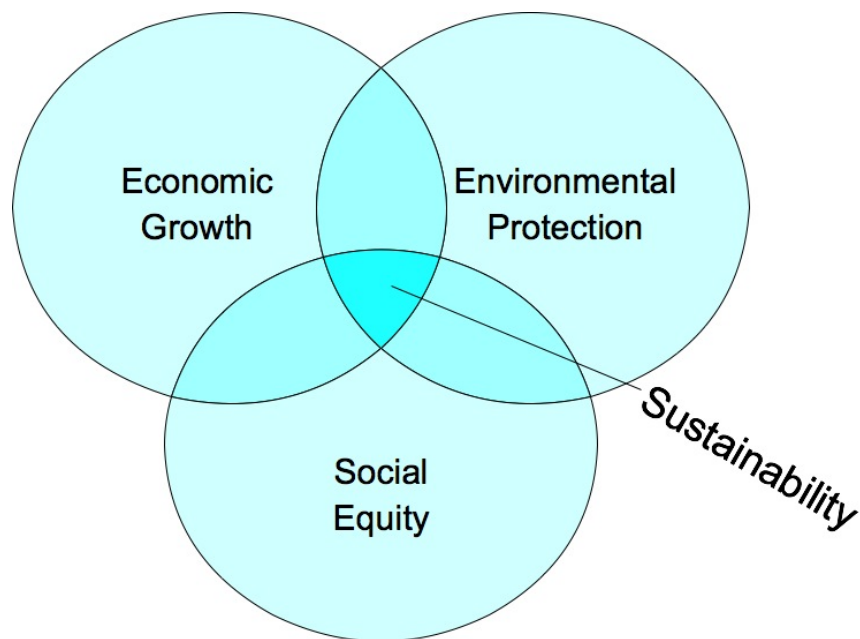


Рис. 1.3 – Триєдина Концепція сталого розвитку

Економічний аспект концепції сталого розвитку ґрунтується на принципах раціонального та оптимального використання обмежених ресурсів. Це реалізується шляхом впровадження ресурсо- та енергоефективних, екологічно безпечних технологій на всіх стадіях життєвого циклу продукції – від видобутку та переробки сировини до створення екологічно прийнятних товарів, а також мінімізації, утилізації та знешкодження відходів. *Соціальна складова* орієнтована на антропоцентричний підхід та спрямована на підтримання стабільності соціокультурних систем. Ключовими завданнями цього компоненту є запобігання деструктивним соціальним конфліктам та забезпечення справедливого розподілу

матеріальних і нематеріальних благ. Екологічний компонент має на меті збереження цілісності та функціональної стабільності біологічних і фізичних природних систем. Пріоритетне значення надається підтриманню життєздатності екосистем, оскільки саме від їхнього стану залежить глобальна стабільність біосфери в цілому. Важливо зауважити, що до об'єктів охорони в рамках цього підходу належать як природні, так і антропогенні середовища, зокрема урбанізовані простори, такі як міста.

Подальший розвиток концепції відбувся через формування системи Цілей сталого розвитку (Sustainable Development Goals, SDGs), ухвалених ООН у 2015 році як основи Порядку денного сталого розвитку до 2030 року (рис. 1.4). Ця програма включає 17 цілей і 169 завдань, які охоплюють питання ліквідації бідності, гендерної рівності, доступу до чистої енергії, відповідального споживання, боротьби зі зміною клімату, збереження морських і наземних екосистем тощо [17]. Таким чином, сталий розвиток набув глобального виміру, інтегрувавши економічні, соціальні та екологічні пріоритети в єдину систему.



Рис. 1.4 – 17 Цілей сталого розвитку [17]

Суттєвим аспектом сучасного розуміння сталого розвитку є його практичне впровадження на різних рівнях управління — від міжнародних угод до місцевих

ініціатив. Уряди, підприємства, наукові установи та громадські організації розробляють власні стратегії, спрямовані на досягнення окремих цілей сталого розвитку. При цьому зростає роль корпоративної соціальної відповідальності, зелених інвестицій, екологічного менеджменту та сталих міських політик. Сьогодні сталий розвиток є не лише декларативною метою, а фундаментом глобальної стратегії виживання людства, що поєднує наукові, економічні та моральні засади з метою формування безпечного і справедливого світу для всіх поколінь.

Циркулярна економіка (Circular economy) є однією з провідних концепцій сучасної екологічної трансформації, що розвиває та конкретизує принципи сталого розвитку. Її сутність полягає у формуванні економічної системи, заснованої не на лінійній моделі «виробництво — споживання — відходи», а на замкнених циклах ресурсів, у яких продукти, матеріали та енергія максимально довго зберігають свою цінність (рис. 1.5) [20].

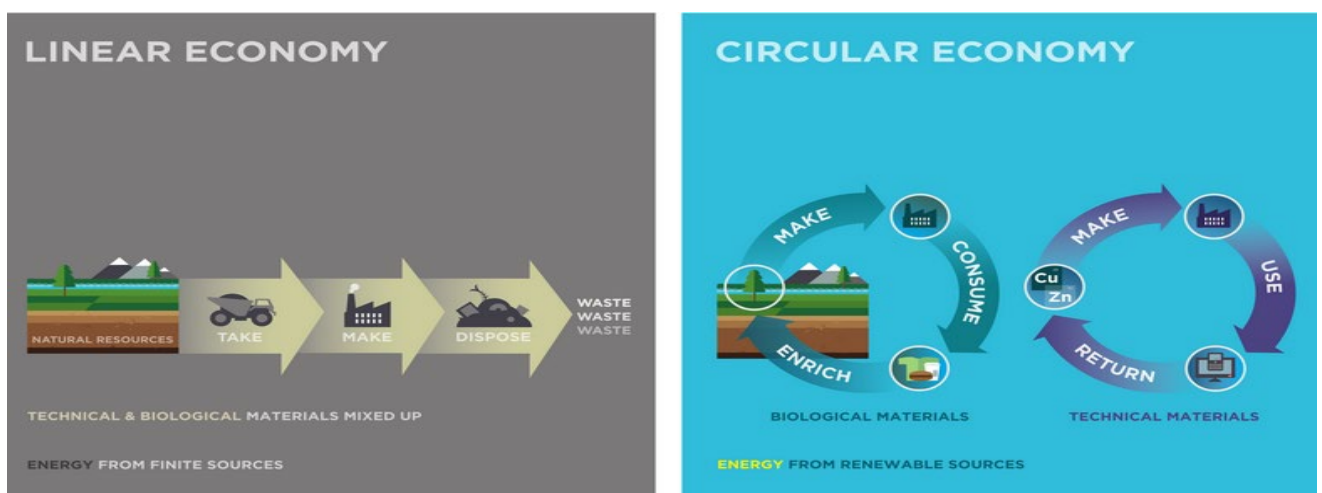


Рис. 1.5 - Лінійна та циркулярна моделі економіки [18, 19]

Ключовими принципами цієї моделі є:

- виробництво матеріалів і продукції з максимальним залученням відновлюваних ресурсів;
- організація експлуатації товарів у повторюваних циклах, що забезпечує продовження їх життєвого циклу.

Ця концепція є органічним продовженням та інструментом реалізації ідей сталого розвитку. Її фундаментальною метою є досягнення екологічної рівноваги в умовах сталого економічного зростання та соціального прогресу. Це досягається шляхом максимізації ефективності використання ресурсів на всіх етапах життєвого циклу товарів і послуг.

Концепція циркулярної економіки багато в чому сформувалася завдяки праці архітектора Вільяма Макдоноу, світового експерта в галузі сталого розвитку та дизайну. У співпраці з німецьким хіміком Міхаелем Браунгартом він розробив принцип дизайну «Cradle to Cradle» («від колиски до колиски»), що став концептуальною основою для циркулярної економіки [21, 22]. Макдоноу наголошує на необхідності переосмислення виробничих процесів з метою покращення стану навколишнього середовища. Він пропонує інноваційний, антропоцентричний підхід до дизайну, що передбачає розробку хімічно безпечних продуктів, виготовлених відповідно до високих етичних стандартів. Свої ідеї автори висвітлили у праці «Cradle to Cradle: Remaking The Way We Make Things», де охарактеризували дизайн як «відновлювальну, благодійну силу, що прагне залишати після себе екологічний слід, який викликає захоплення, а не жаль» [23].

Концептуальні основи циркулярної економіки отримали практичне втілення у формі так званих R-імперативів (від англійських слів, що починаються на "R"). Спочатку модель базувалася на класичній тріаді принципів: Reduce (зменшення споживання), Reuse (повторне використання) та Recycle (переробка). Однак еволюція цієї концепції призвела до значного розширення даного переліку. Сучасна та комплексна модель, яка була презентована Жаклін Крамер у Ванкувері 15 травня 2017 року, включає вже десять імперативів (10R), що охоплюють повніший спектр дій — від проєктування продуктів до зміни моделей споживання (рис. 1.6).

У системі міжнародних екологічних стратегій циркулярна економіка розглядається як ключовий інструмент досягнення цілей сталого розвитку, зокрема у сферах відповідального споживання (ЦСР 12), кліматичних дій (ЦСР 13) і збереження природних екосистем (ЦСР 14–15). Її практична реалізація забезпечує

перехід від кількісного до якісного зростання, де ефективність визначається не обсягами виробництва, а здатністю економіки функціонувати без втрат для природи.

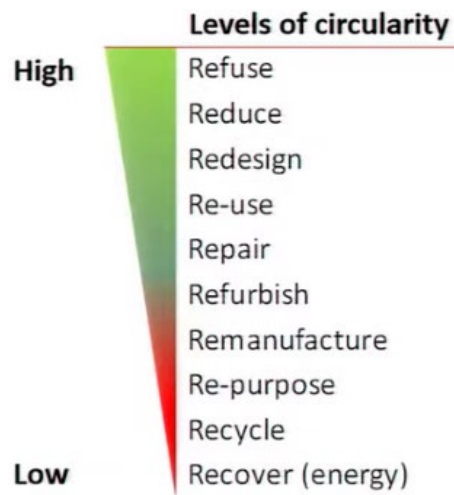


Рис. 1.6 – Рівні циркулярності в циркулярній економіці
за моделлю Жаклін Крамер

Циркулярна економіка передбачає глибоку структурну перебудову виробничих і споживчих процесів, включаючи:

- перехід до екодизайну та модульного виробництва, що забезпечують легкість ремонту і переробки;
- розвиток нових бізнес-моделей — спільного користування, сервісної економіки, лізингу, upcycling та remanufacturing;
- використання цифрових технологій (штучного інтелекту, блокчейну, IoT) для оптимізації ланцюгів постачання і відстеження матеріальних потоків;
- формування культури свідомого споживання та освітніх програм для підвищення екологічної компетентності суспільства.

Будівельний сектор займає ключове місце в контексті циркулярної економіки, формуючи напрям циркулярного будівництва (circular construction, circular built environment). Оскільки саме будівельний сектор є найінтенсивнішим споживачем матеріальних ресурсів, основним генератором відходів та одним з головних джерел викидів парникових газів. Одночасно він також має найбільший потенціал для імплементації принципів циркулярності. Їх дотримання дозволяє не

лише значно знизити екологічне навантаження, а і забезпечити подовження життєвого циклу будівельних об'єктів та матеріалів, зменшити залежність від видобувних ресурсів і сприяти створенню стійкого міського середовища.

Регенеративний дизайн (Regenerative Design) є новітнім напрямом у розвитку екологічної думки, який виходить за межі традиційної парадигми сталого розвитку. Якщо сталий розвиток передбачає зменшення негативного впливу на довкілля та підтримання балансу між природними й антропогенними системами, то регенеративний підхід спрямований на активне відновлення природних процесів і створення умов для підвищення життєздатності екосистем. Його головна ідея полягає в тому, що людська діяльність може бути не лише «менш шкідливою», а й позитивною силою, здатною посилювати екологічну стійкість і біорізноманіття (рис. 1.7) [24].

Поняття *regenerative design* було сформульоване американським архітектором і теоретиком Джоном Тіллі (John T. Lyle) у 1990-х роках. Він розглядав регенеративний підхід як систему проектування, у якій штучно створені середовища інтегруються у природні цикли енергії, води, поживних речовин і біомаси. На відміну від концепції *sustainable design*, що фокусується на мінімізації шкоди, регенеративний дизайн орієнтований на створення чистої енергії, очищення води, відновлення ґрунтів, поліпшення якості повітря та підвищення біопродуктивності територій. Своє бачення розвитку регенеративних систем він представив в своїх роботах «*Regenerative Design for Sustainable Development*» та «*Design for Human Ecosystems*».

Основними принципами регенеративного підходу є:

- цілісність системи — розгляд об'єкта не ізольовано, а як елемента екосистеми, у якій він функціонує;
- позитивний екологічний баланс — створення умов, за яких діяльність людини сприяє відновленню природних ресурсів;
- взаємодія та саморегуляція — використання природних механізмів для підтримання стійкості системи;

- залучення спільнот — орієнтація на соціальну участь, освіту і співтворення з місцевими громадами;
- адаптивність — гнучке реагування на зміни клімату, урбаністичного середовища й технологічного розвитку.

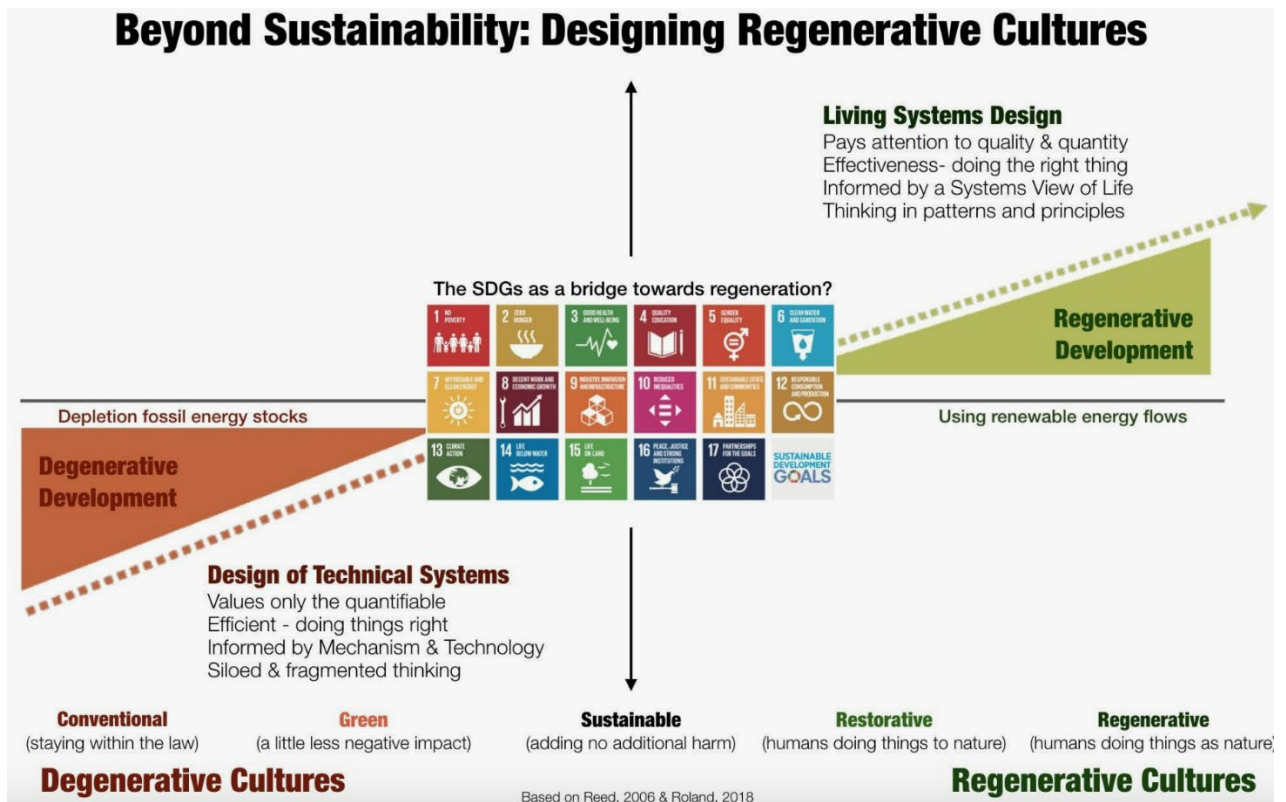


Рис. 1.7 – Концепція Регенеративного Дизайну: поза межами сталого розвитку: проектування регенеративних культур [25]

Регенеративний підхід знайшов особливе застосування у сфері архітектури, урбаністики та будівництва, де формується новий тип екологічно активних будівель і споруд — таких, що не лише мінімізують споживання енергії, а і генерують власні ресурси. Прикладами є будівлі «Енергія плюс», будівельні матеріали, що очищують повітря, технології по збору дощової води та переробки відходів. Концепції «позитивного енергетичного балансу» (net-positive energy), «живих будівель» (Living Buildings) та «біофільного дизайну» (Biophilic Design) стали складовими регенеративного підходу, поєднуючи технічні інновації з природоцентричними принципами.

У ширшому контексті регенеративний дизайн розглядається як філософія взаємодії людини і природи, що ґрунтується на етиці співіснування та співтворення. Він ставить під сумнів антропоцентричну модель розвитку, пропонуючи натомість екоцентричний світогляд, у якому людина — активний учасник екологічних процесів, а не їх руйнівник. Таким чином, регенеративний підхід не лише технічна стратегія, а світогляд, що формує нову культуру проектування, управління і мислення.

Міжнародна практика свідчить, що регенеративний дизайн поступово інтегрується в політику сталих міст і територій, у стандарти екологічного будівництва (LEED, BREEAM, Living Building Challenge), а також у стратегії корпоративної екологічної відповідальності. Розвиток цієї концепції підтримують міжнародні ініціативи — зокрема, Regenerative Communities Network і The Capital Institute, які розвивають ідеї відновлення соціоекологічних систем на глобальному рівні.

Таким чином, регенеративний дизайн є наступним етапом еволюції екологічного мислення, який поєднує наукові досягнення, інноваційні технології та етичні принципи співіснування людини і природи.

Глобальні ризики, такі як зміна клімату, зростання населення та неконтрольований технологічний прогрес створюють сукупність взаємопов'язаних криз — продовольчої, водної та енергетичної. Саме усвідомлення цієї взаємозалежності зумовило формування концепції «Взаємозв'язок Вода — Енергія — Продовольство» (Water–Energy–Food Nexus, WEF Nexus), яка стала однією з провідних рамок моделей міжнародних екологічних стратегій та інструментом для досягнення Цілей сталого розвитку ООН (рис. 1.8).

Концепція WEF Nexus базується на системному підході, що розглядає воду, енергію та продовольство не як окремі галузі, а як взаємопов'язані компоненти єдиної соціоеколого-економічної системи. Будь-яка політика або управлінське рішення в одній із цих сфер має безпосередній вплив на дві інші. Наприклад, виробництво енергії потребує води для охолодження електростанцій чи виробництва біопалива, виробництво продовольства споживає значні обсяги води

та енергії, видобуток і очищення води, у свою чергу, залежать від енергетичних ресурсів. Таким чином, неефективність у будь-якій ланці триєдності «вода — енергія — продовольство» призводить до дисбалансу всієї системи, що створює ризики продовольчої безпеки, дефіциту ресурсів і деградації екосистем.

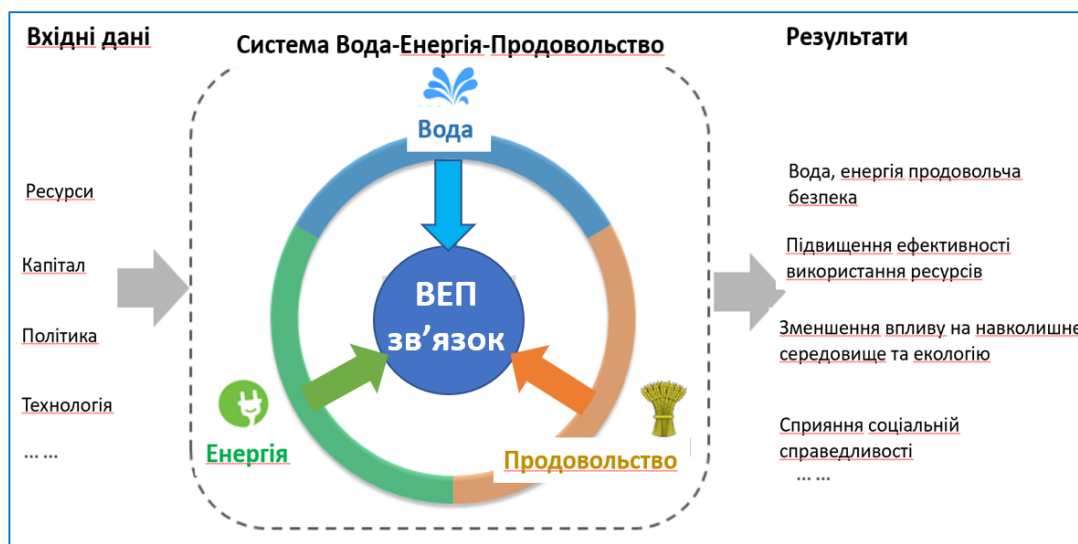


Рис. 1.8 - Зв'язок «Вода – енергія – продовольство» (ВЕП) [24]

Ідея комплексного підходу до управління природними ресурсами отримала розвиток на Всесвітньому економічному форумі в Давосі (2011 р.), де було вперше представлено системну модель WEF Nexus. Подальше її інституціональне закріплення відбулося у рамках ініціатив FAO, UNESCO, UN-Water, GIZ та International Food Policy Research Institute (IFPRI). З цього часу концепція стала невід'ємною складовою глобальної політики управління ресурсами, оскільки вона дозволяє: інтегрувати цілі сталого розвитку (ЦСР 2 — ліквідація голоду, ЦСР 6 — чиста вода, ЦСР 7 — чиста енергія, ЦСР 13 — кліматичні дії); уникати конфліктів між секторами; забезпечувати довгострокову ресурсну безпеку.

Помітним результатом практичної реалізації підходу «зв'язків ВЕП» став розрахунок Глобального індексу зв'язків ВЕП (Global WEF Nexus Index) [26, 27]. Індекс взаємозв'язку ВЕП слугує важливим ресурсом для вимірювання безпеки ВЕП на рівні країн та відстеження прогресу в досягненні ЦСР, пов'язаних з ВЕП. В Таблиці 1.3 приведена перша п'ятірка країн у рейтингу Індексу ВЕП зв'язку [24].

Європейський зелений курс (European Green Deal) є комплексною стратегічною ініціативою Європейського Союзу, спрямованою на досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року та перехід до моделі сталого, ресурсоефективного та конкурентоспроможного розвитку. Презентований Європейською Комісією у грудні 2019 року, цей документ став поворотним моментом у європейській та глобальній екологічній політиці, оскільки інтегрував екологічні пріоритети у всі сфери соціально-економічного життя ЄС.

Таблиця 1.3

Перша п'ятірка країн у рейтингу Індексу ВЕП зв'язку

Країна	Глобальний рейтинг	Оцінка індексу	Вода	Енергія	Продовольство
Норвегія	1	80.9	79.1	93	70.5
Нова Зеландія	2	77.3	79.1	74.6	78.2
Швеція	3	76.9	78.2	82.3	70.1
Ісландія	4	76.6	79.4	93.2	57.2
Канада	5	75.5	68.5	84.8	73.2

Європейський зелений курс є не просто екологічною програмою, а новою економічною моделлю розвитку, що поєднує економічне зростання з охороною довкілля, декарбонізацією енергетики та підвищенням добробуту громадян. Основна мета ініціативи — перетворити ЄС на перший кліматично нейтральний континент.

До ключових стратегічних завдань Європейського зеленого курсу належать (рис. 1.9) [28, 29]:

1. Досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року — скорочення викидів парникових газів щонайменше на 55% до 2030 року порівняно з рівнем 1990 р. і досягнення нульових викидів до 2050 р.(ціль пакета «Fit for 55»).

2. Перехід до чистої енергетики — розвиток відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності та відмова від викопного палива.

3. Стала економіка — впровадження оновленого Circular Economy Action Plan (2020 р.), що передбачає зменшення відходів, збільшення тривалості життєвого циклу товарів і повторне використання ресурсів.

4. Стале сільське господарство — реалізація стратегії Farm to Fork, спрямованої на створення здорової, екологічної та справедливої продовольчої системи.

5. Збереження біорізноманіття — стратегія EU Biodiversity Strategy for 2030, яка передбачає відновлення деградованих екосистем і розширення мережі природоохоронних територій.

6. Екологізація промисловості та транспорту — розвиток «зеленої» інфраструктури, декарбонізація важкої промисловості, розширення впровадження електротранспорту.

7. Фінансування зеленої трансформації — створення Механізму справедливого переходу (Just Transition Mechanism) та Інвестиційного плану сталого розвитку ЄС (Sustainable Europe Investment Plan).



Рис. 1.9 - Основні положення Європейської Зеленої Угоди [24]

Будівельний сектор є одним із ключових напрямів реалізації Європейського зеленого курсу, адже саме будівлі споживають близько 40% енергії та спричиняють понад третину викидів CO₂ у ЄС. Центральне місце займає ініціатива «Хвиля реновації» (Renovation Wave Initiative, 2020), спрямована на підвищення енергоефективності та декарбонізацію будівельного фонду. Згідно з оновленою Директивою про енергоефективність будівель (EPBD), усі нові споруди мають бути нульового споживання енергії з 2030 року. ЄЗК також інтегрує принципи циркулярної економіки через повторне використання матеріалів і проектування з урахуванням життєвого циклу. Підтримка регенеративного та біофільного дизайну сприяє створенню будівель, що не лише мінімізують шкоду довкіллю, а й сприяють його відновленню. Завдяки фінансовим механізмам, зокрема Механізму справедливого переходу та фонду NextGenerationEU, будівельна галузь стає рушієм «зеленої» трансформації, поєднуючи технологічні інновації, соціальну відповідальність і екологічну ефективність.

Міжнародні програми та концепції подолання екологічних загроз формують глобальну платформу для переходу до стійкої моделі розвитку людства. Концепції сталого розвитку, циркулярної економіки, регенеративного дизайну та взаємозв'язку «Вода – Енергія – Продовольство» визначають нову логіку взаємодії суспільства і природи, спрямовану на зменшення екологічного навантаження та відновлення природних систем. Європейський зелений курс виступає практичним інструментом реалізації цих ідей на рівні політики, поєднуючи екологічні, економічні та соціальні цілі. Особливе значення в цій стратегії має будівельний сектор, який стає рушієм декарбонізації, енергоефективності та впровадження циркулярних принципів. У сукупності ці програми засвідчують перехід людства до нової парадигми розвитку — екологічно орієнтованої, технологічно інноваційної та соціально відповідальної цивілізації.

1.3. Вуглецевий слід. Роль будівельної галузі у зменшенні вуглецевого сліду

Вуглецевий слід – це кількість парникових газів (переважно вуглекислого газу – CO₂, а також метану, закису азоту тощо), які викидаються в атмосферу в результаті діяльності людини, організації, виробництва продукту або проведення події. Ці гази затримують тепло в атмосфері, тому їх накопичення посилює парниковий ефект, що призводить до підвищення середньої температури Землі, танення льодовиків, підвищення рівня моря, екстремальних погодних явищ та інших наслідків для клімату та життя на планеті. Вимірюється вуглецевий слід у тоннах еквіваленту вуглекислого газу (CO₂-екв.), що дозволяє врахувати різний вплив на клімат різних парникових газів. Будівельна галузь є одним з найбільших джерел викидів парникових газів. За різними оцінками, на неї припадає від 37% до 40% глобальних викидів CO₂ (рис. 1.10).



Рис. 1.10. Фактори, що обумовлюють вуглецевий слід будівельної продукції

Основними джерелами викидів є експлуатаційний вуглець (англ. *Operational Carbon*) та втілений вуглець (англ. *Embodied Carbon*).

Експлуатаційний вуглецевий слід – це викиди парникових газів, пов'язані з безпосередньою експлуатацією та обслуговуванням будівлі. Тобто, це викиди CO₂ від енергії, яку будівля **споживає щодня** для комфорту своїх мешканців.

Майже всі викиди цієї категорії генеруються через споживання енергії, основні види якого наведені в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Джерела експлуатаційних викидів

Вид енергоспоживання	Приклад утворення викидів
1. Опалення	Спалювання природного газу, рідкого палива або вугілля; використання електроенергії (якщо вона вироблена з викопного палива) для електростатка або конвекторів.
2. Охолодження	Робота кондиціонерів, що живляться від електромережі.
3. Гаряче водопостачання	Нагрів води за допомогою газового котла або бойлера.
4. Вентиляція	Робота систем припливно-витяжної вентиляції та рекупаторів.
5. Освітлення	Споживання електроенергії лампами розжарювання, світлодіодними та люмінесцентними лампами (останні два значно ефективніші).
6. Побутові прилади та обладнання	Робота комп'ютерів, серверів, холодильників, плит, телевізорів тощо.

Історично саме експлуатаційний вуглець становив 75-90% загального сліду будівлі за 50-річний термін служби. Тому боротьба з зміною клімату в будівельній галузі десятиліттями зосереджувалася саме на ньому. Ключовим моментом в даному випадку є пряма залежність величини експлуатаційних викидів від джерела енергії. Наприклад, якщо будівля живиться від **сонячних панелей або вітряків**, її

експлуатаційний слід буде близьким до нуля. І навпаки, якщо будівля опалюється **природним газом**, то її експлуатаційний слід буде дуже високим.

Відповідно стратегії зменшення експлуатаційних викидів будівель включають:

1. Підвищення енергоефективності оболонки будівлі:

- ✓ якісна теплоізоляція стін, даху, підлоги та фундаменту.
- ✓ встановлення енергоефективних склопакетів (із низькоемісійним покриттям та аргоном) і якісних рам.
- ✓ усунення містків холоду шляхом відповідного проектування вузлів для запобігання втратам тепла.

2. Встановлення інноваційних інженерних систем та обладнання:

- ✓ Рекуператори повітря – це вентиляційний пристрій, який слугує для енергозбереження та створення комфортного мікроклімату в приміщенні. Його основне завдання - обмінювати тепло між відпрацьованим повітрям, що виводиться з кімнати, та свіжим повітрям, що надходить з вулиці, без їх перемішування.
- ✓ Теплові насоси для опалення будинку - пристрої, які використовують тепло з навколишнього середовища (повітря, ґрунту або води) для нагрівання будинку та забезпечення гарячою водою, працюючи за принципом зворотного холодильника. Вони не виробляють тепло, а переносять його з одного середовища в інше, що робить їх енергоефективними та екологічними.
- ✓ Сучасне енергоефективне обладнання, наприклад, котли конденсаційного типу, LED освітлення, обладнання з високим класом енергоефективності (A+++).

3. Використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ)

- ✓ передбачає встановлення сонячних панелей, вітроагрегатів, теплових насосів та сонячних колекторів для генерації власної електроенергії та тепла, що сприяє зменшенню залежності від викопного палива та підвищенню автономності в умовах нестабільності зовнішніх енергетичних мереж, зниженню витрат та зменшенню шкідливих викидів в довкілля.

4. «Розумний» контроль та управління

✓ передбачає впровадження систем управління будівлею (BMS) або систем автоматизації будівлі (BAS), які є комп'ютеризованими системами контролю та керування обладнанням будівлі, таким як опалення, вентиляція та кондиціонування повітря, освітлення, система безпеки та ліфти, для оптимізації комфорту, енергоефективності та експлуатаційних витрат. Система збирає дані з датчиків та сенсорів, забезпечує централізований інтерфейс користувача для дистанційного керування та може вмикати сигналізацію для технічного обслуговування та сповіщення для безпеки. Технологія BMS підвищує безпеку будівлі, покращує комфорт мешканців та значно зменшує споживання енергії, автоматизуючи роботу системи на основі умов у режимі реального часу та попередньо визначених параметрів.

Раніше експлуатаційні викиди були домінуючими протягом усього життєвого циклу будівлі. Але через суворі норми енергоефективності будівлі стали споживати набагато менше енергії. У міру того, як будівлі стають все більш енергоефективними, наближаючись до стандарту будівель з майже нульовим споживанням енергії (*Nearly Zero-Energy Buildings*), частка *втіленого вуглецю* в загальному балансі викидів будівлі різко зростає.

Втілений вуглець – це сумарні викиди парникових газів, пов'язані з усіма етапами життєвого циклу **до моменту передачі будівлі в експлуатацію**. Іншими словами, це «кількість вуглецю», яка була "витрачена" або "викинута" для створення самого об'єкта.

У сучасних енергоефективних будинках на частку втіленого вуглецю може припадати від 50% до 70% від загальних викидів за весь життєвий цикл.

Втілений вуглець пов'язаний з процесами, які відбуваються під час:

- ✓ видобутку сировини, обробки та виробництва матеріалів, таких як цемент, сталь, деревина тощо.
- ✓ транспортування (перевезення матеріалів до будівельних майданчиків);
- ✓ будівництва (викиди, що виникають безпосередньо під час процесу зведення будівлі);

✓ обслуговування та ремонтів, під час якого можуть замінюватись матеріали або конструктивні елементи.

✓ демонтажу будівлі та утилізації відповідних відходів.

Деякі приклади утворення таких викидів наведені в табл. 1.5.

Таблиця 1.5

Приклади утворення втіленого вуглецю

Процес	Зміст	Приклад
Виробництво матеріалів	Видобуток сировини, транспортування до заводу, безпосереднє виробництво (випалювання, плавка тощо).	Випалювання клінкера для цементу, виплавка сталі, виробництво скла.
Транспортування та будівництво	Транспортування матеріалів від заводу до будмайданчика та процес монтажу (викиди від роботи будівельної техніки).	Викиди від вантажівки, що везе бетон, або від роботи баштового крану.

Оскільки втілений вуглець обумовлений здебільшого процесами, що пов'язані із матеріалами для будівництва, то стратегії зменшення викидів полягають у пошуку низьковуглецевих альтернатив. Низьковуглецеві будівельні матеріали – це матеріали, виробництво, транспортування, монтаж та утилізація яких пов'язані зі значно меншими викидами парникових газів (вуглецевого сліду) порівняно зі звичайними традиційними аналогами. Це не один конкретний тип матеріалу, а скоріше характеристика або підхід до їх вибору, що ґрунтується на аналізі їхнього життєвого циклу. Такі матеріали зазвичай відповідають одному або кільком із наступних принципів:

✓ низька енергоємність виробництва, тобто для їхнього створення потрібно менше енергії (особливо від викопного палива);

✓ використання природних відновлюваних ресурсів;

✓ придатність до переробки, можливість легкого демонтажу та повторного використання;

✓ локальне виробництво для зменшення викидів при транспортуванні;

- ✓ довговічність та ремонтпридатність, що відтерміновує необхідність заміни та утилізації;
- ✓ здатність поглинати та утримувати вуглець з атмосфери.

Для зменшення втіленого вуглецю надзвичайно важливо робити низьковуглецеві вибори ще на етапі проектування, передбачати адаптивність та гнучкість проектних рішень. Вибір місцевих матеріалів та постачальників допомагає зменшити викиди вуглецю від транспортування, одночасно стимулюючи локальну економіку. Прикладами локальних матеріалів є деревина та вироби з неї (перехресно-клеєні панелі, клеєний брус, LVL), відходи агропромисловості (солома, конопля).

Застосування принципів проектування для розбирання, з використанням переважно технологій збірного будівництва, дозволяє розібрати будівлю в кінці її життєвого циклу, мінімізуючи відходи та сприяючи повторному використанню окремих елементів та матеріалів. Це дає змогу застосовувати принципи циркулярності, які сприятимуть досягненню цілей сталого розвитку та пом'якшенню наслідків зміни клімату.

Іншою фундаментальною стратегією проектування є застосування принципів циркулярної економіки під час будівництва та на етапі утилізації, що передбачає вибір перероблених та придатних до переробки матеріалів. Пов'язаною з принципами циркулярної економіки є розбирання відходів, що утворюються внаслідок знесення будівель. Це забезпечує цінні ресурси для створення нових компонентів і матеріалів, придатних для повторного використання. Переробка будівельного брухту дозволяє заощадити енергію на видобуток нової сировини та виробництво нових елементів, зменшуючи загальні викиди. До вторинних матеріалів відносять перероблений бетонний брухт для заповнювача, перероблені пластики для виробництва пластикових блоків, будівельних панелей, труб, гідроізоляційних мембран, віконних профілів та утеплювачів, деревні відходи для виробництва деревно-стружкових плит, фанери тощо.

РОЗДІЛ 2. ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ БУДІВЕЛЬ І МЕТОДИ ЙОГО ОЦІНКИ

2.1. Основні етапи життєвого циклу будівель

Будівництво є однією з найважливіших сфер людської діяльності, що формує умови життя та становить близько 13% світового ВВП, забезпечуючи роботою значну частину населення планети. Основною ознакою традиційної будівельної галузі є надмірне використання енергії, що впливає на процес глобального потепління і зміни клімату. Енергія витрачається при видобутку сировини, виробництві та транспортуванні матеріалів, в процесі будівництва, експлуатації, ремонту та ліквідації будівель. Загальновідомо, що на будівельний сектор припадає приблизно 40% споживання енергії та 36% викидів CO₂ від загального обсягу [30].

Однак, саме будівельна галузь має один з найбільших потенціалів в аспекті внеску на шляху до сталого розвитку і досягнення кліматичної нейтральності. Реалізація критеріїв сталого розвитку в цій галузі може бути досягнута шляхом впровадження інноваційних технологій, націлених на раціональне та ефективне використання природних ресурсів - перехід від використання невідновлюваної сировини, виробів та матеріалів первинної переробки до продукції, створеної на основі рециклінгових технологій та «зелених» конструктивно-технічних рішень, використання відновлюваних джерел енергії та енергоефективних підходів.

Перехід до вуглецево-нейтрального будівництва вимагає комплексного підходу до розробки проектних рішень з урахуванням життєвого циклу всіх елементів будівель і споруд: від виготовлення окремих матеріалів до будівництва, експлуатації та утилізації будівель і споруд після закінчення терміну їх служби, включаючи всі витрати енергії та ресурсів, а також впливу від кожного етапу на навколишнє середовище. Саме ця оцінка слугує ключовим інструментом для науково обґрунтованого визначення ступеня сталості будь-яких будівельних об'єктів.

Важливо зазначити, що вибір проектних рішень повинен бути обумовлений еволюцією розуміння екологічних проблем та новим підходом до втручання: від оцінки впливу *ex post*, з метою обмеження шкоди та екологічних ризиків вже

існуючих робіт і процесів, до *ex ante*, через попередження та дослідження концепцій і стратегій, спрямованих на аналіз будівлі та її частин до початку будівельного процесу, з метою проектування екологічно ефективної системи або системи з низьким впливом на навколишнє середовище [31].

Екологічно відповідальне проектування стає все більш популярним і необхідними в архітектурно-будівельній практиці. Сьогодні воно зосереджено на двох ключових напрямках: розробці стратегій «зеленого» проектування будівель і населених пунктів та аналізі впливу будівельних матеріалів, будівель і споруд на довкілля для розробки ефективних проектних рішень. Це призводить до зміни традиційних підходів до проектування, які тепер потребують переосмислення та адаптації до нових умов і сценаріїв, що враховують повний життєвий цикл будівель. Акцент зміщується не лише на дизайн будівлі, але і на її функціонування протягом усього періоду експлуатації, де часові та просторові аспекти стають ключовими. Це стосується різних рівнів забудованого середовища – від окремих будівель до цілих міських просторів.

Важливість тривалості експлуатації та планування технічного обслуговування будівель стає вирішальною вже на ранніх етапах проектування. Ці аспекти тісно пов'язані з вибором технологій, які, у свою чергу, залежать від екологічного контексту. Таким чином, екологічно відповідальне проектування вимагає комплексного підходу, що враховує всі етапи життєвого циклу будівлі – від створення до утилізації.

Життєвий цикл будівлі – це період часу, який включає всі етапи створення, експлуатації і утилізації будівлі, з моменту народження ідеї у архітектора до її знесення, та подальшої переробки і утилізації. На кожному з етапів життєвого циклу будівля впливає на навколишнє середовище, а саме споживає природні ресурси, енергію та воду, виробляє викиди парникових газів та інші забруднюючі речовини.

Основними етапами життєвого циклу будівлі є: зародження ідеї і проектування, видобуток сировини і виробництво будівельних матеріалів, будівництво, експлуатація та обслуговування, знесення з подальшою утилізацією,

повторне використання або переробка (рис. 2.1). Кожен із цих етапів пов'язаний із інтенсивним використанням природних ресурсів, енергії, води та інших матеріальних ресурсів.

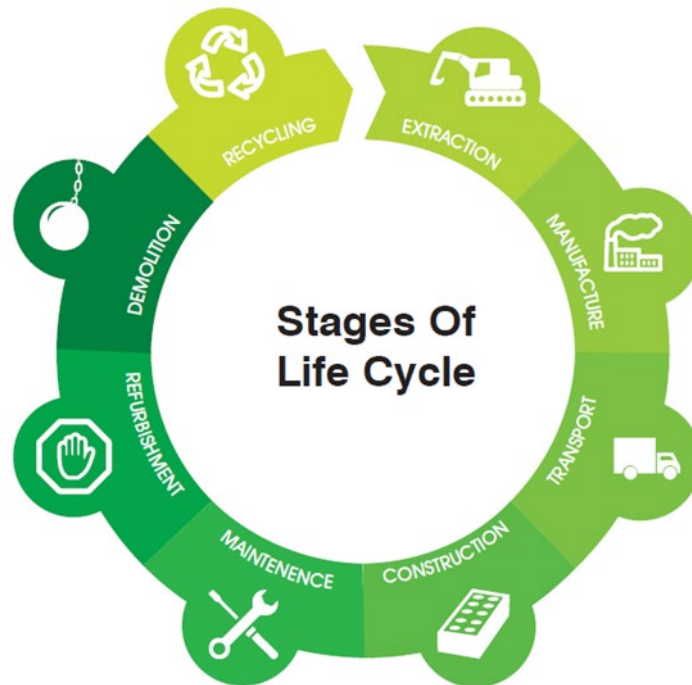


Рис. 2.1 – Етапи життєвого циклу будівлі [32]

Наприклад, енергетичні витрати супроводжують усі етапи: від видобутку сировини та її переробки для виробництва будівельних матеріалів до монтажу конструкцій, експлуатації будівлі (опалення, освітлення тощо), знесення та утилізації або переробки відходів.

Етап проектування є детермінуючою фазою в життєвому циклі будівлі, оскільки саме на цій стадії формуються фундаментальні рішення, що обумовлюють не лише функціональні та естетичні характеристики об'єкта будівництва, а і його довгостроковий вплив на навколишнє середовище. Саме на стадії проектування закладаються стратегічні рішення щодо енергоефективності, ресурсозбереження, застосування екологічно безпечних матеріалів та оптимізації експлуатаційних режимів. Обрані конструктивні рішення, інженерні системи та технології безпосередньо визначають інтенсивність майбутніх парникових викидів, обсяги

споживання енергоносіїв та водних ресурсів, а також ступінь впливу будівлі на навколишнє середовище протягом усього періоду його існування.

Ключовим інструментом забезпечення сталості на етапі проектування виступає методологія "Мислення життєвого циклу" (Life Cycle Thinking, LCT), яка передбачає прийняття рішень з урахуванням усіх фаз існування будівлі, будівельного процесу чи продукту. Концептуально LCT можна визначити як підхід, що розглядає продукт або процес за аналогією з живим організмом, який проходить послідовні стадії від зародження та розвитку до закінчення існування [31].

Видобуток сировини та виробництво будівельних матеріалів. Ще до початку будівельних робіт будівля вже впливає на довкілля. Виробництво будівельних матеріалів і конструкцій пов'язане з переробкою природної сировини (ресурсів), що супроводжується високими енерговитратами. Видобування корисних копалин (піску, глини, залізної руди, вапняку, деревини, бокситів, гравію тощо) супроводжується інтенсивним споживанням енергоносіїв та водних ресурсів із одночасним утворенням значних обсягів відходів, включно з породними відвалами, токсичними сполуками та важкими металами, що потрапляють у ґрунт і водні артерії. Крім виснаження запасів невідновлюваних ресурсів, процес видобутку сировини провокує серйозні порушення в екосистемах: трансформацію ландшафтів, знищення рослинного покриву, деградацію ґрунтів, зменшення біорізноманіття та руйнування екологічного балансу.

Видобувна промисловість використовує техніку, що працює на викопному паливі, а також транспортну інфраструктуру для переміщення сировини до місць переробки. У сучасних умовах глобалізації вплив транспортування на довкілля стає особливо значним. Оскільки значна частина будівельних матеріалів виробляється не місцевими підприємствами, їх перевезення від місця виготовлення до будівельного майданчика створює значне екологічне навантаження ще до початку будівництва.

Дослідження свідчать, що втілена енергія матеріалів становить від 15% до 60% від загального енергоспоживання протягом життєвого циклу будівлі [33].

Окрім того, цементна промисловість, за оцінками експертів, відповідає за приблизно 5% глобальних викидів вуглекислого газу [34].

Фаза виробництва будівельних матеріалів формує найбільше забруднення в ланцюзі постачання та життєвому циклі будівлі через інтенсивне енергоспоживання із супутніми викидами забруднюючих речовин. Високий екологічний слід цього етапу обумовлює необхідність впровадження ресурсоефективних технологій, орієнтованих на зниження енергоємності виробництва, утилізацію промислових відходів та інтеграцію вторинної сировини у виробничі цикли.

Стадія будівництва, будучи ключовою фазою життєвого циклу будівлі, пов'язана з трансформацією проектних рішень у фізичний об'єкт. Цей процес охоплює комплекс робіт: від підготовки території та зведення конструкцій до монтажу інженерних систем і оздоблення. Виробничі операції супроводжуються інтенсивним споживанням матеріальних (бетон, метал, деревина) та енергетичних ресурсів, що генерує прямі та непрямі викиди парникових газів.

Антропогенний вплив проявляється у:

- забрудненні атмосфери (пилові частинки, викиди будівельної техніки);
- деградації гідросфери (забруднення стічних і ґрунтових вод);
- утворенні шумового фону від роботи механізмів;
- генерації відходів, що зберігаються на полігонах.

Суттєвим фактором екологічного навантаження залишається логістика матеріалів, яка потребує використання транспортних засобів з високим споживанням вуглецевих енергоносіїв. Неоптимальні технологічні рішення та недосконале управління процесами посилюють негативний вплив на екосистеми.

Етап експлуатації є найтривалішою фазою життєвого циклу будівлі, що зазвичай становить понад 50 років. Протягом цього періоду споруда потребує постійного ресурсозабезпечення: енергії та води для функціонування інженерних систем, а також матеріалів для проведення ремонтних робіт. Ця фаза характеризується кумулятивним екологічним впливом, що проявляється у:

- генерації побутових відходів і стічних вод;

- викидах вуглекислого газу від енергоспоживання;
- утворенні будівельних відходів під час ремонтів та реконструкції.

Інтенсивність впливу безпосередньо детермінується проектними рішеннями, зокрема, енергоефективністю архітектурно-конструктивних рішень та якістю огорожувальних конструкцій, технологічною якістю будівельно-монтажних робіт, оптимізацією систем управління експлуатацією, екологічною свідомістю мешканців.

Під час реконструкції або капітального ремонту об'єкту відбувається повторне ресурсоспоживання для виробництва нових матеріалів із супутнім утворенням відходів. Обсяг цих матеріальних потоків залежить від адаптаційного потенціалу будівлі, закладеного на етапі проектування - чим вища гнучкість архітектурно-планувальних та конструктивних рішень, тим менше ресурсів потребує будівля під час реконструкції.

Етап знесення завершує життєвий цикл будівлі, передбачаючи демонтаж конструкцій, сортування компонентів та утилізацію матеріалів. Необхідність демонтажу обумовлена технічним старінням (фізичний знос конструкцій) та моральним застаріванням, що визначається невідповідністю сучасним стандартам комфорту. Критерії комфорту, що включають санітарно-гігієнічні параметри та функціональні характеристики, постійно еволюціонують під впливом технологічного прогресу.

Демонтаж генерує значні обсяги будівельних відходів, які часто включають небезпечні речовини, що вимагає спеціалізованих методів утилізації. Проблема ускладнюється відсутністю системного підходу до кінцевої стадії утилізації будівлі на етапі проектування. Вирішення цієї проблеми полягає у впровадженні реверсивного проектування, а прийняті проектні рішення полегшують демонтаж і вибіркове знесення частин будівлі, дозволяючи, де це можливо, здійснювати операції з переробки матеріалів і повернення їх у виробничий цикл.

Етап переробки або повторного використання. Враховуючи масове утворення відходів на завершальній стадії життєвого циклу будівлі, переробка та рециклінг матеріалів набувають критичного значення для зменшення екологічного

сліду будівництва. Сьогодні, архітектори все більше цікавляться характеристиками та зменшенням впливу будівель, які вони проектують, на навколишнє середовище. Такі інструменти, як енергетичне моделювання, допомагають передбачити та, завдяки якісному дизайну, зменшити експлуатаційну енергію в будівлях. Проте, цього недостатньо коли мова йде про виведення будівлі з експлуатації.

Для розуміння, що робити з будівлею на останньому етапі її життєвого циклу, необхідно ще на етапі проектування впроваджувати стратегії та принципи, які гарантуватимуть, що архітектурний об'єкт збереже цінність після того, як він досягне кінця своєї служби. Такі принципи втілені в парадигмі проектування Design for Disassembly (DfD).

Ця методологія передбачає:

- створення будівель з розрахунком на майбутній розбір та відновлення компонентів;
- використання модульних конструкцій та екологічно безпечних матеріалів;
- застосування технологій, що дозволяють повертати матеріали у виробничий цикл.

DfD вимагає переосмислення всього життєвого циклу будівлі - від вибору матеріалів з відомою довговічністю до планування сценаріїв їх подальшого використання. Такий підхід не лише зменшує обсяги відходів, але й стимулює вдосконалення виробничих процесів та будівельних технологій [35].

2.2. Оцінка життєвого циклу.

Оцінка життєвого циклу - це один із інструментів, який був розроблений для визначення цілісного впливу на продукт, послугу, діяльність чи процес навколишнього середовища. Оцінка життєвого циклу оцінює вплив відповідного продукту на навколишнє середовище протягом терміну його служби від “колиски до могили”, тобто від видобутку сировини аж до утилізації такого продукту тощо. Поняття «від колиски до могили» відоме під терміном «Оцінка життєвого циклу» (Life Cycle Assessment, LCA). Це системний метод, який оцінює вплив будь-якого

продукту на довкілля протягом усього його існування — від видобутку сировини («колиски») до утилізації («могили»).

Мета LCA — допомогти зменшити цей шкідливий вплив. Аналізуючи всі етапи життя продукту цілісно, ми отримуємо чітку картину: скільки енергії та ресурсів споживається, які забруднюючі речовини викидаються в повітря, воду та ґрунт. Ця інформація дозволяє порівнювати матеріали та технології, знаходячи кращі альтернативи для створення продуктів з мінімальним екологічним навантаженням.

Використання оцінки життєвого циклу (LCA) у будівельному секторі є ключовим інструментом для досягнення стійкості. Методологія LCA дозволяє точно виміряти та зменшити вплив будівель на довкілля на всіх етапах — від видобутку матеріалів до утилізації. Це безпосередньо сприяє зменшенню шкоди для екосистем та здоров'я людей. У сучасному контексті саме через такі інструменти, як LCA, реалізується концепція сталого розвитку в будівництві, забезпечуючи створення об'єктів з мінімальним екологічним слідом та довгостроковою ефективністю.

Існує багато типів оцінки життєвого циклу (LCA). Основне правило полягає в тому, що рівень деталізації дослідження визначає його глибину: чим більше специфічних даних необхідно отримати, тим повнішою має бути оцінка. Наприклад, звіт, підготовлений для внутрішнього використання компанією, матиме менш жорсткі вимоги, ніж звіт, призначений для публікації або екологічного маркування продукції.

Окрім класичної LCA, існує ціла група пов'язаних оціночних інструментів, що базуються на її принципах:

- Екологічні декларації продукції (EPD), які розробляються на основі результатів LCA;
- Галузеві дослідження, адаптовані під стандарти конкретних видів продукції;
- Цільові аналізи, такі як розрахунок вуглецевого чи водного сліду;

- Соціальна оцінка життєвого циклу (s-LCA), що враховує соціальні аспекти виробництва;
- Дослідження з довгостроковим моніторингом, спрямовані на оцінку динамічних змін впливів протягом часу.

Унікальність методології LCA полягає у її гнучкості — вона забезпечує можливість проведення найрізноманітніших спеціалізованих оцінок, спираючись на єдину системну та науково обґрунтовану основу.

Дослідження ОЖЦ передбачає ретельну інвентаризацію енергії та матеріалів, необхідних по всьому галузевому ланцюжку створення вартості продукту, процесу або послуги, а також розрахунок відповідних викидів у навколишнє середовище. Таким чином, оцінка життєвого циклу оцінює кумулятивний потенційний вплив на довкілля. Метою є документування та покращення загального екологічного профілю продукту.

Методологічні засади оцінки життєвого циклу (LCA) визначені міжнародними стандартами серії ISO 14040 та ISO 14044, розробленими Міжнародною організацією зі стандартизації (ISO).

ISO 14040:2006 “Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework” встановлює основні принципи, структуру та етапи проведення LCA, включаючи визначення мети і меж дослідження, інвентаризацію вхідних і вихідних потоків, оцінку впливу на довкілля та інтерпретацію результатів [36]. ISO 14044:2006 “Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines” деталізує вимоги до збору даних, проведення розрахунків, аналізу чутливості, перевірки достовірності результатів і документування звітів [37].

Згідно з цими стандартами, процес LCA охоплює чотири взаємопов’язані етапи (рис. 2.2):

1. Визначення мети та меж дослідження (Goal and Scope Definition);
2. Інвентаризаційний аналіз життєвого циклу (Life Cycle Inventory, LCI);
3. Оцінка впливу життєвого циклу (Life Cycle Impact Assessment, LCIA);
4. Інтерпретація результатів (Interpretation).

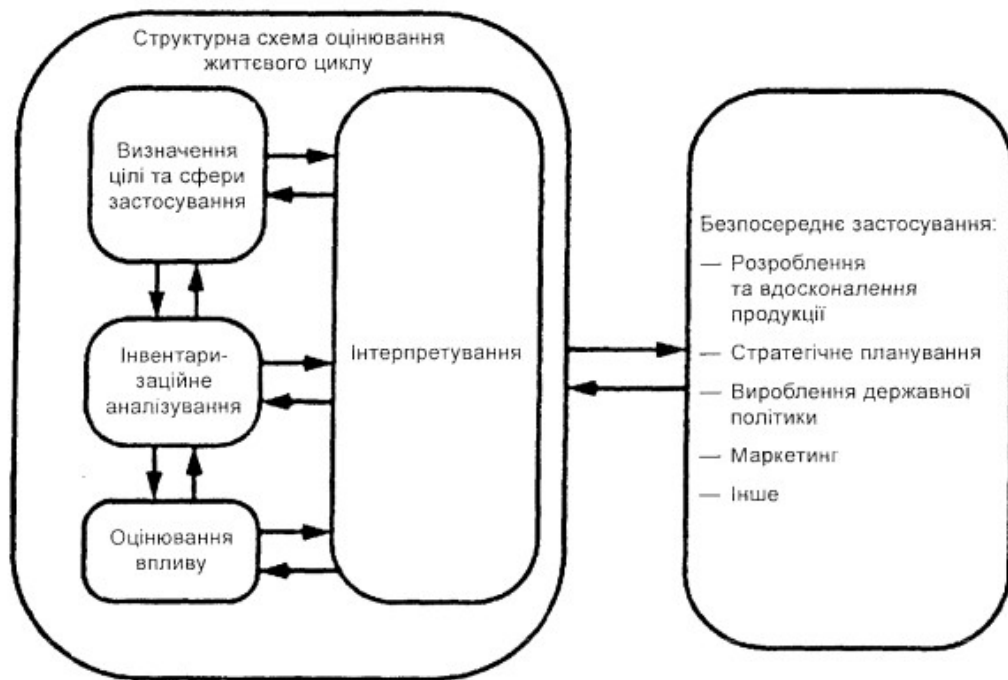


Рис. 2.2 – Етапи оцінки життєвого циклу [36]

Використання стандартів ISO забезпечує порівнянність, наукову достовірність і прозорість результатів LCA, що робить їх придатними для міжнародного застосування, екологічного маркування продукції та розроблення стратегій сталого розвитку у будівельній галузі. Етапи часто взаємозалежні в тому сенсі, що результати одного етапу впливають на завершення інших етапів. Тому жоден з етапів не можна вважати завершеним, доки не буде завершено все дослідження.

Крок 1. Визначення мети та сфери застосування оцінки життєвого циклу.

Першим етапом проведення оцінки життєвого циклу (LCA) відповідно до стандартів ISO 14040 та ISO 14044 є визначення мети та сфери дослідження (Goal and Scope Definition). На цьому етапі формулюються основні параметри дослідження, які задають напрямок усієї оцінки. Вони часто називаються параметрами проєктування дослідження (Study Design Parameters, SDP) і включають визначення цілей, меж системи, об'єкта дослідження, функціональної одиниці та рівня деталізації аналізу.

Метою LCA може бути, наприклад:

- оцінка екологічного впливу будівлі протягом усього її життєвого циклу;

- порівняння двох будівельних матеріалів або технологій (наприклад, традиційного бетону та екобетону);
- розробка екологічної декларації продукції (EPD);
- оптимізація проектних рішень для зменшення вуглецевого сліду.

Сфера дослідження (Scope) визначає межі системи — тобто, які стадії життєвого циклу включаються в аналіз.

Для будівельних об'єктів або будівельної продукції етап визначення мети та сфери застосування є критичним, оскільки саме тут вирішується:

- які життєві фази будуть враховані (виробництво, експлуатація, ремонт, кінець життєвого циклу);
- які екологічні показники оцінюватимуться (викиди CO₂, енергоспоживання, утворення відходів тощо);
- які дані необхідно зібрати (матеріальні потоки, споживання ресурсів, джерела енергії).

Таким чином, чітке визначення мети та сфери оцінки забезпечує наукову достовірність і порівнянність результатів LCA. Для будівельної галузі це означає, що усі подальші розрахунки мають базуватись на прозорій логіці — від вибору матеріалів до сценарію утилізації будівлі.

Крок 2. Інвентаризаційний аналіз життєвого циклу (Life Cycle Inventory — LCI).

На другому етапі оцінки життєвого циклу (LCA) проводиться інвентаризаційний аналіз, або аналіз запасів видобутку та викидів (LCI). Його мета — зібрати, систематизувати та кількісно оцінити всі потоки вхідних і вихідних ресурсів, пов'язаних із життєвим циклом продукту, будівлі чи послуги.

У процесі LCI розглядаються:

- *входи системи (inputs)* — природні ресурси, матеріали, енергія, вода, допоміжні речовини, що надходять із навколишнього середовища або інших виробничих процесів;
- *виходи системи (outputs)* — усі види викидів у повітря, воду чи ґрунт, відходи, побічні продукти, шумове або теплове забруднення тощо.

Результатом цього етапу є створення детального балансу матеріальних і енергетичних потоків у межах визначеної системи.

Під час LCI для будівель або будівельної продукції враховують, зокрема:

- *етап видобутку та виробництва матеріалів* — кількість використаної сировини (цемент, сталь, деревина, ізоляційні матеріали), споживання енергії та пов'язані з цим викиди CO₂;
- *етап транспортування* — відстані, тип транспорту, витрати палива та викиди;
- *етап будівництва* — енергоспоживання техніки, використання води, утворення відходів;
- *етап експлуатації будівлі* — споживання електроенергії, тепла, води, обсяг викидів від систем опалення, вентиляції, кондиціонування;
- *етап демонтажу та утилізації* — відходи знесення, можливість повторного використання або переробки матеріалів.

LCI формує фундамент для подальшої оцінки впливів (LCIA). Точність і достовірність результатів LCA безпосередньо залежать від повноти зібраних даних на цьому етапі.

Крок 3. Оцінка впливів життєвого циклу (Life Cycle Impact Assessment — LCIA).

На третьому етапі методології LCA проводиться оцінка впливів життєвого циклу (LCIA). Її мета — перетворити кількісні дані, зібрані під час інвентаризаційного аналізу (LCI), у зрозумілі показники екологічного впливу, що дозволяють робити обґрунтовані екологічні та управлінські рішення.

Основні етапи LCIA відповідно до стандартів ISO 14040 та ISO 14044.

1. Вибір категорій впливів, індикаторів та моделей характеристик.

На цьому етапі визначаються, які саме аспекти впливу будуть аналізуватись — наприклад, глобальне потепління, виснаження озонового шару, кислотність середовища, евтрофікація, токсичність для людини, споживання прісної води тощо.

Стандарти ISO вимагають, щоб вибір охоплював комплексний набір екологічних питань, релевантних до географічного та галузевого контексту.

Часто використовують готові методики оцінки, такі як TRACI (США), ReCiPe (ЄС), CML, AWARE, або інші, що включають необхідні набори коефіцієнтів впливу.

2. Класифікація результатів інвентаризації.

Результати етапу LCI (списки усіх викидів та використаних ресурсів) розподіляються за обраними категоріями впливу. Наприклад, викиди CO₂, CH₄, N₂O — у категорію глобального потепління; NO_x та SO₂ — у кислотність середовища; важкі метали або органічні сполуки — у токсичність для людини тощо.

Класифікація зазвичай виконується з використанням спеціалізованих баз даних та програмного забезпечення (SimaPro, GaBi, OpenLCA тощо).

3. Характеристика (Characterization).

На цьому кроці проводиться кількісне перетворення даних: кожен потік впливу переводиться у спільну одиницю вимірювання в межах відповідної категорії. Для цього використовуються коефіцієнти характеристики (еквівалентності). Наприклад, для оцінки потенціалу глобального потепління застосовують одиницю CO₂-еквівалент (CO₂-eq), де: 1 кг CO₂ = 1 CO₂-eq; 1 кг CH₄ ≈ 28 CO₂-eq; 1 кг N₂O ≈ 265 CO₂-eq. Таким чином, усі викиди різних газів парникового ефекту переводяться до єдиної шкали, що дозволяє порівнювати їхній внесок у зміну клімату.

Крок 4. Інтерпретація результатів (Life Cycle Interpretation).

Етап інтерпретації є завершальною фазою оцінки життєвого циклу (LCA). Його головна мета — перетворити отримані результати на обґрунтовані висновки і практичні рекомендації, які можна використовувати для прийняття екологічно зважених рішень.

Відповідно до стандарту ISO 14044, на цьому етапі проводиться:

- перевірка повноти даних (чи враховані всі релевантні етапи життєвого циклу);
- оцінка чутливості результатів (як зміни у вихідних даних впливають на кінцеві висновки);

- аналіз узгодженості (чи відповідають використані методи визначеним на початку цілям і межах дослідження).

Метою інтерпретації є виявлення альтернативи, яка має найменший сукупний негативний вплив на довкілля — тобто створює мінімальні наслідки для атмосферних, водних і земельних екосистем протягом усього життєвого циклу: від видобутку ресурсів до утилізації.

У контексті оцінки життєвого циклу будівель або будівельної продукції, інтерпретація результатів дозволяє:

- визначити, які матеріали, конструктивні рішення або технології мають найменший екологічний вплив;
- обґрунтувати вибір енергоефективних або низьковуглецевих рішень у проектуванні;
 - сформулювати рекомендації для оптимізації експлуатаційної фази (наприклад, покращення теплової ефективності або вибір матеріалів з нижчим потенціалом глобального потепління);
- забезпечити відповідність будівель екологічним стандартам та сертифікаційним системам (LEED, BREEAM, DGNB, EDGE тощо).

2.3. Програмне забезпечення та бази даних для аналізу життєвого циклу будівель

Аналіз життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) – це науковий метод, який використовується для оцінки впливу продукції чи послуги на навколишнє середовище протягом усього їхнього життєвого циклу — від видобутку сировини та виробництва до використання та утилізації. Програмні інструменти аналізу життєвого циклу (LCA) розроблені для підтримки цього процесу. Вони забезпечують комплексне уявлення про екологічний вплив продукту та допомагають приймати обґрунтовані рішення у сфері сталого розвитку.

Проведення оцінки життєвого циклу допомагає виявити сфери для вдосконалення, зменшити вплив на навколишнє середовище та досягти цілей у

галузі сталого розвитку. Ці інструменти дають змогу оцінювати екологічні характеристики своїх продуктів і послуг, гарантуючи, що на кожному етапі життєвого циклу вони роблять найбільш екологічно вивірений вибір.

У минулому проведення детального аналізу життєвого циклу (LCA) для будівель було пов'язане з обширними ручними розрахунками та трудомістким збором даних, що робило цей процес ресурсоємним і малодоступним для багатьох проєктів. Сьогодні інноваційне програмне забезпечення для LCA в архітектурі кардинально змінює цю оцінку, значно підвищуючи точність, ефективність і знижуючи складність.

Цифрові LCA-рішення для будівництва, такі як Athena Impact Estimator, Tally та One-Click LCA, спрощують оцінку будівельних матеріалів і процесів. Ці інструменти мають інтуїтивно зрозумілий, зручний інтерфейс, який дозволяє спеціалістам зі стійкого розвитку, фахівцям в будівництві та цивільній інженерії і менеджерам проєктів швидко моделювати різні будівельні сценарії та оцінювати їхній вплив на довкілля. Завдяки вбудованим можливостям аналізу сценаріїв зацікавлені сторони можуть легко порівнювати варіанти дизайну, вибір матеріалів і методи будівництва, щоб визначити альтернативи з найнижчим впливом.

Основна сила інструментів моделювання екоефективності полягає в їхніх потужних базах даних. Ці платформи інтегрують великі, попередньо заповнені бази даних, що містять точну інформацію про вплив на довкілля різних будівельних продуктів, матеріалів і систем. Автоматизуючи процеси збору даних, програмні рішення усувають потребу в ручній роботі з пошуку та перевірки екологічних даних, значно скорочуючи час, необхідний для повної оцінки будівлі.

Сучасне програмне забезпечення LCA також безперебійно інтегрує специфічні для проєкту дані, такі як відомості матеріалів (Bills of Materials, BOM), розрахунки енергоефективності та місцеві особливості майданчика. Ця автоматизація забезпечує точність і узгодженість у результатах LCA, тісно відповідаючи реальним умовам проєкту. Спрощуючи інтеграцію даних, ці інструменти дають командам можливість швидко створювати комплексні, прозорі

оцінки устойчивості, які відповідають широко визнаним стандартам і сертифікатам, таким як LEED і BREEAM.

Інноваційне програмне забезпечення LCA для будівельних об'єктів знижує бар'єри для сталого будівництва, популяризує доступ до детальних оцінок стійкості. Завдяки збільшеній доступності та простоті використання, більше будівельних проєктів можуть ефективно впроваджувати методології LCA, забезпечуючи значне покращення екологічних показників у всьому довіллі.

Основні категорії програмного забезпечення для оцінки життєвого циклу включають:

1. Спеціалізоване ПЗ для глибокого аналізу.
2. BIM-інтегроване програмне забезпечення для оцінки життєвого циклу.

2.3.1. Спеціалізоване програмне забезпечення для оцінки життєвого циклу

Ці програми є найпотужнішими інструментами, які використовують професіонали для проведення детальних досліджень у відповідності до вимог міжнародних стандартів ISO 14040, який містить принципи та рамки оцінок життєвого циклу, та ISO 14044, в якому викладені вимоги до проведення оцінки.

Найбільш популярними серед цієї групи є SimaPro, Sphera's LCA for Experts та openLCA.

SimaPro

<https://simapro.com/>

SimaPro – це програмне забезпечення для аналізу життєвого циклу (LCA), яке обирають науково-дослідні інститути та консультанти.

Один з найпопулярніших і найавторитетніших інструментів на ринку. Він пропонує дуже гнучку платформу з великою кількістю баз даних (наприклад, ecoinvent) і методів оцінки. SimaPro є інструментом, який забезпечує комплексну структуру проведення аналізу життєвого циклу. Він має велику базу даних інвентаризації життєвого циклу (LCI), що містить інформацію про тисячі

матеріалів і процесів. Це значно полегшує збір та аналіз даних на всіх етапах життєвого циклу продукту.

SimaPro дозволяє користувачам налаштовувати моделювання LCA шляхом коригування параметрів та вхідних даних для відображення специфічних галузевих або регіональних особливостей. Ця функція робить проведення аналізу, адаптованого до конкретних потреб, простішим і ефективнішим.

Крім того, SimaPro дає змогу створювати індивідуальні звіти, які чітко і лаконічно узагальнюють результати LCA. Це спрощує зацікавленим сторонам процес розуміння результатів дослідження та прийняття обґрунтованих рішень.

SimaPro використовують підприємства, урядові установи та науково-дослідні інститути для проведення аналізу життєвого циклу продуктів і процесів у різних галузях, включаючи будівництво, енергетику та харчову промисловість. Це потужний і гнучкий інструмент, який допомагає організаціям приймати обґрунтовані рішення щодо свого впливу на довкілля та покращувати показники стійкості.



<https://sphera.com/>

Sphera's LCA for Experts (колишня назва GaBi) поєднує програмне забезпечення для моделювання та звітності з аналізу життєвого циклу (LCA) з надійними і узгодженими екологічними даними.

Sphera's LCA for Experts (колишня назва GaBi) поєднує програмне забезпечення для моделювання та звітності з аналізу життєвого циклу (LCA) з надійними і узгодженими екологічними даними.

Sphera – це ще один популярний інструмент для проведення аналізу життєвого циклу (LCA), який широко використовується в усьому світі. Він відомий своєю великою базою екологічних даних, що охоплює широкий спектр галузей і географічних регіонів. Маючи понад 20 галузевих баз даних, аналітика Sphera дозволяє оцінювати вплив на довкілля на кожному етапі життєвого циклу продукції та приймати рішення, засновані на фактах.

Sphera дозволяє користувачам налаштовувати моделювання LCA шляхом зміни параметрів та вхідних даних для відображення специфічних галузевих або

регіональних особливостей. Ця функція полегшує проведення аналізу, адаптованого до конкретних потреб. Крім того, Sphera/GaBi дає змогу створювати індивідуальні звіти, які чітко і лаконічно узагальнюють результати LCA. Це спрощує зацікавленим сторонам процес розуміння результатів аналізу та прийняття обґрунтованих рішень.

Sphera можна інтегрувати з іншими інструментами сталого розвитку, такими як програмне забезпечення для розрахунку вуглецевого сліду, щоб забезпечити більш комплексний огляд впливу на довкілля.

Sphera/GaBi використовують підприємства, урядові установи та науково-дослідні інститути для проведення LCA продуктів і процесів у різних галузях, включаючи будівельну, транспортну та споживчі товари. Це потужний і гнучкий інструмент, який допомагає організаціям приймати обґрунтовані рішення щодо свого впливу на довкілля та покращувати показники сталості. GaBi часто продається як частина набору продуктів «Sphera Sustainability Solutions», який також включає інші програмні інструменти, пов'язані зі сталим розвитком.



www.openlca.org/

OpenLCA – це унікальне безкоштовне програмне забезпечення з відкритим кодом для професійного екологічного, соціального та економічного аналізу життєвого циклу.

Це потужна альтернатива комерційним рішенням. Має активну спільноту, підтримує різні бази даних і плагіни. Ідеально підходить для ознайомлення з LCA та для організацій з обмеженим бюджетом.

Серед його можливостей — проведення LCA, розрахунок вуглецевого сліду, еко-дизайн, створення екологічних декларацій на продукцію (EPD), аналіз вартості життєвого циклу (LCC) та оцінка соціального життєвого циклу (SLCA).

OpenLCA розроблений гнучким і адаптивним, що дозволяє користувачам налаштовувати програмне забезпечення відповідно до своїх конкретних потреб і проводити широкий спектр досліджень у сфері стійкості. OpenLCA підтримує

широкий спектр методів оцінки впливу, що дає змогу користувачам вибрати метод, найбільш відповідний для їхнього конкретного дослідження.

Програмне забезпечення дозволяє проводити інвентаризаційний аналіз продуктів або послуг, включаючи дані про сировину, споживання енергії та викиди. Загалом, OpenLCA — це потужний і гнучкий інструмент для проведення LCA, доступний для широкого кола користувачів, який надає низку функцій для проведення детальних аналізів стійкого розвитку та комунікації результатів із зацікавленими сторонами.

2.3.2. BIM-інтегроване програмне забезпечення для оцінки життєвого циклу

Ця категорія найбільш актуальна для архітекторів і інженерів, оскільки дозволяє проводити аналіз безпосередньо в середовищі BIM (Revit, ArchiCAD тощо). Розглянемо найбільш популярні програмні продукти.



<https://oneclicklca.com/>

One Click LCA – це програмне забезпечення для проведення аналізу життєвого циклу (LCA) та створення екологічних декларацій продукції (EPD), розроблене спеціально для будівельної галузі.

One Click LCA – це хмарний програмний інструмент для проведення аналізу життєвого циклу (LCA) та оцінки впливу на довкілля будівель, інфраструктури та інших будівельних проєктів. Представляє собою веб-платформу, яка інтегрується з основними BIM-інструментами (Revit, ArchiCAD), а також з Excel. Вона автоматизує експорт кількості матеріалів з моделі і автоматично визначає вплив на навколишнє середовище. Широко використовується для сертифікації будівель (LEED, BREEAM, DGNB).

Цей програмний комплекс підтримує роботу з різними типами об'єктів та матеріалів, включаючи:

- Будівлі (нове будівництво та існуючі об'єкти).
- Інфраструктуру (транспорт, комунікації, інженерні мережі).
- Об'єкти реконструкції та реновації.

- Будівельні матеріали та вироби.
- Портфелі об'єктів (комплексна оцінка груп будівель).

Програма містить велику базу даних будівельних матеріалів, включаючи дані щодо втіленого вуглецю та інші показники впливу на довкілля. Ця база даних дозволяє користувачам розрахувати вплив матеріалів будівлі на навколишнє середовище та знайти більш екологічні альтернативи.

Програмне забезпечення також можна використовувати для аналізу енергота водоспоживання будівель і визначення можливостей для підвищення енергоефективності та ефективності використання води.



Tally Life Cycle Assessment (tallyLCA) – це плагін для програми Autodesk Revit, для проведення аналізу життєвого циклу (LCA) та оцінки втіленого вуглецю (embodied carbon) у будівельних проєктах.

<https://choosetally.com/>

Tally Life Cycle Assessment працює безпосередньо в середовищі BIM-моделі, автоматично аналізуючи дані про матеріали, об'єми та властивості будівельних елементів. Інструмент дозволяє проводити детальну оцінку впливу матеріалів на навколишнє середовище на всіх етапах життєвого циклу - від виробництва до утилізації. Він використовує перевірені бази даних, такі як EC3 та GaBi, що надає доступ до надійної інформації про вуглецевий слід різних матеріалів і допомагає порівнювати альтернативні рішення.

TallyLCA надає змогу візуалізувати результати аналізу за допомогою зрозумілих графіків і діаграм, виділяючи елементи з найбільшим впливом на довкілля. Він підтримує стандарти сертифікації LEED, BREEAM та LBC і генерує звіти, необхідні для подання на сертифікацію. Крім того, користувачі можуть моделювати різні сценарії проєкту, порівнюючи варіанти дизайну, матеріалів та конструкцій для оптимізації екологічних показників.

Інструмент призначений для архітекторів, BIM-менеджерів, інженерів-будівельників та консультантів з устійчивості, які працюють у Revit і потребують

інтеграції екологічного аналізу в процес проєктування. Результати роботи можна експортувати у PDF, Excel або HTML для подальшого використання.

Головною перевагою TallyLCA є зосередженість на втіленому вуглеці та глибока інтеграція з Revit, що дозволяє уникнути імпорту даних та проводити аналіз безперервно в ході розробки проєкту. Інструмент особливо ефективний для проєктів, орієнтованих на міжнародні стандарти та сертифікацію.



[www.buildingtransparency.org/
tools/ec3/](http://www.buildingtransparency.org/tools/ec3/)

Embodied Carbon in Construction Calculator (EC3) – це безкоштовний інструмент з відкритим доступом та допоміжна база даних EPD, яка стимулює вибір продукції з низьким рівнем викидів вуглецю для досягнення цілей сталого розвитку будівельних проєктів.

EC3 Tool – це калькулятор втіленого вуглецю в будівництві, є безкоштовною хмарною платформою, яка допомагає будівельній галузі проводити бенчмаркінг (порівняльний аналіз на основі еталонних показників), оцінювати та знижувати втілений вуглець у будівельних об'єктах шляхом використання Екологічних декларацій продукції (EPD). Розроблений за участю таких партнерів, як Carbon Leadership Forum та Building Transparency, інструмент інтегрує дані про обсяги матеріалів із проєктів або BIM-моделей з великою базою даних EPD, що дає змогу підбирати низьковуглецеві альтернативи.

Функціонал інструменту дозволяє користувачам встановити базовий рівень втіленого вуглецю для матеріалів і проєктів та допомагає визначити можливості для зниження втіленого вуглецю шляхом порівняння матеріалів та вибору альтернатив з меншим впливом на довкілля. Інструмент інтегрується з BIM, використовуючи дані з інформаційних моделей будівлі або будівельних кошторисів для розрахунку втіленого вуглецю на рівні проєкт. Для обчислень використовуються комплексна база цифрових, незалежно перевірених Екологічних декларацій продукції (EPD) для надання даних про вуглецевий слід.

Користувачами ЕС3 Tool можуть бути архітектори та підрядники для створення низьковуглецевих проектів і вибору матеріалів під час закупівель, тоді як замовники проектів можуть використовувати його для встановлення вимог та обмежень на втілений вуглець для майбутніх будівель.

Загалом важливість розглянутих інструментів полягає у стимулюванні попиту на низьковуглецеві рішення, полегшуючи оцінку та порівняння матеріалів, що створює ринок для стійкого будівництва, сприяє прозорості, заохочуючи виробників розкривати вплив своєї продукції на довкілля та стимулює інновації у сфері низьковуглецевих матеріалів.

2.4. Системи екологічної сертифікації будівельних об'єктів.

Для широкого впровадження у практику проектування та будівництво екологічних, стійких будівель та сприяння будівництва у всьому світі у 2002 р. було створено Всесвітню Раду з Екологічного Будівництва (World Green Building Council) - глобальна некомерційна мережа національних «Зелених Рад з будівництва» [38].

Діяльність ради направлена на зміну та перетворення будівельного сектора економіки у трьох напрямках: негативний вплив на клімат; стан здоров'я та благополуччя жителів; економія ресурсів та їх кругообіг. Організація має розгалужену мережу рад по всьому світу, близько 75-ти. Завдяки підходу до системних змін ця мережа виводить будівельну галузь до екологічно чистого, справедливого та стійкого середовища з нульовим викидом вуглецю.

Одним із інструментів впровадження екологічних технологій в будівництво стала система екологічної «зеленої» сертифікації будівель, або оцінювання будівельних об'єктів відповідно до вимог сталого розвитку.

Екологічна сертифікація будівель — це система оцінювання рівня сталості та екологічної ефективності об'єктів будівництва на всіх етапах їх життєвого циклу — від проектування і будівництва до експлуатації, реконструкції та утилізації. Вона ґрунтується на комплексному аналізі впливу будівлі на довкілля, здоров'я людей

та економіку, з метою мінімізації негативного впливу і підвищення якості життєвого середовища.

Основна мета екологічної сертифікації — зменшення екологічного сліду будівельного сектору та стимулювання переходу до сталого розвитку.

Ключові принципи включають:

- енергоефективність та використання відновлюваних джерел енергії;
- раціональне використання води та матеріалів;
- зменшення викидів CO₂ і відходів;
- якість внутрішнього середовища (освітлення, вентиляція, комфорт, акустика);
- врахування життєвого циклу будівлі (LCA – Life Cycle Assessment);
- соціальна сталість — безпека, інклюзивність, доступність.

Існує кілька основних міжнародних систем екологічної сертифікації, визнаних у більшості країн світу. Найвідоміші лідери в зеленій сертифікації BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method, Великобританія) та LEED (Leadership in Energy and Environmental Design, США), а також інші стандарти, такі як: HQE (Haute Qualité Environnementale, Франція), , CASBEE (Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency, Японія), Green Star (Австралія, Нова Зеландія), DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, Німеччина) та ін.

Американський стандарт LEED (Leadership in Energy and Environmental Design, укр. Лідерство у сфері енергоефективного та екологічного проектування) розроблений у США у 1998 році є національним стандартом США для проектування високопродуктивних стійких будівель [39].

В стандарті LEED використовується 100-бальна система оцінки за наступними категоріями (рис. 2.3, а):

- *Вибір місця*: включає вибір точного місця для будівництва та збереження або навіть відновлення існуючих природних середовищ існування та дикої природи;

- *Розташування та транспорт*: подорожі мають значний вплив на викиди CO₂ та зміну клімату. Близькість до існуючого громадського транспорту та заохочення сталих видів мобільності є перевагами;

- *Управління водними ресурсами*: конструкції і інженерні системи будівлі повинні мінімізувати споживання води, збирати дощову воду та оптимізувати переробку стічних вод;

- *Управління енергією* : енергоефективність є основою сертифікації LEED. Впровадження стратегій пасивного проектування, заснованих на кліматичних умовах, використання відновлюваних джерел енергії та створення систем управління є важливими для сертифікації LEED;

- *Якість повітря в приміщенні*: постійний моніторинг якості повітря в приміщенні та ефективна вентиляція є факторами, що враховуються в рамках LEED;

- *Матеріали*: заохочується використання місцевих, екологічних сертифікованих матеріалів з низьким впливом на навколишнє середовище;

- *Інноваційність та дизайн*: у цій категорії відзначаються інноваційні підходи та креативні рішення, що виходять за рамки стандартних вимог сертифікації;

- *Місцеві та регіональні пріоритети*: це заохочує проекти нерухомості враховувати екологічні, соціальні та здорові пріоритети місця розташування проекту.

Будинки, сертифіковані за цим стандартом, мають 4 рівні сертифікації (рис. 2.3, б):

- Проста сертифікація: 40-49 балів
- Срібна: 50–59 балів
- Золота: 60–79 балів
- Платинова: 80 балів та вище.

The 8 LEED certification categories

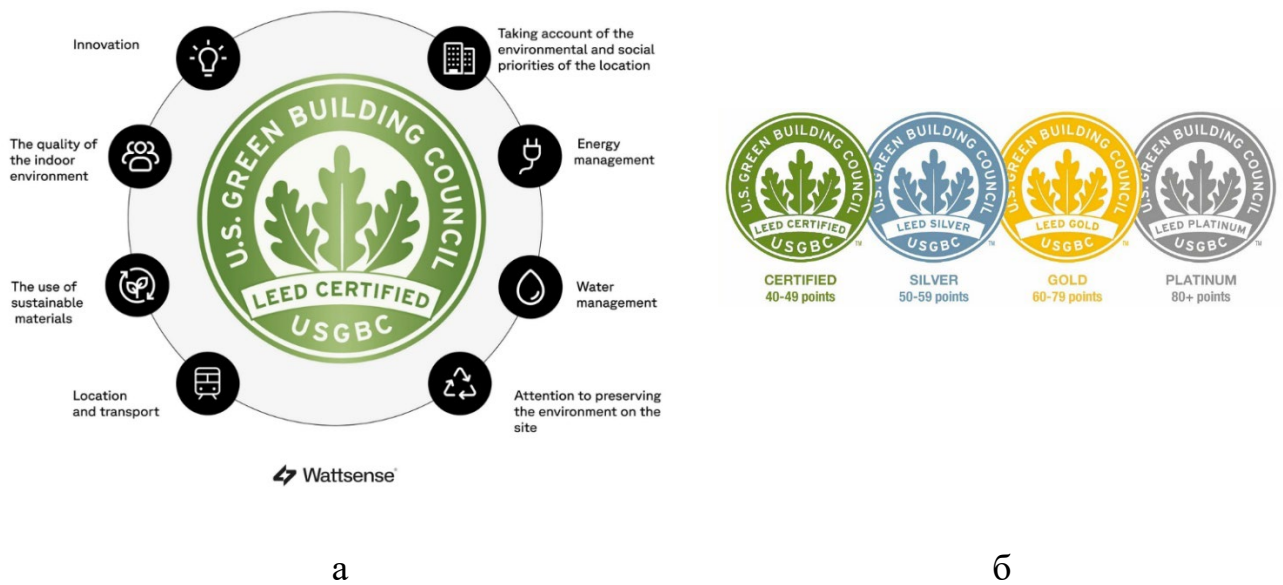


Рис. 2.3 - Американський стандарт екологічної сертифікації будівель LEED: а – категорії за якими оцінюється будівля; б – рівні сертифікації [39]

Британська система BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method). BREEAM – це незалежна, всебічна, міжнародна система сертифікації та оцінки стійкості проектів окремих будівель, спільнот та інфраструктурних проектів, які можуть проводитись на кількох етапах життєвого циклу, так і на всіх стадіях проектування, будівництва, експлуатації та ремонту.

Розроблена у 1990 році компанією BRE Global. За системою BREEAM об'єкти оцінюються за дев'ятьма категоріями: управління, енергія, здоров'я та благополуччя, транспорт, вода, матеріали, відходи, землекористування та екологія, забруднення (рис. 2.4).

Система BREEAM, при сертифікації охоплює низку категорій, від забруднення до управління та визначає їх стійкість. Кожна з цих категорій відноситься до найбільш впливових факторів, включаючи дизайн з низьким рівнем впливу та скорочення викидів вуглецю; довговічність та стійкість конструкції; адаптація до зміни клімату; та екологічна цінність та захист біорізноманіття.



Рис. 2.4 – Категорії екологічної оцінки будівель в системі BREEAM [40]

В основі сертифікації об'єктів будівництва у системі BREEAM лежить рейтинг. Кожному проекту присуджується по кожній категорії ряд зірок і варіюється від Прийнятного до Пройденого, Хорошого, Дуже хорошого, Відмінного і Видатного, що і відображає кількість присуджених зірок на сертифікаті (максимум шість зірок). Система дозволяє сертифікувати будівлі на різних етапах — від проектування до експлуатації та капітального ремонту.

Система DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – Німецька рада зі сталого будівництва) є однією з провідних міжнародних систем екологічної сертифікації будівель, що поєднує екологічні, економічні, соціальні та технічні аспекти сталого розвитку. Її розроблено у Німеччині у 2007 році, а з 2009 року вона офіційно функціонує як незалежна некомерційна організація DGNB e.V.

Основна мета системи DGNB — комплексно оцінювати якість будівель і міських територій за принципом “життєвого циклу”, враховуючи не лише екологічні, але й економічні, соціокультурні, технічні, функціональні та процесуальні параметри.

На відміну від більшості інших систем (LEED, BREEAM, EDGE), DGNB робить акцент на збалансованості трьох вимірів сталості (рис. 2.5):

- екологічна якість (Environmental Quality): в цю категорію включені енергоефективність, викиди CO₂, використання ресурсів, вплив на довкілля протягом життєвого циклу, якість повітря;
- економічна ефективність (Economic Quality): включає витрати життєвого циклу, гнучкість будівлі, економічна стійкість, потенціал перепрофілювання;
- соціокультурна та функціональна якість (Sociocultural and Functional Quality): розглядає комфорт користувачів (освітлення, акустика, температура), естетику, доступність, безпеку.

Також оцінюються:

- технічна якість (Technical Quality): включає зручність експлуатації, надійність систем, пожежну безпеку, захист від шуму, ремонтпридатність;
- процесна якість (Process Quality): ефективність управління проектом, якість будівництва, інтеграція сталих підходів на етапі проектування;
- якість локації (Site Quality): урбаністичний контекст, транспортна доступність, соціальна інфраструктура, кліматичні умови.

Система DGNB оцінює загальний індекс сталості будівлі (Sustainability Index), який формується на основі зваженої суми балів усіх критеріїв. Рівень сертифікації залежить від отриманого відсотка виконання вимог і представлений Бронзовим, Срібним, Золотим та Платиновим рівнем сертифікації. Додатково існує рівень DGNB Diamond, який присвоюється за високу архітектурну якість об'єкта (рис. 2.6).

DGNB охоплює широкий спектр об'єктів: нове будівництво (житлове, громадське, промислове, тощо); існуючі будівлі (модернізація або експлуатація); квартали, мікрорайони та міські райони (DGNB Urban Districts).



Рис. 2.5 – Категорії сертифікації будівель в системі DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen) [41]

	 Platinum	 Gold	 Silver	 Bronze*
Total performance index	80% and higher	65% and higher	50% and higher	35% and higher
Minimum performance index	65%	50%	35%	-- %

Рис. 2.6 - Рівні сертифікації в системі DGNB [41]

У 2020-х роках DGNB розробила версії системи для реконструкції та сталого демонтажу будівель, що робить її особливо актуальною для відбудови в післявоєнних умовах.

Система DGNB використовується більш ніж у 30 країнах світу і має інтернаціональну версію – DGNB International, яка адаптується до національних нормативів та кліматичних умов. Особливістю DGNB є орієнтація на повний

життєвий цикл (Life Cycle Assessment – LCA). Система вимагає: проведення оцінки впливів протягом усього терміну служби будівлі (від добування матеріалів до утилізації); розрахунку життєвих витрат (Life Cycle Costing – LCC); визначення екологічного та економічного оптимуму на ранніх етапах проєктування.

Система EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies) — це міжнародна система екологічної сертифікації будівель, створена Міжнародною фінансовою корпорацією (IFC), що входить до групи Світового банку (World Bank Group). Її головна мета — сприяти масовому переходу до енергоефективного, водозберігаючого та ресурсно ощадного будівництва, особливо у країнах, що розвиваються. На відміну від складних систем (LEED, BREEAM, DGNB), EDGE орієнтована на масове впровадження і враховує локальні кліматичні та економічні умови.

Система EDGE базується на кількісному підході, яка оцінює три основні напрями:

1. Енергія — скорочення споживання енергії завдяки застосуванню енергоефективних заходів (утеплення, ефективне освітлення, системи кондиціонування, ВДЕ тощо).
2. Вода — зменшення використання води завдяки розумним інженерним системам, повторному використанню дощової води тощо.
3. Втілена енергія, що міститься у матеріалах — оцінка енергії, витраченої на виробництво, транспортування та монтаж будівельних матеріалів, і пошук способів її зменшення через вибір більш сталих матеріалів.

Система має три рівні сертифікації, які відображають глибину досягнутих показників сталості (табл. 2.1.).

Сертифікація EDGE впроваджена у більш ніж 100 країнах світу, включно з Україною, Грузією, Польщею, В'єтнамом, Кенії, Колумбією, Індією, Індонезією.

Станом на 2024 р. система налічує понад 65 млн м² сертифікованих площ у світі. В Україні перший сертифікований проєкт EDGE Advanced — головний офіс ProCredit Bank (Київ, 2022 р.). IFC активно співпрацює з українською UGBC

(Українською радою із зеленого будівництва) у просуванні стандартів EDGE для «зеленої» відбудови країни.

Таблиця 2.1

Рівні сертифікації системи EDGE

Рівень	Основні вимоги	Характеристика
EDGE Certified	$\geq 20\%$ економії енергії, води та енергії в матеріалах	Базовий рівень сталості будівлі
EDGE Advanced	$\geq 40\%$ економії енергії та $\geq 20\%$ по інших категоріях	Будівля з високою енергоефективністю
Zero Carbon	100% компенсація або відсутність експлуатаційних викидів CO ₂	Будівля з нульовим вуглецевим слідом

Таблиця 2.2

Основні характеристики провідних міжнародних систем екологічної сертифікації будівель

Показник	DGNB (Німеччина)	LEED (США)	BREEAM (Велика Британія)	EDGE (IFC, Світовий банк)
Рік заснування	2007	1998	1990	2014
Організація-розробник	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (Німецька рада зі сталого будівництва)	U.S. Green Building Council (USGBC)	Building Research Establishment (BRE)	International Finance Corporation (IFC), World Bank Group
Географія застосування	30+ країн (Європа, зокрема адаптації для Центральної та Східної Європи)	180+ країн	80+ країн	100+ країн, орієнтація на ринки, що розвиваються
Основна мета	Комплексна оцінка сталості протягом усього життєвого циклу	Енергоефективність і зменшення викидів CO ₂	Поліпшення екологічної ефективності будівель	Просте та доступне вимірювання енергозбереження, водоощадності та ефективності матеріалів
Ключові критерії	Екологічна, економічна, соціокультурна, технічна, процесна, локаційна якості	Енергія, вода, матеріали, якість повітря, транспорт, ділянка	Управління, енергія, вода, матеріали, здоров'я, транспорт, відходи, забруднення, земля	Енергія, вода, енергія, втілена у матеріалах
Принцип оцінювання	Багатокритеріальний підхід, розрахунок LCA і LCC	Бальна система за виконанням вимог	Бальна система за виконанням вимог	Відсоток економії (мінімум 20% по кожному з трьох напрямів)
Рівні сертифікації	Bronze, Silver, Gold, Platinum, Diamond (за архітектуру)	Certified, Silver, Gold, Platinum	Pass, Good, Very Good, Excellent, Outstanding	Certified, Advanced, Zero Carbon
Акцент на життєвому циклі	Повна оцінка життєвого циклу (LCA + LCC)	Частково (операційна фаза переважно)	Частково	Обмежено (енергія, вода, матеріали)
Типи об'єктів	Нові, існуючі, реконструкція, міські квартали	Усі типи будівель	Усі типи будівель	Житлові, офісні, комерційні (спрощено)

Вартість сертифікації	Висока (через глибокий аналіз LCA)	Висока	Середня-висока	Низька
Складність впровадження	Висока (потрібна кваліфікована команда)	Висока	Середня	Низька, придатна для швидкої оцінки
Переваги	Комплексність, наукова обґрунтованість, гармонізація з політикою ЄС	Високий міжнародний престиж, універсальність	Гнучкість і деталізація	Простота, швидкість, низька вартість, фінансова підтримка IFC
Недоліки	Складна методика, висока вартість, потребує експертів	Дорогий аудит, орієнтований на великі об'єкти	Менше адаптована до позаєвропейських умов	Менш комплексна, спрощена оцінка
Актуальність для України	Перспективна для гармонізації з ЄС, застосовна для відбудови	Престижна для міжнародних девелоперів	Частково адаптована, але потребує локалізації	Найбільш практична та доступна для масового впровадження

РОЗДІЛ 3. СУЧАСНІ ЕКОЛОГІЧНІ БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

3.1. Екологічні матеріали для несучих конструкцій

3.1.1. Екологічні бетони

Традиційний бетон має істотний вплив на навколишнє середовище, оскільки споживає значні природні ресурси і викидає приблизно одну тону CO_2 на кожну тону виробленого портландцементу (ПЦ).

Виробництво цементу та бетону відповідає за більший обсяг викидів, ніж, наприклад, вся авіаційна промисловість — приблизно 8% глобальних викидів CO_2 . Більш того, викиди від цієї галузі подвоїлися за останні двадцять років. Щороку використовується 30 мільярдів тонн бетону — що втричі більше, ніж 40 років тому. Фактично, бетон є другою за споживанням речовиною у світі після води.

Якщо будівельний сектор серйозно налаштований на досягнення цілей «нульових викидів» (net zero) та Цілей сталого розвитку (SDGs) ООН, компаніям і будівельним фірмам необхідно почати активно впроваджувати деякі з нових сталих альтернатив цьому матеріалу.

Нижче наведено заміники традиційного бетону, які можуть запропонувати переваги для сталого розвитку в будівельній галузі.

«Зелений» бетон відрізняється від традиційного кількома особливостями:

- в його складі використовуються відходи як заміна цементу, дрібного або крупного заповнювача;
- для його виробництва потрібно менше енергії, він виробляє менше діоксиду вуглецю та зменшує шкоду для навколишнього середовища.
- він довговічніший і вимагає менше обслуговування, що збільшує термін служби.

Екологічний бетон був розроблений у Данії в 1998 році та використовує відходи з різних джерел, включаючи електростанції, гірничодобувні та кам'яні кар'єри, а також залишки спалювання різних видів сировини. Використання цих відходів полегшує укладання та обробку, покращує якість і знижує проникність, захищаючи його від пошкоджень водою та запобігаючи тріщинам. Більше того, він

також є більш економічно ефективним, оскільки зменшує потребу в новому матеріалі та, відповідно, у транспортуванні.

Сам бетон є сумішшю цементу, заповнювачів і води, тому поряд із альтернативами цементу, заміна дрібних та крупних заповнювачів у суміші є ще одним варіантом для підвищення сталості (рис. 3.1). Ці альтернативні матеріали, такі як скло, пластик, папір або деревина, допомагають знизити споживання енергії та пропонують переваги з точки зору економії ресурсів. Однак, залежно від використаного замінича заповнювача, властивості матеріалу, такі як міцність на стиск і стійкість до корозійних речовин, можуть бути знижені.

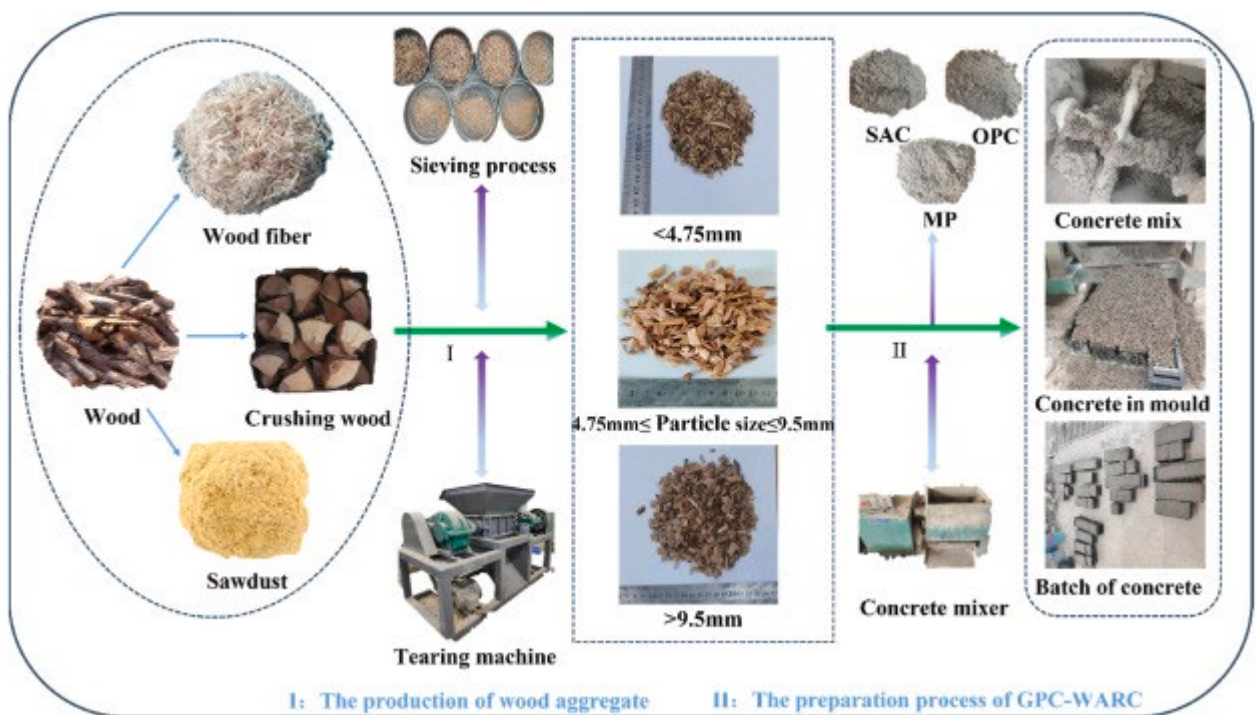


Рис. 3.1 - Виробництво бетону із заповнювачем з деревини [42]

Золобетон — це ще один екологічніший альтернативний варіант бетону, який використовує відходи — цього разу золу-уносу, що утворюється при спалюванні вугілля. Близько 93% золобетону виготовляється з переробленого матеріалу. Використання золи-уносу підвищує міцність, стійкість і довговічність суміші, а також є економічно ефективною альтернативою бетону. З іншого боку, час, необхідний для тверднення золобетону та набору міцності суміші, є більшим, ніж у традиційного бетону, що може мати додатковий вплив на тривалість будівельного проекту.

Мікрокремнезем – побічний продукт, що отримується при виробництві металевого кремнію або сплаву феросиліцію, який виявився дуже цінним для покращення характеристик бетону. Додавання мікрокремнезему збільшує міцність на стиск приблизно на 30%, а також значно покращує довговічність при зниженні проникності хімічних речовин та покращеній стійкості до стирання. Таким чином, це дуже важливий компонент для високоміцного бетону, особливо в інфраструктурних проектах, схильних до впливу суворих умов навколишнього середовища (рис. 3.2).

Додавання мікрокремнезему до бетону не тільки покращує його експлуатаційні характеристики, а й дозволяє йому відповідати принципам сталого розвитку у будівництві. Це додатковий цементний матеріал, який замінює частину звичайного портландцементу суміші і, таким чином, знижує загальний вуглецевий слід. Він дозволяє використовувати відходи виробництва та знижує енерговитрати на виробництво цементу.

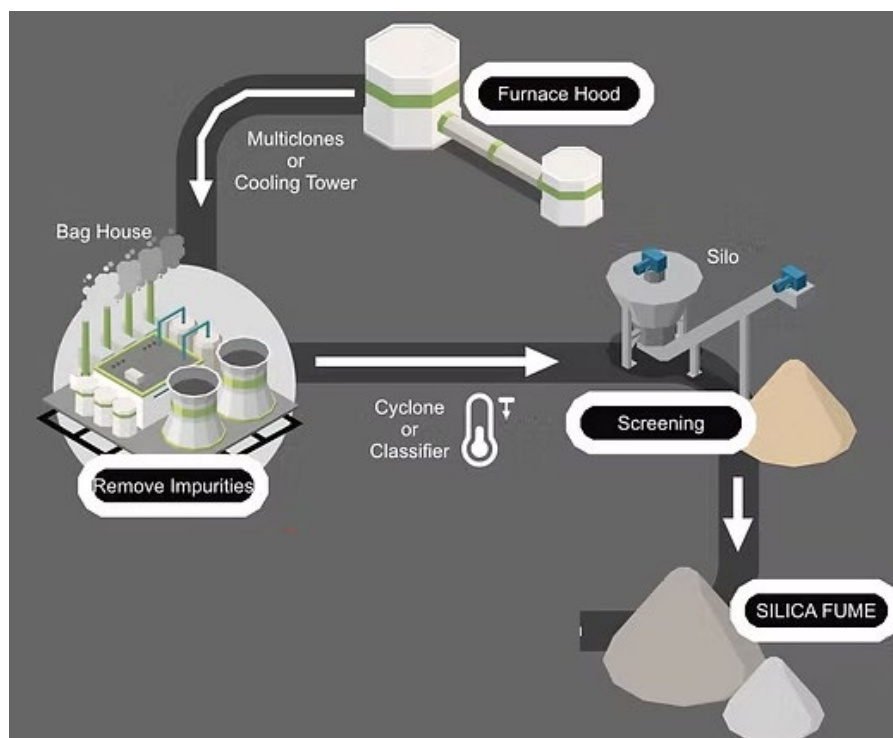


Рис. 3.2 - Процес виробництва кремнеземної піни [43]

Бетон з доменним шлаком - це різновид бетону, де як в'язучий компонент або заповнювач використовується доменний шлак, що отримується при виплавці

чавуну. Використання шлаку дозволяє замінити від 20% до 70% портландцементу, знижуючи вартість бетону та зменшуючи викиди парникових газів, пов'язані з виробництвом цементу.

Дослідження показують, що бетон зі шлаком має кращу стійкість до агресивних середовищ та довговічність. При підвищених температурах бетон зі шлаком повільніше схоплюється, що полегшує роботу з ним. Заміна частини цементу на шлак може покращити опір бетону циклам заморожування та відтавання.

Головним мінусом є уповільнений час схоплювання, особливо за низьких температур, що робить такий бетон менш придатним для проектів, що потребують швидкого набору міцності.

Міцелій вважається одним з найперспективніших замінників в'язучих для бетону, що з'являються в будівельній галузі. Цей матеріал отримують з мікроскопічних ниток грибів, і при змішуванні з органічною речовиною він утворює щільний, довговічний і природно вогнестійкий матеріал, який можна легко сформувати в будь-яку форму (рис. 3.3).

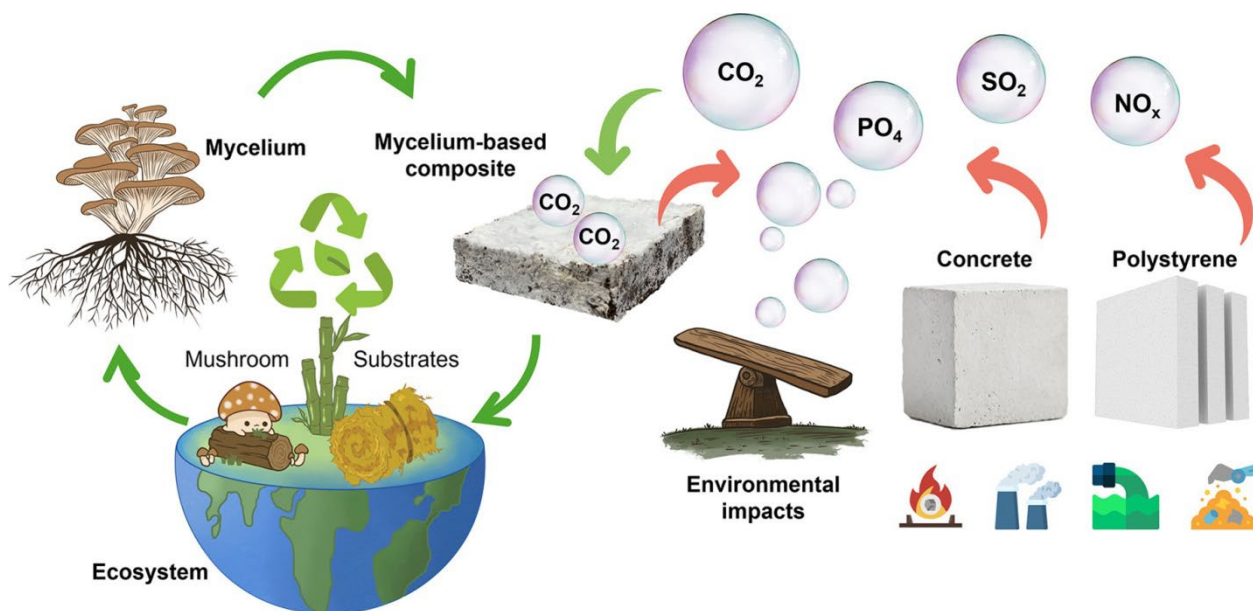


Рис. 3.3 - Використання міцелію як замінника в'язучих для бетонів [44]

Хоча проблемою міцелію є його недостатня міцність порівняно зі стандартним бетоном, він значно легший і екологічніший. Його вже

використовують як упаковочний матеріал, і, за словами експертів, його можна використовувати для очищення інших екологічно шкідливих галузей, таких як мода та нафтова промисловість.

3.6.2. Інженерні вироби з деревини

Клеєний брус є найважливішим і найстарішим представником сімейства інженерних деревних виробів, який сприяв розширенню структурного використання деревини та розвитку технологій обробки пиломатеріалів. Пиломатеріали великих розмірів є обмеженими у доступності та не є достатньо ефективними через наявність дефектів, таких як сучки та тріщини. Клеєний брус усунув обмеження, пов'язані з використанням великих пиломатеріалів щодо розміру поперечного перерізу, довжини стовбура та наявних структурних дефектів. Елементи клеєного бруса складаються з декількох деревних шарів (або "ламелей"), які склеєні між собою за допомогою клею. Під час процесу дошки пресуються гідравлічним обладнанням для забезпечення щільного зв'язку. Для ламелей зазвичай вибирають обрізні пиломатеріали з хвойних порід, і дбають про те, щоб волокна дошок були орієнтовані паралельно поздовжній осі елемента з клеєного бруса. Окрім переваг, пов'язаних із великими площами поперечного перерізу, ламелі часто з'єднують по довжині, щоб створювати елементи з клеєного бруса, які перевищують за довжиною вихідні пиломатеріали. Клеєний брус часто використовують як прямолінійні елементи для перемичок, прогонів, балок перекриттів, колон (круглі, квадратні та складної форми), а також криволінійних балок та покрівельних конструкцій.

Будівельна галузь все частіше використовує нові деревні композити великого розміру, відомі як масивні деревні вироби. CLT — це відносно новий деревний виріб, який має великий потенціал для значного розширення використання деревних продуктів у будівництві. CLT — це великі панелі, створені шляхом склеювання декількох шарів структурних дошок із хвойних порід. Кожен шар дошок зазвичай орієнтований перпендикулярно до сусідніх шарів і склеюється по широких гранях кожної дошки, зазвичай симетрично, так що зовнішні шари мають

однакову орієнтацію. Ці вироби знаходять застосування в будівельних проектах як плити перекриттів, несучі стіни та діафрагми жорсткості (рис.3.4).

Будучи придатною альтернативою для виробників масивних конструкцій, CLT викликає зростаючий інтерес і пропонує екологічну альтернативу сталі та бетону. CLT забезпечує високу міцність і структурну простоту, необхідні для економічно ефективних будівель, а також має менший вплив на навколишнє середовище порівняно з бетоном або сталлю. Виробництво CLT-панелей дозволяє отримувати широкий спектр розмірів і товщин. Архітектори використовують CLT-панелі як несучі плитні та панельні елементи в будівельних проектах. Чудові властивості міцності відкривають можливості для використання в багатоповерхових будинках (рис. 3.5). CLT також може оброблятися як "готова" будівельна конструкція, пристосовуючи його процес до точних необхідних розмірів, щоб зменшити відходи будівельних матеріалів.

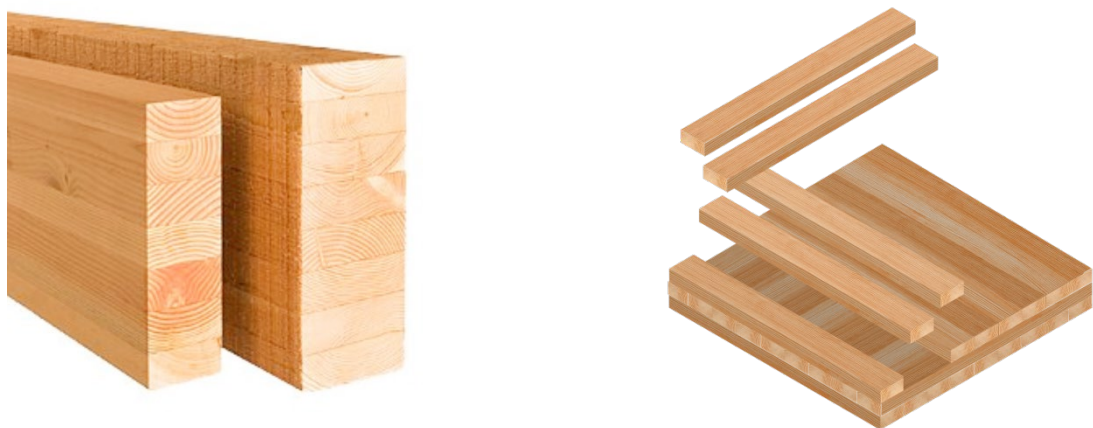


Рис. 3.4 - Клеєний брус та перехресно-клеєна деревина (CLT)

Хоча клеєний брус і CLT-панелі складаються з деревних дощок, інші інженерні деревні вироби виготовляються з деревного шпону.

LVL є одним з найбільш широко використовуваних інженерних деревних виробів для конструкційних застосувань. Це композитна панель, виготовлена з декількох тонких шарів шпону, які вирівняні по довжині готового пиломатеріалу. Цей продукт був винайдений наприкінці 1960-х років і став надійним високоміцним елементом для балок та перемичок як у житловому, так і в комерційному будівництві. Оскільки він виготовлений зі шпону, LVL дозволяє

використовувати колоди дерев на 35% ефективніше, ніж це можливо з масивною деревиною.

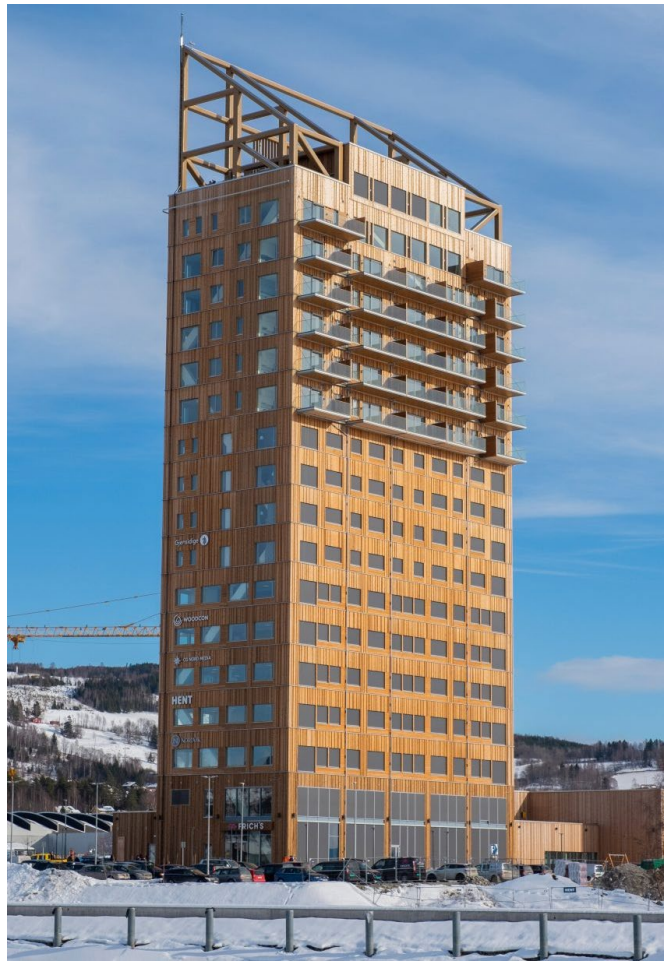


Рис. 3.5 - Приклад використання клеєного бруса та CLT у висотному будівництві (будівля в м. Mjøstårnet, Норвегія – 85 м висотою)

Під час виробництва шпон сушать до вологості 8% і сортують за міцністю та шириною перед укладанням. Наноситься клей, і панель пресується під дією теплоти та постійного тиску до затвердіння. Клеєний шпон призначений для використання як високоміцні несучі балки для підтримки ваги конструкції над вікнами та дверними отворами, а також у системах перекриттів та дахів житлових та комерційних дерев'яних каркасних будівель. Він може використовуватися як для панелей, так і для елементів балок/колон (рис.3.6).



Рис. 3.6 - Брус з клеєного шпону (LVL) [47]

Клеєний дерев'яний масив з орієнтованою стружкою (LSL) виготовляється з надлишкових, перестоялих осикових дерев, які зазвичай не є достатньо великими, міцними чи прямими для виробництва традиційних деревних виробів. У цьому процесі колоди використовуються для отримання матеріалу для стружки, яка може бути завдовжки до 300 мм. Ця стружка потім висушується, покривається клеєм і пресується у великі заготовки за допомогою процесу, який включає ін'єкцію пари. Заготовка може бути товщиною до 140 мм, шириною 2,4 м і довжиною до 10 метрів. Після шліфування їх розрізають на численні розміри для таких застосувань, як перемички, балки, колони. LSL також використовують для настилів та модульних будинків (рис. 3.7).



Рис. 3.7 - Клеєний дерев'яні елементи з орієнтованою стружкою (LSL) [47]

Брус із клеєної паралельно-орієнтованої сиружки (PSL), зазвичай відомий під назвою Parallam, призначений для заміни звичайних пиломатеріалів в елементах великого перерізу (балки, колони). Пиломатеріал з паралельною стружкою був

розроблений у Канаді та вийшов на ринок наприкінці 1980-х років. PSL випускається у багатьох товщинах та ширинах і виготовляється довжиною до 20 м. Стружка зазвичай береться з шпону, знятого з найбільш зовнішньої частини колод, де знаходиться більше волокон. Шпон висушується до вологості 11% і сортується за міцністю перед нарізанням на стружку. Потім її вирівнюють паралельно одна одній, покривають водостійким клеєм, пресують і витримують. Такий брус використовується для великих елементів у житловому будівництві та як елементи середнього та великого розміру в комерційному будівництві (рис. 3.8).



Рис. 3.8 - Клеєний дерев'яний масив з орієнтованою стружкою (LSL)

Одним з найважливіших та найвідоміших будівельних матеріалів, виготовлених з шпону, є фанера. Її легко знайти по всьому світу, і вона зарекомендувала себе як успішний матеріал. Фанера використовується для багатьох легких будівельних матеріалів. Її також використовують для обшивки дахів та підлог, опалубки для бетону, стінок дерев'яних балок. Її можна використовувати для сприйняття вертикальних навантажень або для сприйняття горизонтальних навантажень у складі діафрагм жорсткості. Фанера виготовляється з шарів шпону, які укладені в непарній кількості шарів, причому волокна зовнішніх шарів орієнтовані вздовж довгої сторони панелі. Перехресне укладання шарів шпону забезпечує міцність, жорсткість та стабільність розмірів.

Орієнтовано-стружкові плити (OSB) є одним з найбільш часто використовуваних виробів для конструкційного будівництва в житловому секторі

завдяки відмінним властивостям. OSB - це конструкційна плита, виготовлена з деревної стружки, нарізаної з колод невеликого діаметра та склеєної між собою клеєм зовнішнього класу, під дією теплоти та. OSB виробляється різних марок з підвищеною стійкістю до впливу вологи. OSB широко використовується для обшивки стін, підлогового покриття, покрівельного настилу та балок як у комерційному, так і в житловому будівництві (рис.3.9).



Рис. 3.9 - Фанера та OSB [47]

Прикладом несучої конструкції, де можуть використовувати фанеру або OSB, є дерев'яні І-балки. Це інженерний виріб, який має високу міцність відносно своїх розмірів та ваги (рис. 3.10).



Рис. 3.10 - Дерев'яна І-балка [47]

Дерев'яна І-балка — це легка балка, зібрана шляхом з'єднання полиць та стінки у переріз у вигляді двотавра. Полиці балки виготовляються з клеєного шпону (LVL) або масивної деревини. Стінка балки виготовляється з фанери, клеєного шпону (LVL) або плити OSB. Дерев'яні І-балки доступні довжиною до 25

м. Вони використовуються в житловому та комерційному будівництві як конструкції перекриттів, дахів та каркасів зовнішніх стін. І-балки ідеально підходять для конструкцій, які вимагають жорсткості, теплоізоляції та економічності.

3.2. Ефективні екологічні теплоізоляційні матеріали

Будівлі є центральною частиною повсякденного життя, і ми проводимо в них значну частину нашого часу. Ефективна теплоізоляція житлових приміщень є важливою умовою для зниження витрат на енергію, покращення умов життя та забезпечення декарбонізації будівельного сектору.

Певні стратегії щодо скорочення викидів вуглекислого газу спрямовані на покращення конструкції будівель та їх теплоізоляційних характеристик як для нових, так і для старих будівель, прагнучі підвищити ефективність опалення та забезпечити комфорт усередині будівлі, не витрачаючи цінні ресурси.

Ізоляція має найбільший потенціал зниження викидів CO₂. Енергія, заощаджена завдяки ізоляції, може компенсувати енергію, витрачену в процесі її виробництва, тоді як CO₂, збережений завдяки природним теплоізоляційним матеріалам, також може переважити викиди CO₂, що виникають у процесі її виробництва. Ось чому перехід на натуральні теплоізоляційні матеріали є ключем до досягнення енергоефективності та створення нульових будівель.

Як правило природні теплоізоляційні матеріали походять з джерел рослинного походження (різні рослинні волокна) і навіть тваринного походження, в основному з овечої вовни (зазвичай використаної повторно). Крім того, використовуються також потоки відходів текстилю (бавовна) або паперу (целюлоза), а також експериментальні джерела (міцелій).

Деякі традиційні теплоізоляційні матеріали, такі як мінеральна вата, також виготовляються з природної сировини на основі каменю, але вони здебільшого не вважаються екологічною формою теплоізоляції через величезну кількість енергії, потрібну в процесі виробництва та переробки.

3.2.1. Конопля.

Походить з рослини конопель, яка має досить міцні волокнисті стебла і відмінні ізоляційні властивості. Теплоізоляція з конопляної стружки характеризується відмінними екологічними перевагами. Ця рослина є відновлюваною сировиною та біорозкладається, а її вирощування практично не вимагає дуже енергетичних ресурсів та догляду. Конопля може рости практично на будь-якому ґрунті вражаюче швидко: період повного зростання становить 100 днів. Конопля також нетоксична, не потребує пестицидів та інсектицидів та споживає дуже мало води. Вона уловлює більше вуглецю, ніж викидає під час будівництва (рис. 3.11).



Рис. 3.11 – Конопляна теплоізоляція [48]

3.2.2. Солома

Солом'яні тюки та солом'яно-глиняні блоки мають давню історію застосування в будівництві як природні та доступні матеріали з високими теплоізоляційними властивостями. Традиційно стіни будівель формували шляхом укладання тюків соломи з подальшим покриттям їх глиняним розчином, що забезпечувало конструкційну міцність і захист від зовнішніх впливів. У сучасних умовах технології використання соломи еволюціонували: на ринку з'являються збірні солом'яні панелі та ізоляційні матеріали промислового виробництва, які поєднують екологічність із високими експлуатаційними характеристиками.

Солом'яні тюки виготовляються із сільськогосподарських залишків зернових культур, тобто з відновлюваної та вторинної сировини, що зменшує потребу у первинних ресурсах. Крім того, солома є ефективним поглиначем вуглецю, тому

такі конструкції виконують функцію тимчасового вуглецевого сховища, сприяючи зниженню загального вуглецевого сліду будівлі. Важливою перевагою матеріалу є також високий рівень звукоізоляції та здатність регулювати вологісний режим приміщення, що позитивно впливає на мікроклімат будівлі (рис. 3.12).



Рис. 3.12 - Теплоізоляція з соломи [49]

3.2.3. Льон.

Льон, що використовується як сировина для виробництва теплоізоляційних матеріалів, є побічним продуктом льонарської промисловості. Його отримують зі стеблової частини рослини, яка має нижчу комерційну цінність порівняно з волокнами, призначеними для текстильного виробництва. Хоча така сировина не є відходом у повному розумінні, її застосування в будівельній галузі сприяє раціональному використанню залишкових біоресурсів та зменшенню екологічного навантаження виробництва.

3.2.4. Целюлоза.

Ізоляція з целюлозного волокна в основному складається з мелених паперових волокон, оброблених неорганічними добавками, які діють як антипірени та інгібітори росту цвілі. Вихідним матеріалом для целюлозних волокон зазвичай є перероблена газета, отримана з непроданого або відновленого паперу. Газетний папір, як правило, виготовляється з механічної целюлози. Також можна використовувати перероблений газетний папір або хімічну целюлозу. На відміну від хімічного варіння целюлози, механічне варіння призводить до незначного видалення вмісту лігніну. Мінеральні та органічні добавки, такі як каоліни,

порцелянова глина або катіонний крохмаль, також вводяться в паперову масу для покращення її властивостей таких, як непрозорість паперу, утримання вологи та міцність. Чорнила, які зазвичай використовуються в папері, виготовляються з неорганічного вугілля, а хроматичні чорнила — з органічних пігментів (рис. 3.13).



Рис. 3.13 - Теплоізоляція із целюлози

3.2.5. Деревина

виготовляється з деревних відходів, які утворюються під час прорідження Теплоізоляція з деревного волокна лісових масивів, та відходів лісообробної промисловості. Така ізоляція заявила внаслідок того, що деревообробні підприємства захотіли скоротити кількість відходів та зробити із них продукцію (рис. 3.14).



Рис. 3.14 - Теплоізоляція із деревини

3.2.6. Вовна.

Вовняна ізоляція майже повністю виготовлена з овечої шерсті, яка зазвичай використовується повторно. Цей матеріал виробляється екологічно безпечним і біологічно розкладається. Вироби з вовни можна повністю переробити, отримуючи знову високоякісну сировину (рис. 3.15).



Рис. 3.15 - Теплоізоляція із вовни

3.2.7. Трава.

Трава є відновлюваною природною сировиною, що поширена в більшості кліматичних зон світу та характеризується швидким ростом і низькими вимогами до умов вирощування. Використання трав'яної біомаси у будівництві дозволяє перетворювати відходи скошеної рослинності на корисний ресурс, сприяючи зменшенню обсягів органічних відходів та підтримці місцевих екосистем. Перероблена трава може слугувати сировиною для виготовлення теплоізоляційних панелей, які поєднують екологічність із високими енергоефективними характеристиками. Таким чином, застосування трав'яних ізоляційних матеріалів у будівництві сприяє розвитку замкнутого циклу використання біоресурсів і реалізації принципів сталого розвитку (рис. 3.16).



Рис. 3.16 – Трав'яний утеплювач

Зведені дані про характеристики екологічних теплоізоляційних матеріалів приведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Зведені характеристики екологічних теплоізоляційних матеріалів

Найменування	Питома вага, кг/м ³	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	Вуглецевий слід, кг CO ₂ екв/кг
Конопляні мати	30-42	0,038	-2.11
Солом'яна ізоляція	90-100	0.041	-16.9
Ляна рулонна ізоляція	20-30	0.038	-1.27
Целюлозна ізоляція	28-65	0.037	-1.21
Деревинна ізоляція	35-38	0.041	-2.88
Вовняні мати	18-20	0.038	6.58
Трав'яні мати	30-80	0.04	-8.04

3.3. Стратегії поводження з будівельними відходами та матеріалами

3.3.1. Загальні положення.

Однією з ключових стратегій щодо вирішення проблеми стійкості, впливу на навколишнє середовище та дефіциту ресурсів в галузі будівництва є інтеграція рециклінгових (перероблених) та апсайкл (повторно використаних) матеріалів. Цей підхід допомагає не лише вирішити екологічні проблеми, але й відкриває шлях для нових можливостей підвищення ефективності в проектуванні та будівництві.

Серед матеріалів, створених шляхом перетворення відходів на нові матеріали, є перероблений бетон, метали, скло та пластик. Перепрофільовані матеріали зберігають свої природні якості для нових цілей, сприяючи зменшенню споживання видобувної сировини.

Виробництво рециклінгових та апсайкл-матеріалів часто потребує менше енергії, ніж виробництво нових матеріалів, тим самим зменшуючи викиди вуглецю. З економічної точки зору, споруди з використанням таких матеріалів є економічно ефективними і пропонують ринкові переваги. Вони також забезпечують конкурентоспроможність, оскільки будівлі з екологічних матеріалів є більш привабливими для клієнтів, які дбають про екологію. Перепрофілювання матеріалів стимулює творчість у вирішенні проблем та дизайні, іноді створюючи дивні та естетично вражаючі дизайни конструкцій. Фінансові переваги використання перероблених і повторно використаних матеріалів є привабливими варіантами для сучасних будівельних проектів.

У табл. 3.2 представлені основні відмінності між переробкою (recycling) та повторним використанням (upcycling), пов'язаними процесами, результатами та впливом на навколишнє середовище.

3.3.2. Види рециклінгових та апсайкл-матеріалів в будівельних проєктах

1. Метал

Виробництво металевих виробів, від видобутку руди до виготовлення продукції, є енергоємним. Однак метал має найбільший потенціал для подальшої обробки, переплавлення та інших видів переробки. Що найважливіше, повторення цього процесу може продовжити життєвий цикл сировини. Доказом цінності

металів є те, що їх виділяють після знесення будівель і рідко утилізують на звалищах. Металеві компоненти часто ремонтують та відновлюють, оскільки їх можна розібрати та використати в інших конструкціях.

Таблиця 3.2

Відмінності між апсайклінгом та рециклінгом

Критерій	Апсайклінг	Рециклінг
Визначення	Перетворення відходів на більш цінні або якісні товари.	Перетворення відходів на нові, порівнянні або менш цінні товари.
Процес	Мінімальна обробка та повторне використання матеріалів.	Переробка матеріалів після розбирання їх на найпростіші форми.
Цінність продукту	Вища або подібна якість до оригінального матеріалу.	Часто мають меншу або таку саму цінність, як вихідний матеріал.
Екологічний вплив	Мінімізація відходів при збереженні ресурсів та енергії.	Мінімізація відходів, але вимагає енергії для переробки.
Приклад	Перетворення старих меблів на оригінальні дизайни.	Використання розплавлених пластикових пляшок для створення нових пластикових виробів.
Ресурсоефективність	Використання існуючих товарів з невеликими змінами для підвищення ефективності.	Ресурсомісткий, оскільки використовує енергію для переробки матеріалів.
Рівень інновацій	Високий, оскільки залежить від творчого, образного та винахідливого дизайну.	Помірний, оскільки акцент робиться на відновленні сировини, а не дизайні.
Використання сировини	Використання існуючих продуктів, не вимагає або мінімально вимагає закупівлі сировини.	Вимагає додавання компонентів (добавок) або додаткових ресурсів для завершення процесу переробки.

Сталеві конструктивні елементи зі стандартизованими поперечними перерізами мають найбільші шанси на повторне використання. Переробка металу є енергоефективною, оскільки споживає менше енергії, ніж видобуток корисних копалин та виробництво нових металевих виробів. Прикладами конструктивних елементів, вироблених із переробленої сталі, є балки, колони та арматура (рис.3.17).

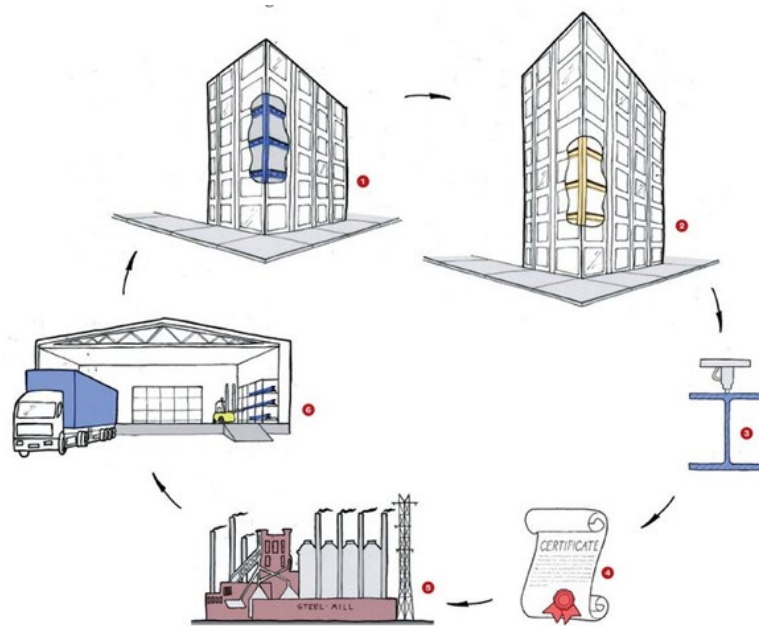


Рис. 3.17 - Апсайклінг металу [50]

Крім звичайної сталі, алюміній є ще одним придатним до переробки металом, який часто використовують у будівництві. Його легкість, міцність і стійкість до корозії роблять його ідеальним для різних застосувань, включаючи вікна, покрівлю та фасади.

Загалом, переробка та апсайклінг металу забезпечує створення нових надійних конструкцій, подовжує термін служби, одночасно зберігаючи ресурси.

2. Деревина

Деревина, поширений компонент у будівництві, легко піддається переробці та апсайклінгу. Відновлена деревина зі старих будинків або меблів покращує архітектурні проекти завдяки своєму унікальному вигляду та історичній значущості. Наприклад, природня краса дуба робить його популярним вибором для балок, підлог та акцентних елементів.

Серед способів переробки відходів деревинної промисловості, які інакше були б витрачені даремно, є перетворення їх на інженерні вироби, такі як балки з шпону LVL (зрошені шари шпону) та плити OSB (орієнтовано-стружкова плита), які мають відмінні структурні характеристики. Крім того, використання деревини, заготовленої відповідально, у будівництві зменшує потребу в цілісній деревині та сприяє етичним методам лісівництва. Це також має значні переваги для навколишнього середовища, такі як зниження викидів вуглецю та покращена енергоефективність при будівництві з розрахунком на довгий термін служби (рис. 3.18).

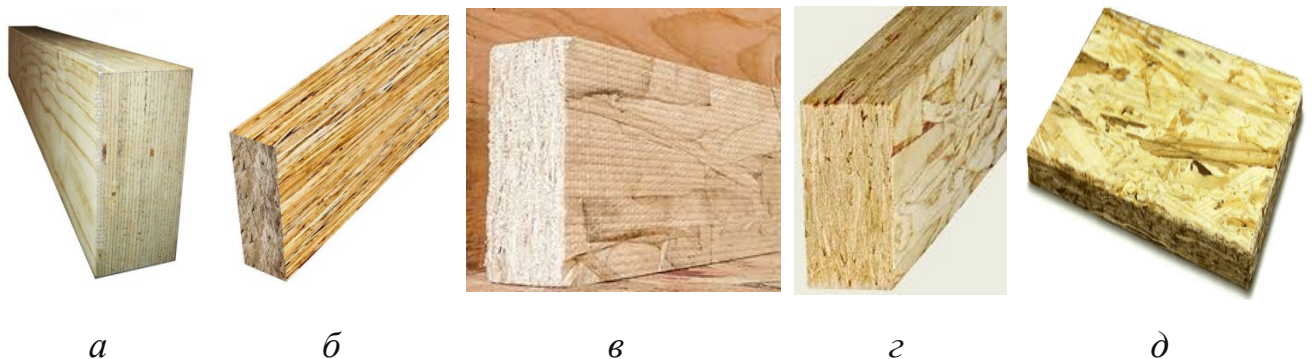


Рисунок 3.18 – Типи композитних виробів з рециклінгової деревини:

а) LVL-брус; б) PSL-брус; в) LSL-брус; г) OSB-брус; д) OSB-плити

3. Цегла

Елементи цегляної кладки зі знесених будівель можуть бути використані повторно або відновлені. Повторно використана керамічна цегла має особливу візуальну привабливість і пропонує стійку альтернативу новим матеріалам. Така цегла може використовуватися як облицювання стін, ландшафтні акценти або навіть як конструктивні елементи, щоб надати індивідуальності традиційним та сучасним проектам (рис. 3.19).

Поширеним способом переробки кладки є подрібнення та повторне використання уламків як заповнювачів для нової бетонної суміші. Це зберігає природні ресурси, зменшуючи потребу у видобутку нової сировини і запобігає надлишковим відходам (рис. 3.20).

Включення елементів з переробленої або повторно використаної цегли в проекти покращує екологічні характеристики сталість і, водночас, дозволяє зберегти спадщину старих будівель.

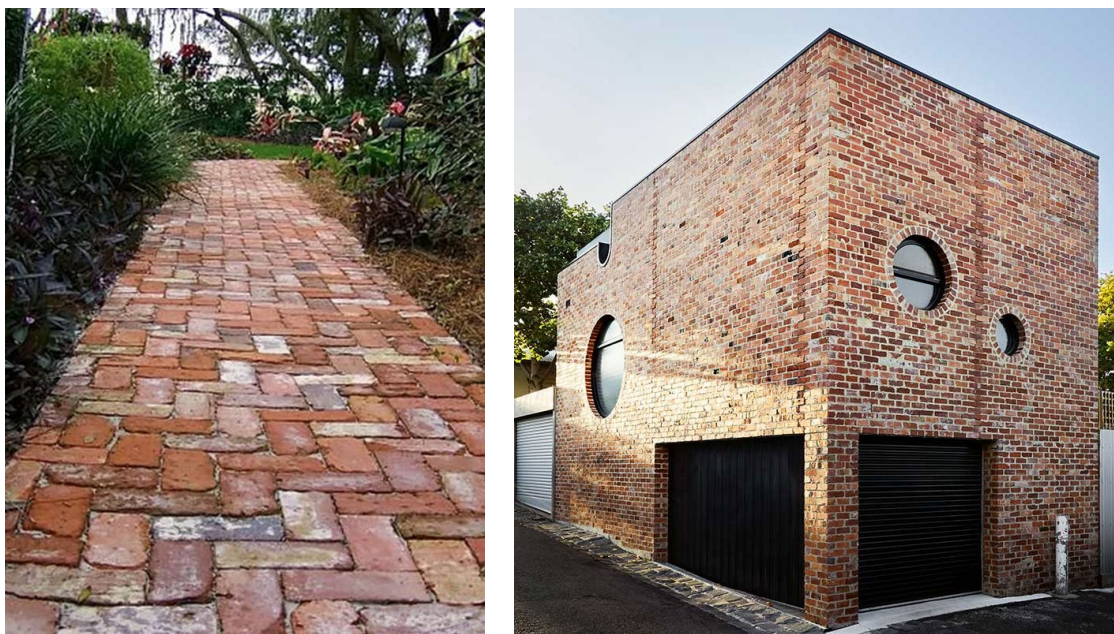


Рис. 3.19 - Повторно використана цегла в ландшафтному дизайні та будівельних конструкціях [51, 52]



Рис. 3.20 - Рециклінг цегли шляхом подрібнення у вторинний заповнювач [53]

4. Скло

Скло часто використовують у будівлях для міжкімнатних дверей, вікон, фасадних панелей та огороження. Відновлення скла у первісному стані та повторне використання його в іншому об'єкті є інноваційним та екоефективним підходом. Однак демонтаж і транспортування скла є складним завданням через ризик пошкодження крихких елементів. Перероблене скло є універсальним матеріалом, придатним для численних будівельних проектів.

Рециклінг скла передбачає збір, очищення та переплавлення відпрацьованого скла для виробництва нових скляних виробів. Цей процес споживає менше енергії, ніж виробництво скла з первинної сировини, що робить його екологічно відповідальним вибором. Перероблене скло підходить, серед іншого, для плитки, стільниць та ізоляційних матеріалів. Його також можна інтегрувати в фасади будівель як естетичні елементи.

Апсайклінг скла включає мистецьку переробку у унікальні дизайнерські елементи або декоративні компоненти в інтер'єрі та екстер'єрі. Естетична гнучкість переробленого скла допомагає архітекторам підвищити візуальну привабливість своїх проектів, одночасно сприяючи сталим практикам (рис. 3.21, 3.22).



Рис. 3.21 - Рециклінг віконного скла для склополімерних виробів [54]



Рис. 3.22 - Апсайклінг скла (повторне використання у теплиці) [55]

5. Бетон

Бетон є основним компонентом будівель. Серед матеріалів, використаних у нещодавно зведених конструкціях, найбільшу частку становить це поєднання цементу, води, заповнювачів, арматурної сталі та хімічних добавок, незважаючи на те, що ці матеріали створюють навантаження на природне середовище. Бетонні елементи зазвичай стають відходами після завершення життєвого циклу будівлі. Оскільки немає можливості відновити окремі компоненти в бетоні, він має низьку цінність як матеріал при знесенні і вважається будівельним сміттям. Однак можна перетворити роздроблені залишки бетону від ремонтних або демонтажних робіт на вторинний заповнювач. Його використання в нових бетонних сумішах зменшує потребу в первинній сировині і зберігає природні ресурси. Крім переробки старого бетону, апсайклінг бетону включає винахідливе повторне використання бетонних елементів, наприклад, використання збірних залізобетонних панелей. Міцність бетону дозволяє формувати його в архітектурні інсталяції, ландшафтні елементи або декоративні прикраси (рис. 3.23, 3.24).

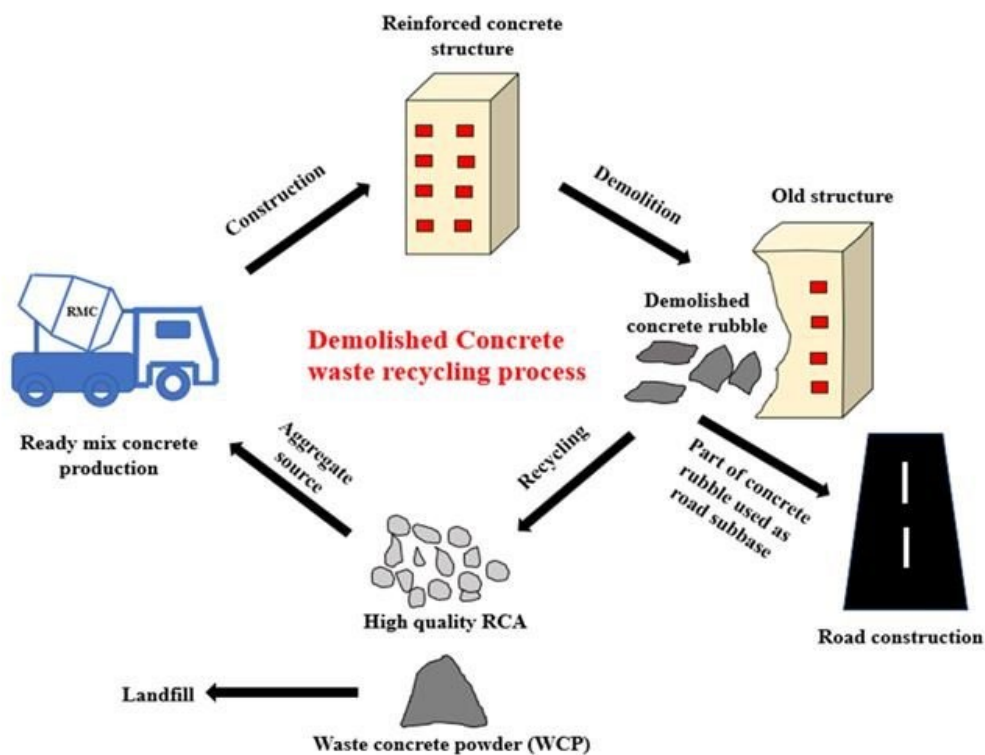


Рис. 3.23 - Ресайклінг бетону у вторинний заповнювач [56]



Рис. 3.24 - Апсайклінг бетону (повторне використання стінових панелей в дорожньому покритті) [57]

6. Пластики

Полімери, такі як полівінілхлорид (ПВХ), поліетилен високої щільності (HDPE), поліпропілен та полістирол, широко використовуються в будівництві. Залежно від їх складу, пластикові матеріали можуть бути перероблені в різні вироби, такі як віконні рами, ізоляція, килими, плитка, внутрішні облицювання,

синтетичні покриття та монтажні компоненти. Дедалі більше використання переробленого пластику в сучасному цивільному будівництві та архітектурі зумовлено його адаптивністю та легкістю. Різні пластикові відходи, які не відносяться до будівництва (пляшки, контейнери, упаковка), також можуть бути перетворені на нові будівельні матеріали. Наприклад, з переробленого пластику виготовляється пластикова дошка або брус, які не слід плутати з деревно-пластиковими композитами. Ці вироби широко використовуються для створення терас на відкритому повітрі, а також для виготовлення молдингів, оздоблення та садових меблів, наприклад паркових лавок.



а



б

Рис. 3.25 - Приклади використання рециклінгового пластику: а) пластикова дошка та брус; б) пластикова тротуарна плитка [58, 59]

Прикладом художнього включення перероблених пластиків в архітектурні проекти є використання їх як декоративних елементів або панелей для фасадів. Креативним способом використання пластикових відходів є їхня переробка в ізоляцію, плитку та конструктивні елементи. Переробка пластику сприяє економії ресурсів та екологічній відповідальності, зменшуючи кількість відходів пластику, що потрапляють на звалища (рис. 3.25).

3.6.3. Стратегії інтеграції рециклінгових та апсайкл-матеріалів в будівельні проекти

Чітка стратегія, що включає вибір матеріалів, адаптацію дизайну, співпрацю з проєктувальниками та оцінку життєвого циклу, є важливою при інтеграції рециклінгових та апсайкл-матеріалів в будівельні проекти. Заохочення використання перероблюваних та місцевих матеріалів може значно зменшити екологічний вплив будівлі.

1. Вибір матеріалів

Одним з найважливіших кроків у інтеграції рециклінгових та апсайкл-матеріалів в будівельні проекти є ретельний вибір матеріалів. Архітектори повинні використовувати місцеві матеріали з високим потенціалом переробки. Використання відновленої деревини, переробленого металу та переробленої цегли зменшує потребу в первинних матеріалах і мінімізує транспортування. Локальне видобування та виробництво допомагає підтримувати місцеві компанії та зменшує викиди вуглецю порівняно з транспортуванням на великі відстані. Такий підхід також допомагає створювати аутентичні проєкти з елементами національних традицій та надає будівлям унікальності (рис. 3.26).

2. Адаптивність дизайну

Гнучкість дизайну є важливою при використанні перероблених та апсайкл-матеріалів, оскільки вони не завжди відповідають чинним стандартам. Проєкт будівлі повинен мати форми та розміри, що дозволяють творче використання нетрадиційних матеріалів. Ця адаптивність може призвести до нових архітектурних рішень, які кидають виклик традиційно прийнятим принципам дизайну.

Наприклад, архітектор може використовувати неправильної форми перепрофільовану деревину в будівництві для створення унікальних дизайнів, які додають естетичної цінності, одночасно виконуючи функціональні цілі (рис. 3.27).



Рис. 3.26 - Фото сучасних індивідуальних будинків з матеріалів місцевого походження (саман - суміш глини з соломною, стіни з бруса, покрівля з очерету)
[60, 61]



Рис. 3.27 - Приклад повторного використання дерев'яних дошок в оздобленні фасаду [62]

3. Співпраця з художниками, ремісниками, майстрами виробів ручної роботи тощо.

Одним із способів впровадження повторно використаних матеріалів у будівельних проектах є співпраця з художниками та ремісниками. Ця співпраця може призвести до творчих рішень, які не були б очевидними у звичайному будівництві. Художники часто мають унікальний погляд на використання матеріалів і досліджують творчі методи, які віддають пріоритет оригінальності. Наприклад, проект може перетворити відходи на фокальну точку дизайну, використовуючи скульптурні елементи, виготовлені з переробленого металу або скла. Такі колаборації сприятимуть заохоченню замовників до використання сталих практик та покращити знання про них (рис. 3.28).



Рис. 3.28 - Елементи інтер'єру та декору з апсайкл-матеріалів (в даному випадку деревини) [63]

4. Оцінка життєвого циклу

Оцінка життєвого циклу є ключовим компонентом екологічно безпечних проектів. Проектувальники, які розуміють довгострокові наслідки використання матеріалів, підвищують екологічну безпеку своїх проектів. Вони можуть віддавати пріоритет використанню матеріалів, які мають високий рівень переробки або низьку втілену енергію. LCA впливає на вибір матеріалів і заохочує враховувати

весь термін служби будівлі, що призводить до економічно та екологічно вигідних проектів. Інтеграція рециклінгових та апсайкл-матеріалів, таких як метал, деревина, скло, бетон, пластик і кладка, зменшує відходи, споживання енергії та викиди вуглецю. В табл. 3.3 приведені узагальнені принципи інтеграції цілей сталого розвитку на всіх етапах: виробництво, будівництво, експлуатація, переробка та утилізація.

Таблиця 3.3

Життєвий цикл рециклінгових та апсайкл-матеріалів

Матеріал	Мета сталого розвитку	Матеріали та виробництво	Будівництво	Фаза використання	Фаза переробки	Фаза апсайклінгу	Фаза утилізації
Метал	Зменшити видобуток, енергію, викиди	Перероблена сталь та алюміній з брухту та промвідходів	Легка інтеграція в несучі конструкції	Висока довговічність, стійкість до корозії, енергозбереження	Переплавка для нових металовиробів	Повторне використання балок	Повністю перероблюваний без втрати якості
Деревина	Збереження лісів, секвестрація вуглецю	Відновлена деревина зі старих будівель, будсміття	Рами, обшивка, підлоги	Довгий термін служби, поновлюваність, біофільний дизайн	Подрібнення на ДСП, мульчу, біопаливо	Меблі, дрібніші конструкції	Природний розклад або спалювання
Скло	Зменшити видобуток піску, енергію, викиди	Перероблене скло з пляшок, вікон, промвідходів	Вікна, фасади, декоративні елементи	Високі теплоізоляційні властивості, енергоефективність	Дроблення на шихту, переплавка	Декоративна плитка, мозаїка	Нескінченна переробка без втрати якості
Бетон	Зменшити викиди CO ₂ , використання первинних наповнювачів	Перероблені наповнювачі, зола, шлак, мікрокремнезем	Фундаменти, дорожнє покриття, збірні елементи	Висока міцність на стиск, довговічність, низьке обслуговування	Дроблення на перероблений наповнювач	Ландшафтний дизайн, бар'єри	Захоронення (якщо не перероблено), висока втілена енергія
Пластик	Зменшити сміттєзвалища, споживання нафти	Перероблений пластик з пляшок, упаковки, промвідходів	Труби, ізоляція, легкі конструкції	Стійкість до УФ, гнучкість, легкість	Переплавка у нові вироби	Інноваційні матеріали (напр., еко-цегла)	Небіорозкладний, захоронення, спалювання
Кладка	Зменшити відходи від зносу, сприяти циркулярній економіці	Перероблена цегла та кладка з будсміття	Стіни, мощення, ландшафтний дизайн	Висока теплоємність, довговічність, низьке обслуговування	Дроблення на наповнювач для нової кладки	Нові будівлі, арт-інсталяції	Повторне використання, перепрофілювання, дроблення

3.5. Бази даних екологічних параметрів будівельної продукції і процесів

Реалізація концепція стійкого розвитку в будівництві має істотне значення через високі темпи використання ресурсів, які виражаються у надмірному споживанні енергії, води та сировини різних видів. Будівлі та будівельна галузь мають значний внесок у викиди забруднюючих речовин у навколишнє середовище та використання природних ресурсів. Тому на тлі сьогоденного занепокоєння зміною клімату важливість оцінки впливу будівель на навколишнє середовище на всіх етапах їхнього життєвого циклу починає набувати широкого визнання. Адже крім енергії та вуглецю, необхідних для експлуатації, опалення та освітлення будівлі, матеріали для її спорудження потрібно видобути, добути або заготовити; перевезти на заводи та виготовити; а потім доставити на майданчики, підняти та встановити на місце. Протягом свого очікуваного терміну служби конкретна будівля потребуватиме технічного обслуговування, ремонту та заміни елементів, перш ніж урешті-решт буде знесена, а всі її компоненти утилізовані – через захоронення, спалювання, переробку чи повторне використання.

Розрахунок вуглецевого сліду матеріалів, використаних у будівництві, як складової оцінки життєвого циклу будівлі є складним та трудомістким завданням. Тому перехід до кліматично нейтрального будівництва обумовлює потребу в практичних інструментах оцінки стійкого розвитку.

Саме тут на допомогу приходять Декларації екологічних характеристик продукції (EPD). Це стандартизований спосіб надання даних про вплив продукту на навколишнє середовище протягом усього його життєвого циклу.

Екологічна декларація продукції (EPD) – це документ, який надає прозору інформацію про вплив будь-якого матеріалу або продукту на навколишнє середовище протягом його життєвого циклу.

Декларація перевіряється третьою стороною та зареєструється в системі EPD.

У Європі EPD повинні відповідати двом стандартам: європейському стандарту EN 15804 та міжнародному стандарту ISO 14025, що означає, що всі

екологічні декларації використовують спільну методологію, спільний набір екологічних показників та мають спільний формат звітності.

Декларації містять дані про вплив на навколишнє середовище, пов'язані з різними етапами життєвого циклу будівлі, включаючи:

- Видобуток сировини, транспортування та виробництво.
- Транспортування на будівельний майданчик та будівельно-монтажні роботи.
- Використання, обслуговування, ремонт, заміна та реконструкція.
- Демонтаж, транспортування, переробка та утилізація відходів.
- Потенційне повторне використання, відновлення енергії та рециклінг.

Декларації включають інформацію про сім показників впливу на навколишнє середовище: потенціал глобального потепління, підкислення, евтрофікацію, потенціал руйнування стратосферного озонного шару, потенціал фотохімічного утворення озону та два типи абіотичного руйнування.

Стандартизована методологія, властива EPD, дозволяє фахівцям у галузі стійкого розвитку, архітекторам, споживачам, політикам та іншим зацікавленим сторонам будівельних проектів приймати обґрунтовані рішення на основі перевірених оцінок впливу на навколишнє середовище.

Сьогодні в кожній країні і в світі загалом існує велика кількість виробників, що поряд із значною кількістю видів та типів будівельної продукції може істотно ускладнити комплексний огляд екологічних характеристик та прийняття рішень щодо вибору того чи іншого матеріалу або виробу.

Вирішенням цієї проблеми стало створення баз даних EPD, в яких об'єднується вся інформація, роблячи її доступною для широкого кола користувачів.

База даних EPD – це цифрова платформа, яка виступає архівом достовірності продуктів, надаючи перевірене, детальне «маркування екологічної якості» для будівельних матеріалів і виробів.

Основна функція бази даних EPD полягає в наданні прозорого, стандартизованого порталу для оцінки впливу на навколишнє середовище.

Накопичуючи ці декларації в міру їх створення, база даних забезпечує підтримку дотримання нормативних вимог, галузевих стандартів та верифікацію відповідності критеріям стійкого розвитку.

Серед платформ, що сприяють доступу та поширенню EPD, ключовим гравцем та еталоном виступає ECO Platform (www.eco-platform.org). ECO Platform – це некомерційна асоціація, що об'єднує операторів програм екологічних декларацій продукції (EPD) в Європі та світі з метою створення глобальної, скоординованої системи обміну надійними цифровими даними про життєвий цикл продукції. ECO Platform об'єднує операторів Європейської програми EPD з вузлами, які представляють цих операторів чи їх відповідні бази даних. Ці вузли, створені національними постачальниками EPD, відповідають за збирання та перевірку екологічних даних про будівельну продукцію для створення єдиних якісних EPD, забезпечуючи сумісність та визнання даних по всій Європі (рис. 3.29).

Для користувача на сайті платформи розміщено ECO Portal – пошукову систему, яка агрегує EPD з усіх національних баз даних-учасниць. Через цей портал ECO Platform надає єдину точку доступу до тисяч перевірених декларацій з різних європейських джерел, що значно спрощує пошук інформації для міжнародних проектів. Усі EPD у цій системі відповідають єдиним вимогам та стандартам, що робить їх прийнятними для використання в різних національних схемах сертифікації будівель.

Ця платформа особливо корисна для архітекторів, інженерів та виробників, які працюють на міжнародному рівні, оскільки вона усуває необхідність окремої перевірки та адаптації даних для кожної країни. ECO Platform слугує важливим інструментом для просування єдиного ринку екологічної продукції в Європі, сприяючи прозорості та стандартизації в галузі сталого будівництва.

Доступ до ECO Platform є безкоштовним через веб-сайт для користування в науково-освітніх цілях та суспільних ініціатив, тоді як професійний доступ для комерційного користування, наприклад, для розробників програмного забезпечення в галузі оцінки життєвого циклу, є платним.

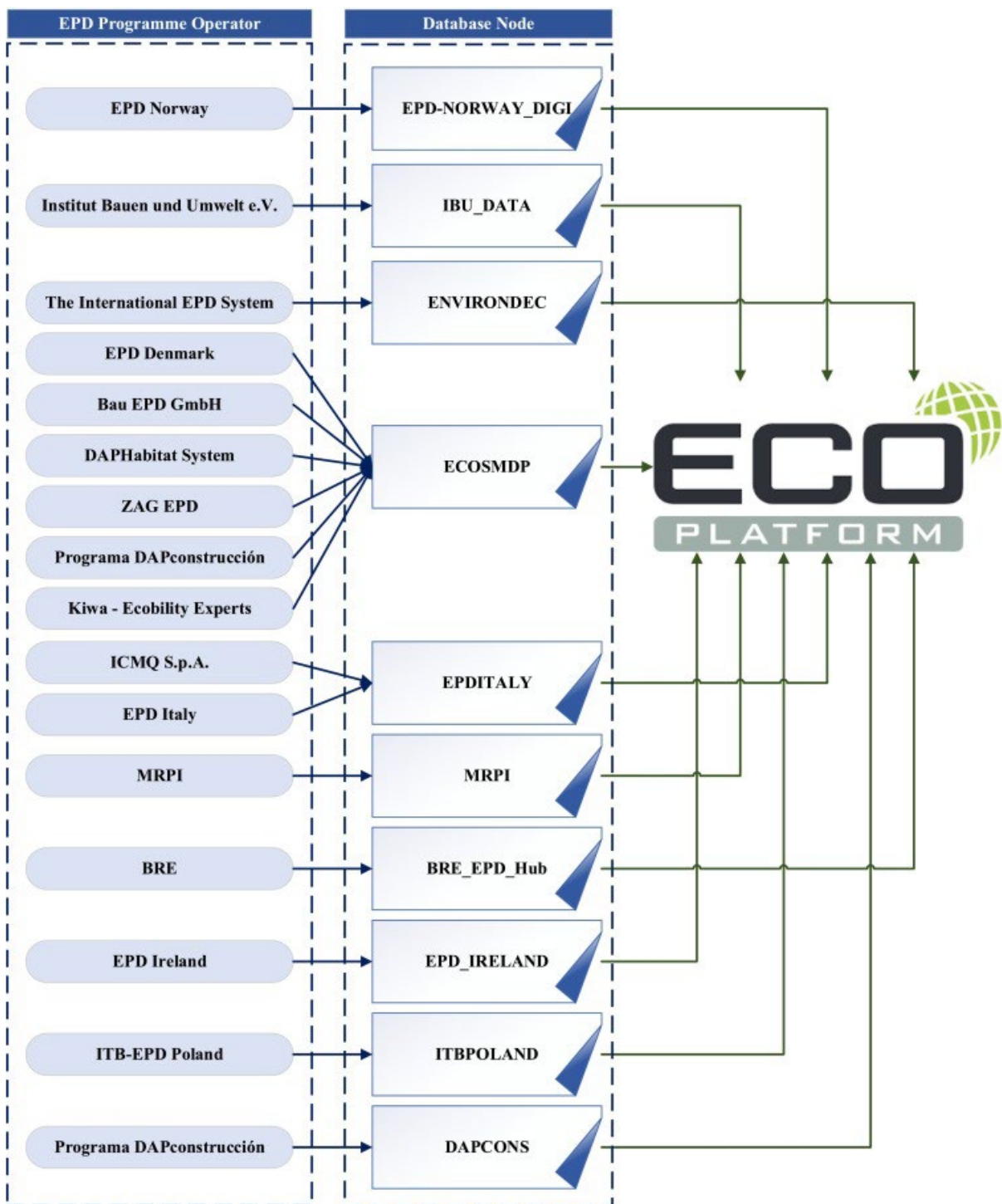


Рис. 3.29 - Структура бази даних ECO Platform [64]

Наступна платформа це – **EPD International** (<https://www.environdec.com>), що є глобальною системою верифікації та реєстрації екологічних декларацій продукції, заснованою на міжнародних стандартах ISO. Ця система надає виробникам з усього світу можливість створювати стандартизовані EPD, які визнаються на міжнародному рівні. Головною перевагою EPD International є її універсальність - вона підходить для різних галузей промисловості та типів

продукції, не обмежуючись лише будівельним сектором. Система працює через мережу акредитованих операторів у різних країнах, які забезпечують дотримання єдиних стандартів якості та методології оцінки життєвого циклу продукції.

EPD International грає важливу роль у забезпеченні глобальної порівнянності екологічних характеристик продуктів, що особливо важливо для компаній, які працюють на міжнародних ринках або входять до глобальних ланцюгів постачання. Система також сприяє поширенню найкращих практик у галузі екологічного менеджменту та стійкого виробництва, пропонуючи виробникам чіткі рамки для оцінки та вдосконалення екологічних характеристик своєї продукції. Завдяки своїй міжнародній визнаності EPD International стала важливим інструментом для багатонаціональних корпорацій та постачальників, які прагнуть демонструвати свою екологічну відповідальність на глобальному рівні.

Бібліотека EPD (EPD Library) на сайті [Environdec.com](https://www.environdec.com) – це централізована цифрова база даних, де публікуються та зберігаються верифіковані Декларації екологічних характеристик продукції (EPD), зареєстровані в системі The International EPD System. Вона служить публічним інструментом для поширення стандартизованої інформації про екологічний вплив продукції. Бібліотека включає екологічні декларації для різних галузей: будівництво, харчова промисловість, текстиль, упаковка тощо. Система також спрощує процес сертифікації зелених будівель за міжнародними стандартами, такими як LEED, BREEAM та DGNB, де наявність EPD є важливою вимогою.

Доступ до бібліотеки є безкоштовним та організований через зручну систему пошуку (<https://www.environdec.com/library>), що дозволяє фільтрувати декларації за типами продуктів, країнами походження, виробниками та датами публікації. Ця платформа постійно оновлюється новими деклараціями, відображаючи зростаючу свідомість виробників щодо необхідності прозорості екологічних показників.

База даних **Ökobaudat** (<https://www.oekobaudat.de/en.html>) є офіційною платформою Федерального міністерства житлового будівництва, міського розвитку та будівництва Німеччини, що надає стандартизовані дані про екологічні характеристики будівельних матеріалів та продуктів. Вона слугує

фундаментальним інструментом для оцінки життєвого циклу будівель та є обов'язковим джерелом для розрахунків втіленого вуглецю в німецьких стандартах будівельної галузі, таких як система сертифікації DGNB та оціночна система BNB для федеральних будівель. Усі дані в Ökobaudat представлені у чітко структурованому форматі, що дозволяє легко інтегрувати їх у спеціалізоване програмне забезпечення для моделювання екологічного впливу будівельних об'єктів.

Ökobaudat містить як загальні дані, усереднені для типових категорій продуктів, так і специфічні декларації окремих виробників, що проходять ретельну перевірку перед включенням до бази. Ця платформа грає ключову роль у забезпеченні прозорості, порівнянності та достовірності екологічної інформації, сприяючи переходу будівельної галузі до більш стійкого формату.

Набори даних відповідають суворим вимогам якості та можуть використовуватися в багатьох різних системах оцінки будівель. Система бази даних з функціями пошуку та фільтрації забезпечує зручний онлайн-пошук наборів даних.

Дані, опубліковані в ÖKOBAUDAT, є загальнодоступними безкоштовно. Відповідний власник наборів даних несе відповідальність за вміст та значення.

База даних **INIES** (www.inies.fr) є національною французькою платформою, що надає доступ до екологічних та санітарно-гігієнічних характеристик будівельної продукції та обладнання. Ця база даних була створена під егідою французької асоціації HQE і є офіційним джерелом інформації для оцінки екологічного впливу будівель у Франції.

INIES містить як загальні дані, розроблені технічними комітетами, так і специфічні дані від виробників, які пройшли строгу процедуру перевірки. Особливістю INIES є її комплексний підхід до оцінки продукції, який включає не лише традиційні екологічні показники, такі як вуглецевий слід або споживання енергії, але й дані про вплив на здоров'я людини, такі як викиди летких органічних сполук. Ця база даних є обов'язковим інструментом для всіх фахівців, які працюють

у сфері стійкого будівництва у Франції, зокрема для тих, хто займається сертифікацією будівель за стандартами HQE.

Оскільки INIES є національною французькою базою, основною мовою документів є французька. Доступ до бази даних INIES є безкоштовним. Пошук та перегляд інформації щодо необхідного продукту здійснюється на сторінці бази даних (<https://base-inies.fr/tableau-de-bord>).

Дані в INIES представлені у стандартизованому форматі, що дозволяє легко інтегрувати їх у програмне забезпечення для оцінки життєвого циклу будівель. База постійно оновлюється новими даними та розширює свій охоплення, включаючи все більше категорій продуктів та виробників. INIES відіграє ключову роль у сприянні екологічно відповідальному будівництву у Франції, забезпечуючи доступ до перевіреної та надійної інформації про вплив будівельних матеріалів на навколишнє середовище та здоров'я людей.

За аналогічними принципами функціонують бази даних EPD і в інших країнах, зокрема норвезька EPD Norway (<https://epd-global.no/>), італійська EPD Italy (<https://www.epditaly.it/>) та інші.

В Україні національна система EPD перебуває на етапі становлення. Набув чинності державний стандарт ДСТУ EN ISO 14025:2022 «Екологічні маркування та декларації. Екологічні декларації типу III. Принципи та процедури», ідентичний EN ISO 14025. Деякі українські виробники (особливо ті, що орієнтовані на експорт у ЄС) вже почали отримувати EPD для своєї продукції (наприклад, цементу, бетону, металовиробів) через міжнародні системи, такі як EPD International.

РОЗДІЛ 4. ЕКОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

4.1. Вплив типології архітектурно-будівельних систем на екологічні показники життєвого циклу

Всі архітектурні, конструктивні та технологічні рішення повинні забезпечувати необхідний рівень екологічних, соціальних та економічних показників.

Проектування з урахуванням вимог до збалансованого використання природних ресурсів прямо залежить від архітектурно-будівельних рішень будівлі та визначаються:

- запланованою довговічністю та тривалістю життєвого циклу;
- запланованою або потенційно можливою зміною архітектурно-планувального рішення або призначення;
- прогнозованими ремонтами, проведенням реконструкції або заміни окремих елементів при їх старінні.

Рациональне використання природних ресурсів протягом життєвого циклу будівлі залежить від окремих критеріїв, до яких належать:

- ремонтпридатність будівлі і, зокрема, її конструктивної основи;
- можливість повторного використання окремих конструктивних елементів;
- використання матеріалів, що придатні до перероблення і рециклінгу;
- використання матеріалів, які не є дефіцитними, не вимагають великих енерговитрат при виробництві, мають достатні поклади в природі або швидко поновлюються.
- відсоток матеріалів, що не підлягають рециклінгу і переробленню, але утилізація яких не є екологічною проблемою для довкілля.

В системі будівлі при її проектуванні рекомендовано виділити конструктивні елементи, що залишаються незмінними протягом всього життєвого циклу, та змінні (трансформативні) елементи архітектурно-будівельної системи.

Для незмінних конструктивних елементів необхідно передбачати ремонтпридатність в разі послаблення або руйнування.

Компенсація старіння частин будівлі, пов'язане з обмеженим строком їх ефективної експлуатації, зростанням нормативних вимог до цих конструкцій, появою нових ефективних рішень, забезпечується плановими капітальними ремонтами або реконструкціями із зміною цих частин без втручання в основні конструктивні елементи і з'єднання конструктивної основи.

Змінну частину архітектурно-будівельної системи слід виконувати з конструкцій, що забезпечують зручність та економічну доцільність їх заміни, або зміни планувального рішення з використанням тих же конструкцій, або продуктів їх перероблення.

Відповідно до зазначених вимог всі компоненти та елементи системи будівлі класифікуються наступним чином:

1) в залежності від категорії відповідальності конструкцій згідно з ДБН В.1.2-14

А - відмова (руйнування або непридатність до експлуатації) елемента призводить до прогресивного (лавиноподібного) обвалення значної частини будівлі або всієї будівлі в цілому. Це елементи, від яких залежить цілісність всієї конструктивної системи – фундаменти, колони, основні балки, на які спирається велика кількість інших елементів; елементи, що забезпечують просторову жорсткість (зв'язки, діафрагми жорсткості), ключові опорні вузли.

Б - відмова елемента призводить до руйнування окремих елементів, але не викликає прогресивного обвалення. Наслідки обмежуються локальною зоною. До них можна віднести другорядні балки, плити перекриттів, елементи покриття

В - відмова елемента не призводить до руйнування інших конструкцій. Наслідки обмежуються пошкодженням самого елемента. Наприклад, сходинок сходів, елементи огорожі, балконів, парапетів, перегородки, підвісні стелі тощо.

2) в залежності від терміну експлуатації

- до 10 років;
- 10-30 років;

- 30-60 років;
 - 60-100 років;
 - більше 100 років.
- 3) в залежності від ступеня стабільності та змінності елементів
- несуча система (каркас);
 - огорожувальні конструкції (оболонка);
 - елементи змінної планувальної структури (перегородки).

Відповідно до цієї класифікації всі елементи будівлі з точки зору проектування з урахуванням екологічних параметрів життєвого циклу поділяються на три типи (табл. 4.1):

Тип 1 - несучі конструкції, категорія А, строк служби 60–100 і більше років;

Тип 2 - огорожувальні конструкції, категорія Б, строк служби 30–60 років;

Тип 3 - перегородки, сантехніка, обладнання, категорія В, строк служби менше 30 років.

Таблиця 4.1

Класифікація конструкцій будівлі для проектування з урахуванням екологічних параметрів життєвого циклу

Тип	Ознака класифікації		
	Категорія відповідальності	Термін експлуатації	Ступінь стабільності в системі
Тип 1	А	60-100 років або більше 100 років	Несуча система, каркас
Тип 2	Б	30-60 років	Оболонка (огорожувальні конструкції)
Тип 3	В	10-30 років та менше	Змінні елементи

Ця класифікація дозволяє оптимізувати вибір матеріалів, методів будівництва та стратегій обслуговування, зменшуючи ресурсомісткість протягом життєвого циклу.

В залежності від розподілу надійності компонентів розрізняють три класи архітектурно-будівельних систем:

✓ Клас 1 (оптимальні системи) – розраховані на строк експлуатації понад 100 років. Включають диференційовані конструкції (типи 1–3), що дозволяють легко змінювати планувальні рішення без втручання в несучі елементи.

✓ Клас 2 (раціональні системи) – термін служби 30–60 років. Конструкції типів 1 і 2 часто об'єднуються (наприклад, зовнішня стіна є одночасно несучим остовом та огорожувальним елементом), що знижує вартість будівництва, але ускладнює майбутні зміни. При цьому елементи типу 3 залишаються відокремленими і не мають впливу на несучі та огорожувальні конструкції.

✓ Клас 3 (критичні системи) – термін експлуатації 10–30 років. Характеризуються недиференційованими конструкціями (наприклад, поєднання не тільки несучої та огорожувальної функції, але й несучої та архітектурно-планувальної), низькою адаптивністю та високими витратами на реконструкцію.

Архітектурно-будівельні системи класу 1 отримують визначення оптимальних для вирішення концепцій сталого будівництва споруд, розрахованих на довгий (більше 100 років) строк експлуатації. У порівнянні з варіантами повторного будівництва на місці розібраних будівель нових з урахуванням витрат на утилізацію розібраної будівлі дана концепція має дати не менше 30% економії. При цьому зберігається в надійному стані найбільш цінна частина будівлі, а моменти перепланувань і пристосувань до нових потреб і функцій доцільно не прив'язувати до етапів життєвого циклу об'єкту.

При проектуванні будівель класу 1 акцент робиться на використання автоматизованих систем управління та моніторингу технічним станом, ремонтпридатність, можливість заміни огорожувальних конструкцій і перегородок без зупинки експлуатації, застосування матеріалів з високим потенціалом повторного використання після завершення життєвого циклу.

Архітектурно-будівельні системи класу 2 отримують визначення раціональних для вирішення концепції сталого будівництва споруд, розрахованих на середній (30-60 років) строк експлуатації. Ці системи є раціональними в своєму часовому діапазоні. За умови реконструкції, ремонтів та заміни елементів та конструкцій, адаптації під нові потреби термін експлуатації може бути збільшений до 100 років. Системи моніторингу, заходи з енергозбереження, використання екологічних матеріалів підвищують характеристики системи класу 2.

Архітектурно-будівельні системи класу 3 мають такі ознаки:

- ✓ неможливість або підвищення загрози аварійних станів при спробі пристосування до іншого призначення (наприклад, перепланування квартир під сучасні вимоги або приміщень перших поверхів під громадські функції);
- ✓ значна вартість та технологічна складність проведення реконструкції або капітального ремонту із призупиненням експлуатації об'єкту на час проведення таких робіт.

Проектування і будівництво споруд класу 3 загалом суперечить вимогам стійкого будівництва і є рекомендованими для тимчасових або короткочасних за життєвим циклом будівель (від 10 до 30 років). Після завершення життєвого циклу для таких будівель доцільним є демонтаж і переробка матеріалів в нову сировину.

4.2. Базові положення екологічної оцінки життєвого циклу будівлі

Інтегрована оцінка життєвого циклу будівлі враховує способи зведення, функціонування та експлуатації, обслуговування та ремонту, модернізації та реконструкції, включно із демонтажем та знесенням, або повторним використанням чи переробкою.

Метою оцінок стійкості є збирання та подання інформації для прийняття рішень на різних етапах будівництва, проектування та експлуатації будівлі. На будівельному ринку доступні різноманітні інструменти оцінки стійкості, наприклад, BREEAM у Великобританії та LEED в США. Окрім цього існують програмні продукти для оцінки життєвого циклу будівлі, наприклад, Eco-Quantum

(Нідерланди), EcoEffect (Швеція), ENVEST (Великобританія), BEES (США), ATHENA (Канада) і One Click LCA (Великобританія).

Перелік параметрів, представлених на рис. 4.1, відображає функціональні вимоги до будівлі, які включають вплив на екологічні, соціальні та економічні показники і в комплексі формують загальну оцінку стійкості.

На рис. 4.2 показана блок-схема інтегрованої оцінки життєвого циклу будівельного об'єкта. Обов'язковим критерієм є оцінка впливу на навколишнє середовище. Показники стійкого розвитку дають інформацію про вплив конкретної галузі на природне середовище. Існують різні підходи до вибору показників через соціальні відмінності між країнами, традиціями промислового виробництва, природно-кліматичними та географічними умовами.

Екологічні показники	Соціальні показники	Економічні показники
Зміна клімату: Потенціал впливу на глобальне потепління. Викиди в повітря, воду та ґрунт: Руйнування озонового шару; Потенціал закислення родючого ґрунту; Потенціал евтрофікації (знищенням продуктивності водойм); Формування приземного озону; Утворення інертних відходів; Утворення небезпечних відходів. Ефективність використання води: Використання питної води; Використання дощової води. Виснаження ресурсів: Землекористування; Потенціал виснаження викопного палива.	Гідротермічний комфорт: Відносна вологість; Зимові теплові характеристики; Літні теплові показники; Якість повітря в приміщенні: Повітряну суспензію твердих частинок; Окис вуглецю; Вуглекислий газ; Озон; Формальдегід; Органічні леткі сполуки. Акустичний комфорт: Повітряна звукоізоляція; Звукоізоляція; Час реверберації. Візуальний комфорт: Використання природного освітлення; Освітлення.	Витрати за життєвий цикл: Витрати перед використанням будівлі; Витрати на обслуговування; Експлуатаційні витрати; Витрати на утилізацію будівлі; Ефективність рециклінгу; Залишкова вартість.

Рис. 4.1 - Параметри впливу на життєвий цикл будівлі

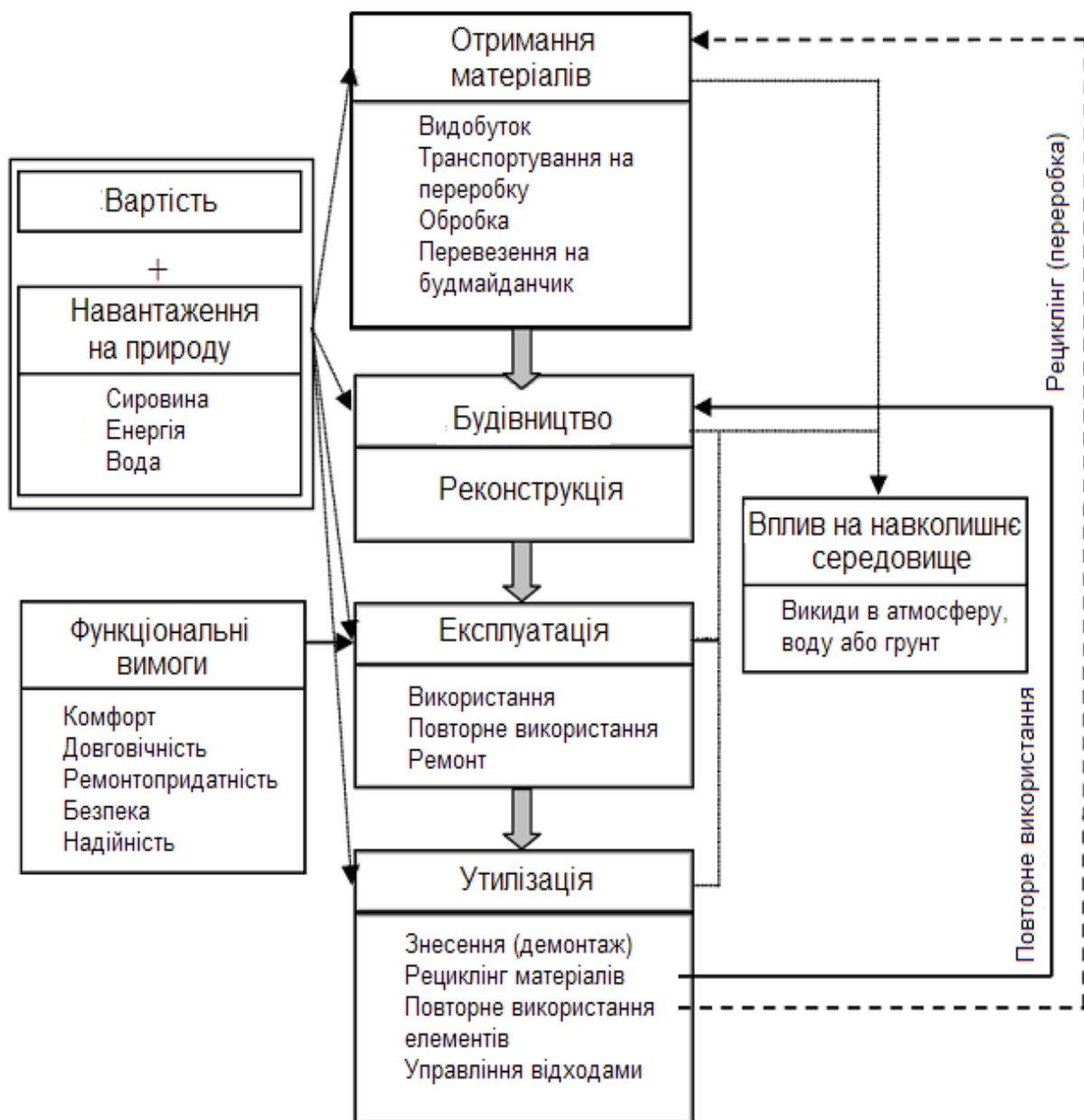


Рис. 4.2 - Блок-схема інтегрованої оцінки життєвого циклу будівельного об'єкта

Кількісна оцінка впливу на навколишнє середовище згідно європейських норм EN 15978:2011 (чинний аналог в Україні ДСТУ 9171:2021) виконується з урахуванням повного життєвого циклу.

Стандарт визначає основні індикатори екологічного впливу будівель, що наведені в табл. 4.2.

Стандарт EN 15978:2011 також містить вказівки щодо визначення функціональних одиниць, меж системи та сценаріїв.

Перелік індикаторів екологічного впливу на основі

Вплив на навколишнє середовище	• Потенціал глобального потепління • Потенціал виснаження стратосферного озонного шару • Потенціал підкислення землі та води • Потенціал евтрофікації • Потенціал утворення фотохімічних окисників тропосферного озону • Абіотичний потенціал виснаження ресурсів • Потенціал виснаження абіотичних ресурсів для викопного палива
Використання ресурсів	• Використання відновлюваної первинної енергії, за винятком енергетичних ресурсів, що використовуються як сировина • Використання відновлюваних первинних енергетичних ресурсів, що використовуються як сировина • Використання невідновлюваної первинної енергії, за винятком енергетичних ресурсів, що використовуються як сировина • Використання невідновлюваних первинних енергетичних ресурсів, що використовуються як сировина • Використання вторинного матеріалу • Використання відновлюваних вторинних видів палива • Використання невідновлюваних вторинних видів палива • Чисте використання прісної води
Категорії відходів і вихідний потік із системи	• Утилізація небезпечних відходів • Утилізація безпечних відходів • Поховано радіоактивних відходів • Компоненти для повторного використання • Матеріали для вторинної переробки • Матеріали для рекуперації енергії (не спалювання відходів) • Експорт енергії

Функціональна одиниця являє собою кількісне представлення показників системи будівлі для використання в якості еталонної одиниці» і включає фізичні та функціональні характеристики будівлі.

Межі системи визначають, які процеси будуть включені до оцінки. Наприклад:

✓ у випадку нової будівлі - розглядаються всі стадії життєвого циклу, від будівництва до остаточної утилізації;

✓ у випадку існуючої будівлі - часова межа починається з моменту втручання в життєвий цикл (наприклад, реконструкції чи модернізації) і завершується утилізацією.

Сценарій є гіпотезою, що застосовується до предмета дослідження і пов'язує фізичні характеристики зі змінною часу.

EN 15978:2011 організовано відповідно до «модульної» структури життєвого циклу будівлі, який включає чотири стадії:

- 1) виробництво;
- 2) будівництво;
- 3) експлуатація;
- 4) закінчення терміну служби.

Всі вищенаведені стадії розглядаються в окремих інформаційних групах, за кожною з яких приводиться інформація щодо екологічних впливів і особливостей об'єкта.

Інформаційна група А поділяється на 5 підгруп (від A1 до A5) і включає викиди в процесі видобування та постачання сировини, виробництво будівельних матеріалів, виробів та індустріальних конструкцій, їх транспортування на будівельний майданчик та безпосередньо процес будівництва (будівельно-монтажні роботи та пов'язані із ними процеси).

Інформаційна група В поділяється на 7 підгруп (від B1 до B7) і описує викиди на стадії експлуатації, технічного обслуговування, ремонту або заміну окремих елементів чи будівлі загалом, капітальний ремонт, а також забезпечення супутніх

потреб (наприклад, обслуговування прилеглих до будівлі ділянок, газонів, фонтанів тощо).

Інформаційна група С поділяється на 4 підгрупи (від C1 до C4) і описує викиди на стадії завершення життєвого циклу, на якому відбувається демонтаж, транспортування відходів з майданчика на підприємство по переробці або до місця захоронення, переробку відходів у вторинну сировину, захоронення відходів.

Інформаційна група D описує екологічні впливи, що не відносяться до життєвого циклу об'єкта, наприклад, подальше використання вторинної сировини, отриманої в результаті рециклінгу та інші можливості вторинного використання, які не включені в життєвий цикл об'єкта.

Організаційна схема стадій життєвого циклу та відповідних інформаційних модулів приведена на рис. 4.3. Окрім цього, EN 15978 визначає структуру результатів і перелік екологічних показників, які необхідно враховувати. Результати мають бути представлені відповідно етапів (виробництво, будівництво, експлуатація, кінець терміну служби, переробка) за інформаційними модулями (A, B, C та D).

Методологічною основою для оцінки інформаційних модулів згідно EN 15978 є екологічні декларації продукції (EPD), які дають можливість оцінити ресурсоємність та вплив на довкілля на основі набору даних, отриманих за результатами досліджень за стандартизованим методом. Це своєю чергою спрощує пошук вихідної інформації для оцінки вуглецевого сліду. Екологічні декларації продукції розробляються, затверджуються і реєструються в міжнародній базі за процедурою і структурою змісту згідно вимог міжнародного стандарту ISO 14025. Цей стандарт впроваджений до національної системи стандартизації як ДСТУ ISO 14025:2008 «Екологічні маркування та декларації. Екологічні декларації типу III. Принципи та процедури (ISO 14025:2006, IDT)».

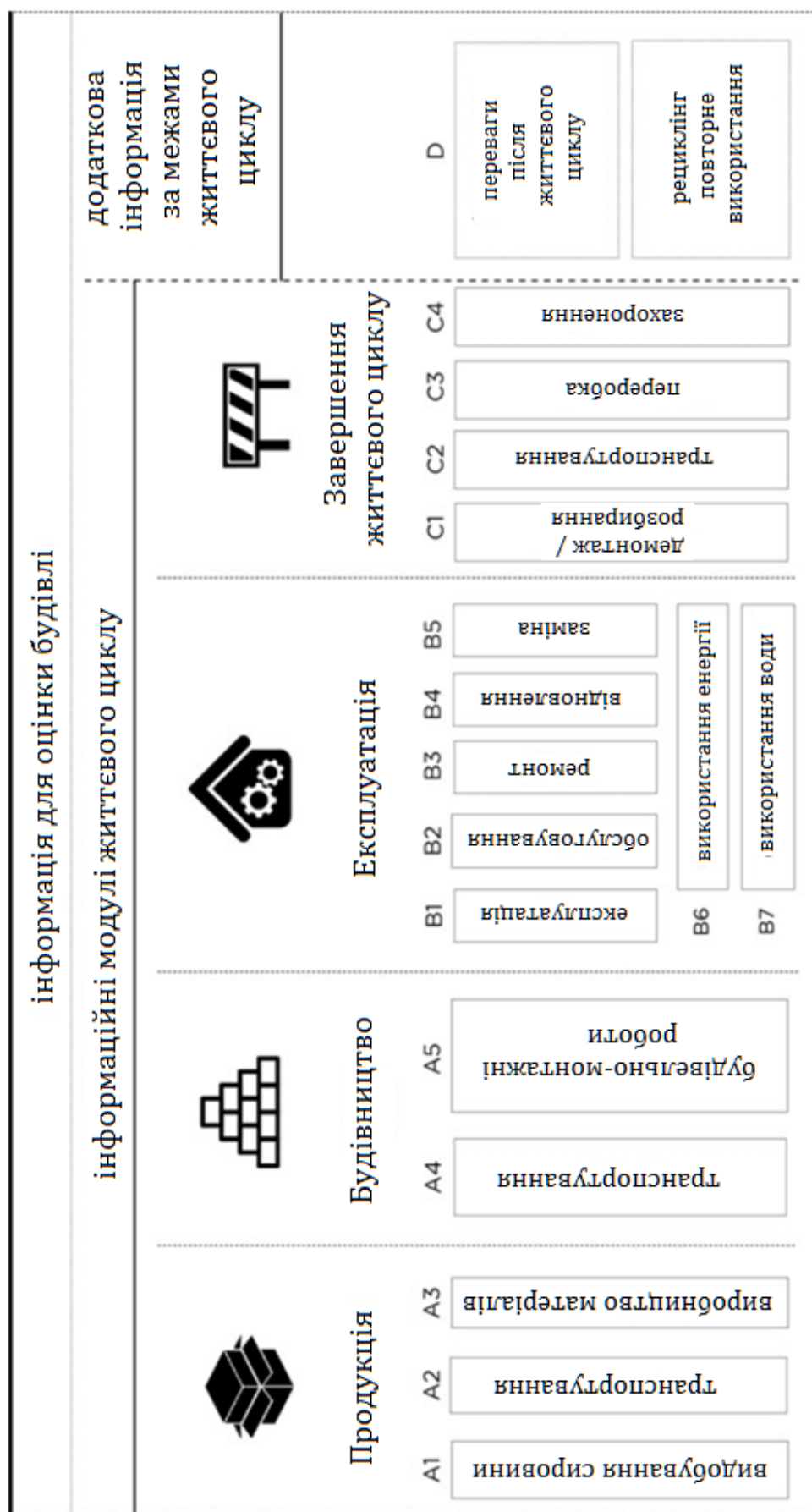


Рис. 4.3 - Організаційна схема стадій життєвого циклу та відповідних інформаційних модулів

4.3. Екологічна оцінка життєвого циклу на етапі проектування

Запровадження екологічно орієнтованого підходу протягом усього життєвого циклу об'єкта - від виробництва матеріалів до ліквідації, повторного використання або переробки – є ключовим принципом збалансованого та раціонального використання природних ресурсів в сучасному будівництві.

Екологічні показники життєвого циклу матеріалів для зведення, ремонту або реконструкції будівлі необхідно враховувати ще на етапі проектування.

Ключові вимоги до проектних рішень включають використання матеріалів та виробів, які забезпечують:

- ✓ мінімізацію кількості технологічних процесів через розробку відповідних архітектурно-конструктивних рішень;
- ✓ підтвердження відповідності екологічних характеристик матеріалів та виробів вимогам нормативних документів;
- ✓ розробку проектних рішень, спрямованих на обмеження генерації залишків матеріалів та утворення відходів на будмайданчику;
- ✓ мінімізацію або скорочення кількості та номенклатури нових матеріалів, що використовуються в проєкті;
- ✓ врахування специфіки та виду робіт при виборі проектних рішень (нове будівництво, реконструкція, ремонт, знесення).

Для кількісної оцінки екологічної ефективності будівлі зазвичай використовується показник потенціалу глобального потепління (GWP_c). Формула для розрахунку характеристичного показника GWP_c для будівлі виглядає наступним чином:

$$GWP_c = \sum_{i=1}^n GWP_{cat,i} \cdot Q_s,$$

де $GWP_{cat,i}$ – характеристичний показник потенціалу глобального потепління для i -того типу елемента будівлі на одиничний вимірник обсягу (матеріалу, виробу, процесу тощо);

n – кількість елементів будівлі, які оцінюються в межах системи;

Q_s – кількісний обсяг елементів оцінки, що стосуються елемента будівлі, (об'єм матеріалів, кількість виробів, машино-години тощо).

Дані щодо обсягів елементів можуть бути взяті з відомостей витрат матеріалів, проектно-кошторисної або виконавчої документації, матеріалів обстежень, технологічних карт процесів, рахунків-фактур і т.ін.

Характеристичні показники потенціалу глобального потепління на одиничні вимірники обсягів містяться у спеціалізованих базах даних, що складаються на основі екологічних декларацій продукції (EPD), даних виробників та постачальників.

Екологічна оцінка життєвого циклу може проводитися на різних ступенях деталізації: 1 - несучий остов будівлі; 2 – несучий остов та огорожувальні конструкції будівлі; 3 - несучий остов, огорожувальні конструкції, перегородки та допоміжні елементи; 4 - несучий остов, огорожувальні конструкції, перегородки, допоміжні елементи та інженерні системи. Ступень деталізації може змінюватися залежно від мети та визначених меж системи для проведення оцінки.

Укрупнені характеристичні показники потенціалу глобального потепління основних будівельних конструкційних матеріалів для експрес оцінки екологічного впливу несучих систем, огорожувальних конструкцій, перегородок та допоміжних елементів містяться в ДСТУ 9171:2021 і в скороченому вигляді наводяться в табл. 4.3.

З табл. 5.3 видно, що різні матеріали мають відмінні показники потенціалу глобального потепління. Наприклад, для сталі показник коливається від 0.687 до 2.766 кг CO₂-екв./кг, для бетону класу C30/37 – 303.4 кг CO₂-екв./м³, а для деревини (наприклад, дуба) показник є від'ємним (-114.37 кг CO₂-екв./м³), що вказує на її здатність депонувати вуглець.

Укрупнені характеристичні показники потенціалу глобального потепління
основних будівельних конструкційних матеріалів

Тип матеріалу або виробу	Од. вимір.	$GWP_{cat,i}$, кг
Сталеві зварні і прокатні елементи із звичайної сталі	кг	0,713
Сталеві замкнені профілі та труби	кг	0,921
Арматурний прокат гладкого і періодичного профілю, проволока	кг	0,687
Сталеві зварні і прокатні елементи із нержавійної сталі	кг	2,766
Сталеві прокатні листи (2-20 мм) із звичайної сталі, оцинковані глибокою гальванізацією	кг	1,103
Профілі і конструкції із алюмінієвих сплавів	кг	2,793
Бетон класу міцності C20/25	м ³	248,899
Бетон класу міцності C30/37	м ³	303,399
Цементно-піщаний розчин	м ³	380,639
Блоки на основі гранульованого шлаку	м ³	365,099
Повнотіла рядова та лицьова цегла	м ³	544,320
Газоблоки із середньою густиною 472 кг/м ³	м ³	267,141
Збірні залізобетонні плити перекриття товщиною 20 см; вагою 504 кг/м ² , бетон із сер.густиною 2.4 т/м ³ ; армування 120 кг/м ³	м ²	88,781
Збірні залізобетонні стінові панелі, товщиною 12 см; вагою 291,3 кг/м ² ; бетон із сер.густиною 2.4 т/м ³ , армування 0.5% об'єму	м ²	41,512
Керамзитобетонні порожнисті бетонні блоки для внутрішніх стін, із сер.густиною 1600 кг/м ³	м ³	398,413
Керамзитобетонні порожнисті бетонні блоки для зовнішніх стін, із сер.густиною 500 кг/м ³	м ³	176,042
Клеєний брус із деревини хвойних порід	м ³	88,715
Клеєні дошки із деревини хвойних порід; сер.густиною 515 кг/м ³ при вологості 12%	м ³	85,615
Пиломатеріали з цільної деревини ялини (12% вологість)	м ³	-55,269
Пиломатеріали з цільної деревини сосни (12% вологість)	м ³	-56,998
Пиломатеріали з цільної деревини модрина (12% вологість; густина 661 кг/м ³)	м ³	-33,212
Фанерні вироби, 5% вологість	м ³	265,117

При формуванні проєктних рішень слід розглядати декілька варіантів (сценаріїв) і обирати той, що в підсумку має найменший потенціал глобального потепління при дотриманні всіх вимог щодо архітектурно-планувальних рішень, конструктивної надійності, комфорту та безпеки.

Системний підхід до оцінки варіантів включає аналіз ресурсоефективності шляхом порівняння узагальнених витрат матеріальних ресурсів, енергії та відходів, що включає:

- ✓ кількість необхідних матеріалів та їх вартість на час будівництва і тенденції зміни вартості на етапі експлуатації;
- ✓ використання можливостей місцевої та/або регіональної ресурсної і промислової бази;
- ✓ трудомісткість заводська і будівельна; можливість оптимізація трудовитрат на зведення будівлі, наприклад, через застосування збірно-розбірних збірних технологій методів;
- ✓ необхідність залучення нестандартних та/або унікальних інструментів, механізмів, обладнання;
- ✓ технологічність проведення моніторингу технічного стану, ремонтно-відновлювальних заходів, технічної модернізації під час експлуатації та ліквідації об'єкту;
- ✓ необхідність та можливість вивезення, переробки та захоронення відходів.

При виборі будь-яких матеріалів та виробів для проєкту слід керуватися критерієм мінімізації утворення їх залишків як під час будівництва на будівельному майданчику, так і на етапах експлуатації (під час ремонтно-відновлювальних робіт) та ліквідації (під час демонтажу).

Ієрархія заходів із зменшення генерації залишків може включати заходи із простого запобігання утворенню залишків або захоронення (знищення) залишків. Проте з точки зору екологічності життєвого циклу краще застосовувати складніше планування, що включає архітектурно-конструктивні рішення придатні до прямого повторного чи альтернативного використання, рециклінг відходів та перероблення

залишків. Обсяг матеріалів або виробів, що можуть бути отримані від рециклінгу або повторного використання, дозволяє зменшити кількість ресурсів для нового будівництва, ремонту або реконструкції цього або іншого об'єкту. Тим самим зменшується потенціал глобального потепління від будівлі, що проєктується.

4.4. Приклад оцінки життєвого циклу та аналіз результатів

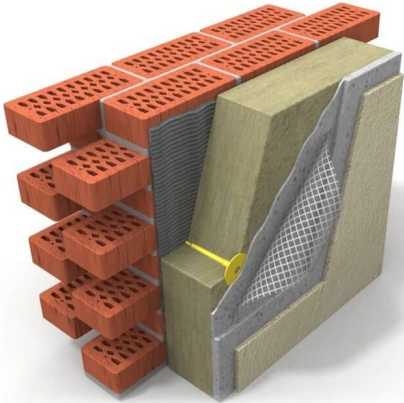
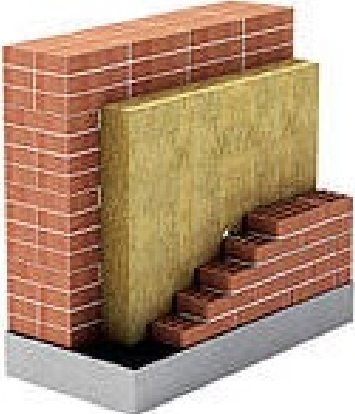
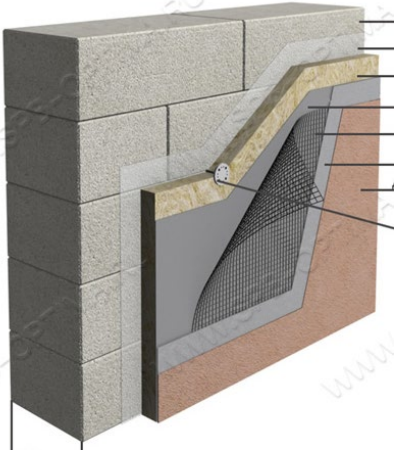
Відповідно до результатів огляду існуючих конструктивних рішень малоповерхових будівель для аналізу вуглецевого сліду було прийнято ряд найбільш розповсюджених на даний час як в Україні, так і закордоном:

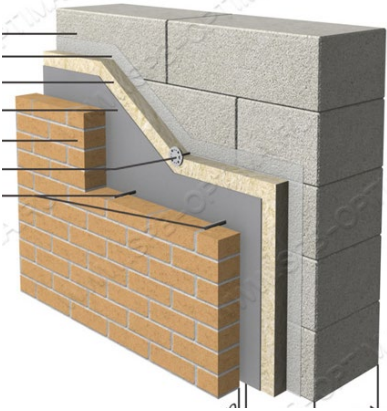
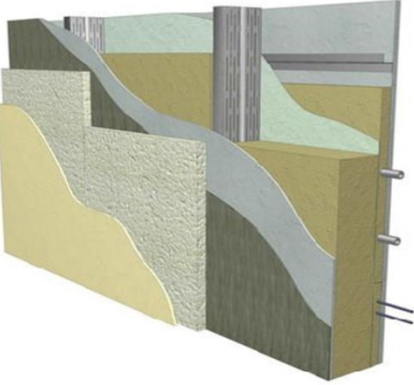
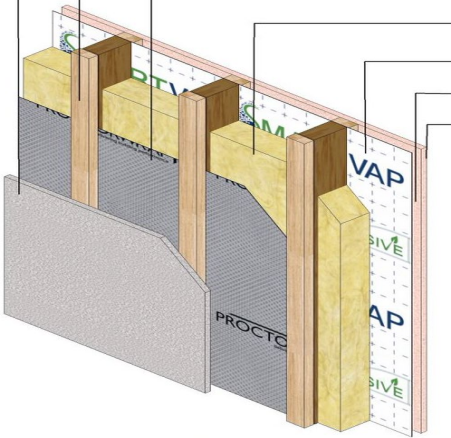
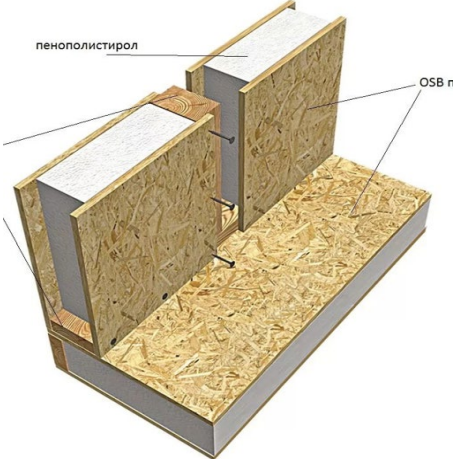
- 1) цегляна кладка із зовнішнім утепленням пінополістиролом та штукатуркою;
- 2) цегляна кладка із зовнішнім утепленням мінеральною ватою та облицюванням;
- 3) кладка з газобетонних блоків із зовнішнім утепленням пінополістиролом;
- 4) кладка з газобетонних блоків із зовнішнім утепленням мінеральною ватою та облицюванням;
- 5) панель з легких сталевих тонкостінних конструкцій (ЛСТК) з внутрішнім шаром утеплювача з мінеральної вати;
- 6) каркасно-щитова панель з дерев'яним каркасом з внутрішнім шаром утеплювача з мінеральної вати;
- 7) СІП-панель із двох плит обшивки з укладеним між ними пінополістиролом.

Витрати матеріалів для кожного виду стінової конструкції визначалися, виходячи із стандартного розміру стінової панелі в каркасному будівництві, який складає 1.2 x 2.5 м (ширина x висота). Ці розміри вважатимемо типовою одиницею, для якої визначатимуться характеристики вуглецевого сліду.

Таблиця 4.4

Конструктивні рішення стінових конструкцій, прийняті до аналізу

Ескіз стінової конструкції	Короткий опис елементів	Опір теплопередачі, $R, \text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$
	Цегла керамічна – 380 мм; Екструдований пінополістирол – 120 мм; Штукатурка цементно-піщана – 20 мм	4,17
	Цегла керамічна – 380 мм; Мінеральна вата – 120 мм; Цегла облицювальна – 120 мм	4,03
	Газобетонний блок – 300 мм; Екструдований пінополістирол – 50 мм; Штукатурка цементно-піщана – 20 мм	4,57

	Газобетонний блок – 300 мм; Екструдований пінополістирол – 50 мм; Цегла облицювальна – 120 мм	4,56
	ОСП – 18 мм ЛСТК профіль – 45х200 мм Мінеральна вата – 200 мм ГЛК – 12,5 мм	4,91
	ОСП – 18 мм Дерев'яний брус – 50х175 мм Мінеральна вата – 170 мм ГЛК – 12,5 мм	4,23
	ОСП – 18 мм Дерев'яний брус – 50х150 мм Екструдований пінополістирол – 150 мм ОСП – 18 мм	4,56

Витрати матеріалів на типову одиницю стінової конструкції визначалися у вигляді власної ваги. При цьому для цегли керамічної та облицювальної, штукатурки, мінеральної вати та екструдованого матеріалу, а також плитних виробів ОСП та ГКЛ вага розраховувалась за формулою:

$$g_i = b \cdot h \cdot t_i \cdot \rho_i,$$

де g_i – загальна вага i -го матеріалу на типову одиницю стінової конструкції;

b, h – ширина та висота типової одиниці стінової конструкції;

t_i – товщина i -го матеріалу;

ρ_i – питома вага i -го матеріалу.

Вага дерев'яних стійок каркасно-щитової панелі визначалася наступним чином:

$$g_w = b_w \cdot h_w \cdot h \cdot \rho_w \cdot n,$$

де g_w – загальна вага дерев'яних стійок на типову одиницю стінової конструкції;

b_w, h_w – ширина та висота дерев'яної стійки;

h – висота типової одиниці стінової конструкції;

ρ_w – питома вага деревини;

n – кількість дерев'яних стійок на типову одиницю каркасно-щитової панелі.

Вага стійок стінової панелі з ЛСТК була розрахована з використанням наступної формули:

$$g_L = h \cdot q_L \cdot n,$$

де g_L – загальна вага стійок з ЛСТК на типову одиницю стінової конструкції;

h – висота типової одиниці стінової конструкції;

qL – вага 1 м.п. профілю ЛСТК;

n – кількість дерев'яних стійок на типову одиницю каркасно-щитової панелі.

Вага 1 м.п. ЛСТК відповідно до сортаменту вітчизняних виробників для U-подібного профілю товщиною стінки 1,0мм розмірами 50x200 мм становить 2.341 кг/м.п. [52]

Результати визначення витрат матеріалів на типову одиницю стінової конструкції за прийнятими до аналізу видами приведені в табл. 4.5.

Розрахункові дані щодо вуглецевого сліду матеріалів стінових конструкцій визначались за даними екологічних декларацій продукції з використанням бази даних EPD international і приведені в табл. 4.6.

Таблиця 4.5

Визначення витрат матеріалів на типову одиницю стінової конструкції

Шифр	Опис	Склад	Питома вага, кг/м ³	Загальна вага на типову одиницю, кг
СТ1	цегляна кладка із зовнішнім утепленням пінополістиролом та штукатуркою	Цегла керамічна – 380 мм;	1600	1824
		Екструдований пінополістирол – 120 мм;	35	12,6
		Штукатурка цементно-піщана – 20 мм	1800	108
СТ2	цегляна кладка із зовнішнім утепленням мінеральною ватою та облицюванням	Цегла керамічна – 380 мм	1600	1824
		Мінеральна вата – 120 мм	100	36
		Цегла облицювальна – 120 мм	1300	468
СТ3	кладка з газобетонних блоків із зовнішнім	Газобетонний блок – 300 мм	400	360
		Екструдований пінополістирол – 50 мм	35	5,25

	утепленням пінополістиролом;	Штукатурка цементно-піщана – 20 мм	1800	108
СТ4	кладка з газобетонних блоків із зовнішнім утепленням мінеральною ватою та облицюванням;	Газобетонний блок – 300 мм;	400	360
		Екструдований пінополістирол – 50 мм	35	5,25
		Цегла облицювальна – 120 мм	1300	468
СТ5	панель з легких сталевих тонкостінних конструкцій (ЛСТК) з внутрішнім шаром утеплювача з мінеральної вати;	ОСП – 18 мм	1000	54
		ЛСТК – 1,0мм / 50х200 мм (3 шт.)	2.341 кг/м.п.	17,6
		Мінеральна вата – 200 мм	100	60
		ГЛК – 12,5 мм	800	30
СТ6	каркасно-щитова панель з дерев'яним каркасом з внутрішнім шаром утеплювача з мінеральної вати;	ОСП – 18 мм	1000	54
		Дерев'яний брус 50х175 мм (3 шт.)	600	39,4
		Мінеральна вата – 170 мм	100	51
		ГЛК – 12,5 мм	800	30
СТ7	СП-панель із двох плит обшивки з укладеним між ними пінополістиролом	ОСП – 18 мм	1000	54
		Дерев'яний брус 50х150 мм (2 шт.)	600	26,25
		Екструдований пінополістирол – 150 мм	35	15,75
		ОСП – 18 мм	1000	54

Таблиця 4.6

Розрахункові дані щодо вуглецевого сліду матеріалів стінових конструкцій

Найменування матеріалу	Викиди CO ₂ , кгCO ₂ екв/кг					
	Cbe	Cbt	Cbp	Cd2	Cd3	Cr
Цегла керамічна	0,147	1,412541	0,000143	0,00649	0,00339	-0,00563
Газобетонний блок	0,336	4,209302	0,0022	0,00416	0,0048	-0,00366
Цегла облицювальна	0,147	14,26667	0,000143	0,00649	0,00339	-0,00563
Штукатурка цементно-піщана	0,394	0,0072	0,0417	0,00829	0,0148	-0,00224
Екструдований пінополістирол	2,742	0,052975	0,01856	0,00774	3,3978	-1,41
Мінеральна вата	0,80586	2,0942	0,01944	0,001998	0,00828	-0,03078
ОСП	0,1717	3,363995	0,08704	0,007514	0,5457	-0,4862
ГКЛ	0,2268	0,039357	0,03024	6,108E-17	2,928E-14	-3,324E-14
ЛСТК	2,58	8	0,0498	0,017	0,00326	-0,0015
Дерев'яний брус	0,058859	3,18	0,003238	0,00303462	0,00143177	-0,211813

Результати визначення вуглецевого сліду прийнятих варіантів стінової конструкції із розподілом за окремими етапами життєвого циклу та сумарними викидами приведені в табл. 4.7 – 4.13.

Зведена таблиця та порівняльна діаграма вуглецевого сліду різних стінових конструкцій приведені в табл. 4.14. та на рис. 4.4.

Таблиця 4.7

Результати визначення вуглецевого сліду стіни із цегляної кладки із зовнішнім утепленням пінополістиролом та штукатуркою (тип СТ1)

Найменування матеріалу	Викиди CO ₂ , кгCO ₂ екв/кг						
	Cbe	Cbt	Cbp	Cd2	Cd3	Cr	CO2
Цегла керамічна	268,12800	2576,47525	0,26083	11,83776	6,18336	-10,269	2852,616
Екструдований пінополістирол	34,54920	0,66749	0,23386	0,09752	42,81228	-17,766	60,594
Штукатурка цементно-піщана	42,55200	0,77760	4,50360	0,89532	1,59840	-0,24192	50,085
Сумарні викиди	345,229	2577,920	4,998	12,831	50,594	-28,277	2963,295

Таблиця 4.8

Результати визначення вуглецевого сліду стіни з цегляної кладки із зовнішнім утепленням мінеральною ватою та облицюванням (тип СТ2)

Найменування матеріалу	Викиди CO ₂ , кгCO ₂ екв/кг						
	Cbe	Cbt	Cbp	Cd2	Cd3	Cr	CO2
Цегла керамічна	268,128	2576,4752	0,260832	11,83776	6,18336	-10,269	2852,616
Мінеральна вата	29,01096	75,3912	0,69984	0,071928	0,29808	-1,10808	104,364
Цегла облицювальна	68,796	6676,8	0,066924	3,03732	1,58652	-2,63484	6747,652
Сумарні викиди	365,935	9328,666	1,028	14,947	8,068	-14,012	9704,632

Таблиця 4.9

Результати визначення вуглецевого сліду стіни з газобетонних блоків із зовнішнім утепленням пінополістиролом (тип СТ3)

Найменування матеріалу	Викиди CO ₂ , кгCO ₂ екв/кг						
	Cbe	Cbt	Cbp	Cd2	Cd3	Cr	CO2
Газобетонний блок	120,96	1515,3488	0,792	1,4976	1,728	-1,3176	1639,009
Екструдований пінополістирол	14,3955	0,278119	0,09744	0,040635	17,83845	-7,4025	25,248
Штукатурка цементно-піщана	42,552	0,7776	4,5036	0,89532	1,5984	-0,24192	50,085
Сумарні викиди	177,908	1516,405	5,393	2,434	21,165	-8,962	1714,341

Таблиця 4.10

Результати визначення вуглецевого сліду стіни з газобетонних блоків із зовнішнім утепленням мінеральною ватою та облицюванням (тип СТ4)

Найменування матеріалу	Викиди CO ₂ , кгCO ₂ екв/кг						
	Cbe	Cbt	Cbp	Cd2	Cd3	Cr	CO2
Газобетонний блок	120,96	1515,3488	0,792	1,4976	1,728	-1,3176	1639,009
Екструдований пінополістирол	14,3955	0,278119	0,09744	0,040635	17,83845	-7,4025	25,248
Цегла облицювальна	68,796	6676,8	0,066924	3,03732	1,58652	-2,63484	6747,652
Сумарні викиди	204,152	8192,427	0,956	4,576	21,153	-11,355	8411,908

Таблиця 4.11

Результати визначення вуглецевого сліду стінової панелі з ЛСТК з внутрішнім шаром утеплювача з мінеральної вати (тип СТ5)

Найменування матеріалу	Викиди CO ₂ , кгCO ₂ екв/кг						
	Cbe	Cbt	Cbp	Cd2	Cd3	Cr	CO2
ОСП	9,2718	181,656	4,70016	0,405756	29,4678	-26,2548	199,246
ЛСТК	4540,8	267,52	876,48	299,2	57,376	-26,4	6014,976
Мінеральна вата	48,3516	125,652	1,1664	0,11988	0,4968	-1,8468	173,940
ГЛК	6,804	1,1807	0,9072	1,8324E-15	8,784E-13	-9,972E-13	8,892
Сумарні викиди	4605,23	576,008	883,254	299,726	87,341	-54,502	6397,054

Таблиця 4.12

Результати визначення вуглецевого сліду каркасно-щитової панелі з дерев'яним каркасом з внутрішнім шаром утеплювача з мінеральної вати (тип СТ6)

Найменування матеріалу	Викиди CO ₂ , кгCO ₂ екв/кг						
	Cbe	Cbt	Cbp	Cd2	Cd3	Cr	CO2
ОСП	9,2718	181,65572	4,70016	0,405756	29,4678	-26,2548	199,246
Дерев'яний брус	2,319063	7,3746208	0,02388	7,247E-05	1,03761E-07	-2,2E-08	9,718
Мінеральна вата	41,09886	106,8042	0,99144	0,101898	0,42228	-1,56978	147,849
ГЛК	6,804	1,1807143	0,9072	1,8324E-15	8,784E-13	-9,97E-13	8,892
Сумарні викиди	59,494	297,015	6,623	0,508	29,890	-27,825	365,705

Таблиця 4.13

Результати визначення вуглецевого сліду СП-панелі із двох плит обшивки з укладеним між ними пінополістиролом (тип СТ7)

Найменування матеріалу	Викиди CO ₂ , кгCO ₂ екв/кг						
	Cbe	Cbt	Cbp	Cd2	Cd3	Cr	CO2
ОСП	9,2718	181,65572	4,70016	0,405756	29,4678	-26,2548	199,246
Дерев'яний брус	1,545061	83,475	0,085	0,0796	0,03758	-5,560	79,662
Екструдований пінополістирол	43,1865	0,834357	0,29232	0,121905	53,51535	-22,2075	75,743
ОСП	9,2718	181,65572	4,70016	0,405756	29,4678	-26,2548	199,246
Сумарні викиди	63,275	447,621	9,778	1,013	112,489	-80,277	553,898

Таблиця 4.14

Зведені дані щодо викидів за окремими стадіями життєвого циклу та вуглецевим слідом стінових конструкцій малоповерхових будівель

Тип стінової конструкції	Викиди CO ₂ , кгCO ₂ екв/кг						
	Cbe	Cbt	Cbp	Cd2	Cd3	Cr	CO2
СТ1	345,23	2577,92	5,00	12,83	50,59	-28,28	2963,30
СТ2	365,93	9328,67	1,03	14,95	8,07	-14,01	9704,63
СТ3	177,91	1516,40	5,39	2,43	21,16	-8,96	1714,34
СТ4	204,15	8192,43	0,96	4,58	21,15	-11,35	8411,91
СТ5	4605,23	576,01	883,25	299,73	87,34	-54,50	6397,05
СТ6	59,49	297,02	6,62	0,51	29,89	-27,82	365,70
СТ7	63,28	447,62	9,78	1,01	112,49	-80,28	553,90

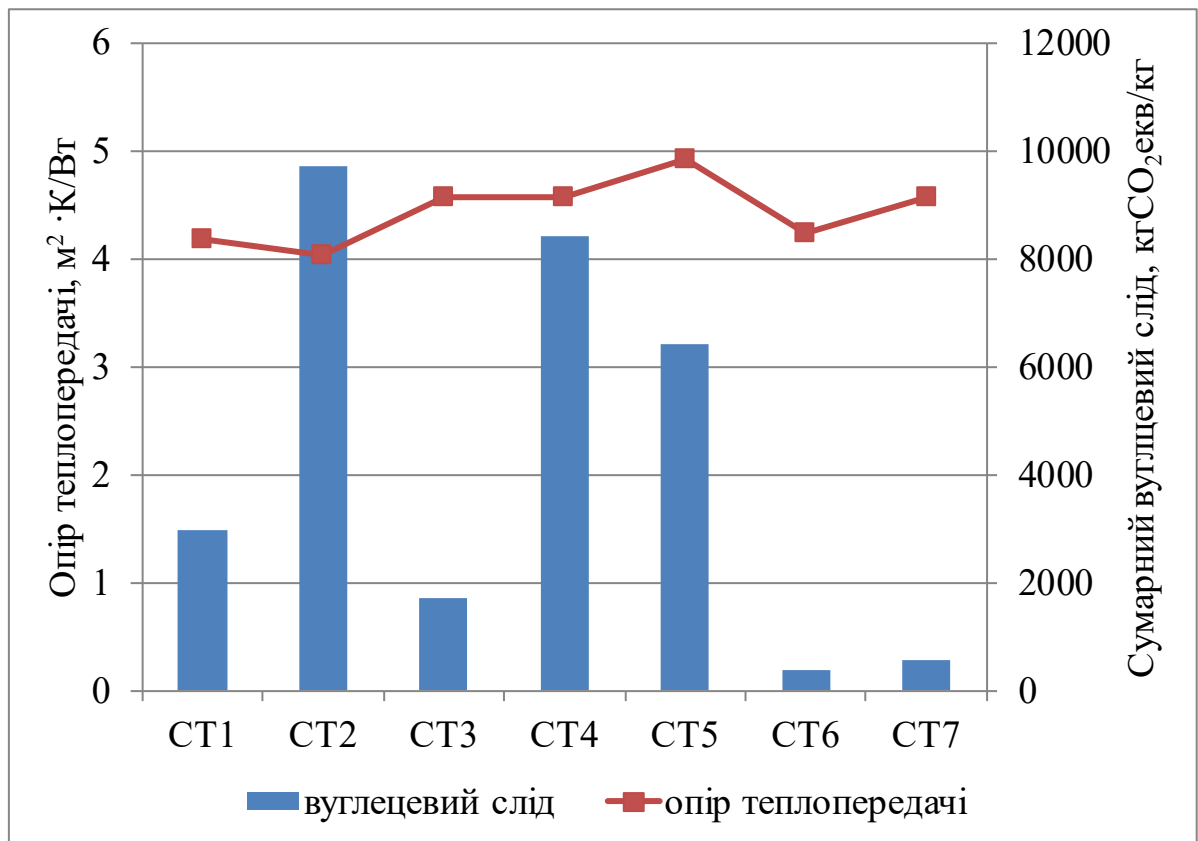


Рис. 4.4 - Порівняльна діаграма сумарного вуглецевого сліду та опору теплопередачі стінових конструкцій

Як видно з отриманих даних найбільшими викидами на етапі виробництва будівельних матеріалів характеризується стінова конструкція СТ5 з ЛСТК та утепленням з мінеральної вати $S_{be}=4605,23 \text{ кгCO}_2\text{екв/кг}$, тоді як для інших типів ця величина є на порядок нижчою – для стін із цегли 345.23 та 365,93 $\text{кгCO}_2\text{екв/кг}$, для стін з газобетонних блоків 177,91 та 204,15 $\text{кгCO}_2\text{екв/кг}$. На стадії транспортування будівельних матеріалів найбільші викиди мають обидва варіанти стін з облицюванням керамічною цеглою – $S_{bt}=9328,67 \text{ кгCO}_2\text{екв/кг}$ для стіни СТ2 з цегли керамічної та $S_{bt}=8192,43 \text{ кгCO}_2\text{екв/кг}$ для стіни СТ4 з газобетонного блоку. Так само істотними є викиди для стіни СТ1, що становлять $S_{bt}=2577,92 \text{ кгCO}_2\text{екв/кг}$, та СТ3, які дорівнюють $S_{bt}=1516,40 \text{ кгCO}_2\text{екв/кг}$. Що стосується стадій виконання будівельно-монтажних робіт та транспортування будівельних відходів, то для всіх варіантів стін викиди не є значними і варіюються в межах $S_{bp}=1,03..9,78 \text{ кгCO}_2\text{екв/кг}$ та $C_{d2}=0,51..14,95 \text{ кгCO}_2\text{екв/кг}$. Виключенням є варіант СТ5 з ЛСТК, який характеризується викидами $S_{bp}=883,25 \text{ кгCO}_2\text{екв/кг}$ та

$Cd_2=299,73$ кгСО₂екв/кг. Найбільші викиди вуглекислого газу при зберіганні відходів на звалищах утворюють конструкції СТ7, СТ5 та СТ1, які мають утеплення екструдованим пінополістиролом - $Cd_3=112,49$ кгСО₂екв/кг; 87,34 кгСО₂екв/кг та 50,59 кгСО₂екв/кг, відповідно.

Мінімальні значення викидів на всіх етапах мають стіни у вигляді дерев'яних каркасно-щитових панелей. Потенціал щодо рециклінгу мають всі розглянуті варіанти стін. Наприклад, керамічна цегла після розбирання може бути відсортована і використана в цільному вигляді у нових будівельних конструкціях або перероблена у вторинний заповнювач. Недоліком газобетонних блоків є те, що їх не можна повторно використовувати у формі будівельних блоків, як традиційну глиняну цеглу, проте при відповідному дробленні він може замінити мілкий наповнювач (пісок) при виготовленні бетонів. Деревина будівельних конструкцій може відіграти роль палива для обігріву в твердопаливних котлах у вигляді пеллетів або бути перероблена у стружку для створення нових інженерних виробів. Екструдований пінополістирол за сучасними технологіями рециклінгу використовується для виготовлення нового утеплювача, пакувальних матеріалів або паливних брикетів. Відходи мінеральної вати можуть бути використані в різних галузях виробництва (кераміка, наповнювач для композитних матеріалів на основі деревини, цементу промисловість тощо), а також в якості сировини для повторного виробництва цього ж утеплювача. Загалом потенціал рециклінгу впливає на зменшення загальних викидів, тому в результатах має від'ємне значення.

Підсумкове значення вуглецевого сліду є найбільшим для стін з облицюванням керамічною цеглою і складає 9704,63 кгСО₂екв/кг для цегляної стіни СТ2 та 8411,91 кгСО₂екв/кг для газобетонної стіни СТ4. При цьому стіна СТ2 з цегли із облицюванням також має найменше значення опору теплопередачі серед всіх розглянутих варіантів ($R=4,03$ м² К/Вт). Мінімальний вуглецевий слід 365,70 кгСО₂екв/кг при оптимальному відповідному значенні опору теплопередачі $R=4,23$ м² К/Вт має стіна СТ6 - каркасно-щитова панель з дерев'яним каркасом з внутрішнім шаром утеплювача з мінеральної вати.

РОЗДІЛ 5. ВІМ-ІНТЕГРОВАНА ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ БУДІВЕЛЬ

5.1. Автоматизація оцінки життєвого циклу за допомогою веб-платформи OneClickLCA

Як вже було відмічено у попередніх розділах, оцінка життєвого циклу – це стандартизована методологія для кількісного вираження впливу будівлі або будівельної продукції на навколишнє середовище на всіх етапах існування. Це включає:

- Виробництво матеріалів (стадії A1-A3): Видобуток сировини, транспортування, виробництво.
- Будівництво (стадії A4-A5): Транспортування на майданчик, монтаж.
- Експлуатацію (стадії B1-B7): Енергоефективність, обслуговування, заміни.
- Кінець життєвого циклу (стадії C1-C4): Демонтаж, транспортування, утилізація, переробка.
- За межами системи (стадія D): Потенційні переваги від повторного використання та переробки.

Результатом оцінки життєвого циклу є низка екологічних показників, таких як потенціал глобального потепління (GWP або "вуглецевий слід"), потенціал закислення, евтрофікації та ін.

Традиційно проведення LCA вручну було надзвичайно трудомістким процесом, що вимагало:

- ручного збору даних з сотень накладних та специфікацій.
- пошуку відповідних баз даних з екологічними профілями матеріалів.
- складних процесів інвентаризації всіх матеріалів, компонентів та процесів.
- постійного оновлення знань щодо змін у технологіях виробництва, тощо.

Такі виклики сповільнювали процес і обмежували його застосування. Вирішенням вищенаведених проблем є впровадження автоматизованого програмного забезпечення з можливістю імпорту даних з BIM-моделей, таке як OneClickLCA.

OneClickLCA – це провідна платформа для цифрової екологічної сертифікації будівель та продукції, що автоматизує та значно прискорює процес екологічної оцінки життєвого циклу. Вона інтегрує бази даних, глобальні стандарти та інструменти для імпорту даних, роблячи складні розрахунки доступними для інженерів, архітекторів і консультантів.

Платформа пропонує комплексний набір інструментів, організованих навколо кількох ключових функцій:

1. Бази даних та методики розрахунку

OneClickLCA містить попередньо завантажені дані з понад 60 тисяч видів матеріалів та продуктів з авторитетних джерел (наприклад, EPD, ICE, GaBi, ELCD). Платформа підтримує більшість глобальних стандартів та регулярно оновлюється відповідно до вимог таких систем сертифікації, як LEED, BREEAM, DGNB, а також національних норм. Для користувача доступні регіональні налаштування (вибір країни для урахування транспортних потоків, енергетичного профіля регіону тощо).

2. Інструменти імпорту даних

Найпотужніша функція OneClickLCA – це можливість безпосередньо імпортувати моделі BIM (Revit, IFC). Програмне забезпечення автоматично розпізнає елементи, зіставляє їх з матеріалами зі своєї бази даних і створює основу для розрахунку. Також в якості вихідних даних можна імпортувати файли зі списками матеріалів та їх кількістю, наприклад із кошторисів (у форматі Excel, CSV). Платформа має інтелектуальний помічник, який допомагає зіставити назви матеріалів із базою даних. Дані також можна вносити вручну.

3. Розрахунок та аналіз

Після імпорту або введення даних платформа автоматично розраховує всі екологічні показники для кожного етапу життєвого циклу. Результати

представляються у вигляді діаграм і графіків, що показують внесок різних категорій матеріалів (залізобетон, сталь, цегла тощо) у загальний вплив.

Користувач може створювати різні сценарії (наприклад, «як спроектовано» та «альтернативний») для порівняння впливу різних матеріалів або конструктивних рішень на ранніх етапах проектування. Це робить LCA інструментом для обґрунтування та прийняття проєктних рішень.

4. Звітність та сертифікація

Платформа автоматично генерує детальні звіти, необхідні для подання на сертифікацію за будівельними стандартами. Звіти включають всі необхідні дані, відслідковування змін і відповідність критеріям. Результати можна експортувати в різних форматах (PDF, Excel тощо) для подальшого аналізу або подання клієнту.

Ключові переваги використання OneClickLCA:

- скорочення часу на проведення оцінки життєвого циклу;
- мінімізація помилок в розрахунках та співставлення даних;
- зниження вартості проведення оцінки життєвого циклу.
- оптимізація екологічної ефективності проєкту;
- можливість спільної роботи над проєктом у хмарному сервісі.

OneClickLCA не тільки спрощує процес оцінки життєвого циклу/ Автоматизовані інструменти перетворюють оцінку з дорогого, ексклюзивного та ретроспективного аналізу на доступний, стратегічний інструмент проактивного проектування. Завдяки інтеграції з BIM та потужним інструментам аналізу, застосування автоматизованих програм, на кшталт OneClickLCA, стає незамінним помічником для будівельної галузі на шляху до декарбонізації.

5.2. Інтерфейс веб-платформи OneClickLCA та попередні налаштування проєкту

Робота із One Click LCA починається із входу на платформу за покликанням: oneclicklcaapp.com.

На стартовій сторінці (рис. 5.1, а) необхідно перейти до реєстрації. В новому вікні слід заповнити дані користувача та натисніть **Register** («Зареєструватися»,

рис. 5.1, б). Після входу користувач потрапляє на головну сторінку (**Home Page**), де можемо отримати доступ до вкладок веб-сервісу (рис. 5.2):

Projects («Проекти») - під час першого входу буде відображатися ряд демонстраційних проектів (Public Demo), доступних для перегляду. Щойно ви почнете додавати власні проекти, вони з'являться у вкладці «Your Projects» («Ваші проекти»).

Licenses («Ліцензії») - містить доступні підписки та додавати ліцензії.

Help («Допомога») - надає доступ до центру допомоги користувачам, журналу оновлень служби та бази даних, навчання тощо.

User («Користувач») – надає доступ до особистого облікового запису.

The image contains two screenshots of the OneClickLCA website interface. Screenshot (a) shows the 'Sign in to your account' page. It features a login form with an 'Email' input field and a green 'Sign in' button. Below this, there is a section 'Or sign in with' with buttons for Google and Microsoft. At the bottom, there is a 'New user?' link and a 'Register' button, which is highlighted with a red box and a red arrow. Screenshot (b) shows the 'Register' page. It contains a registration form with fields for 'First name' (labeled 'Ім'я'), 'Last name' (labeled 'Прізвище'), 'Email' (labeled 'адреса електронної пошти'), 'Password' (labeled 'Пароль'), and 'Confirm password' (labeled 'Підтвердіть пароль'). There is a blue link '« Back to Login' and a green 'Register' button at the bottom, which is also highlighted with a red box and a red arrow.

Рис. 5.1 - Стартова сторінка (а) та сторінка реєстрації (б) OneClickLCA

Щоб розпочати створення проекту оцінки життєвого циклу будівлі необхідно натиснути кнопку +Add («Додати») у правій верхній частині екрана та вибрати Building («Будівля») (рис. 5.3).

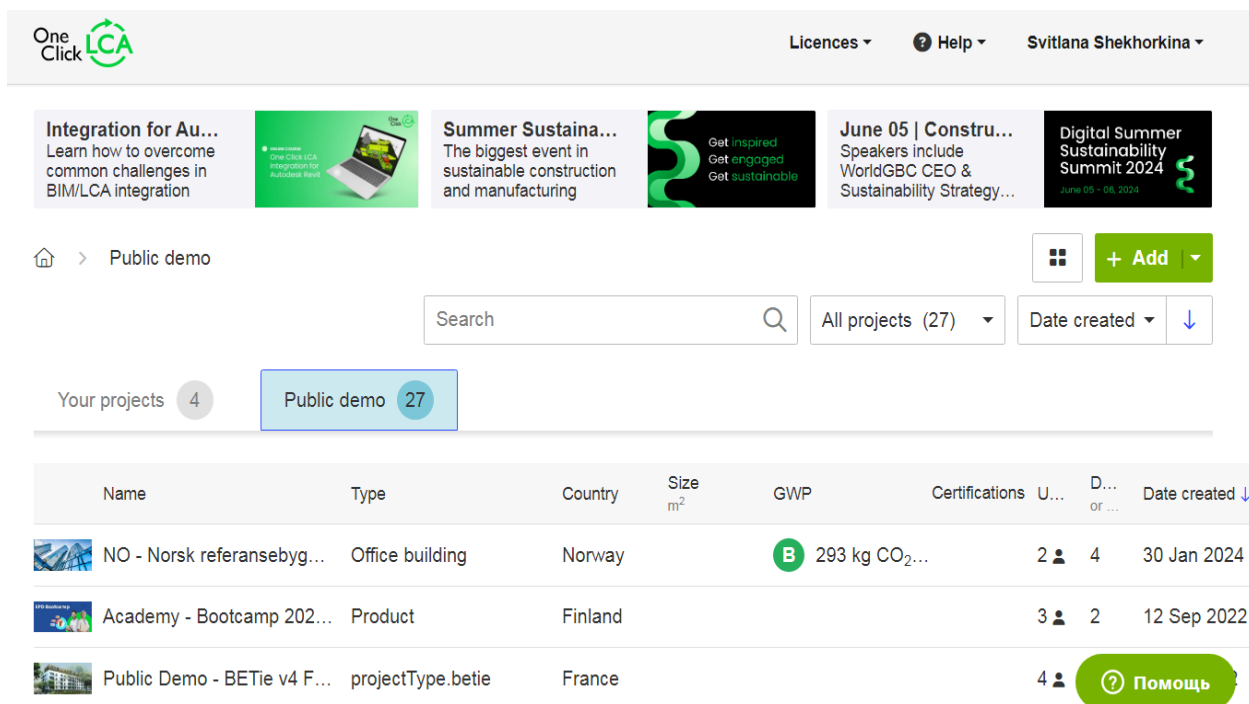


Рис. 5.2 - Головна сторінка веб-сервісу OneClickLCA

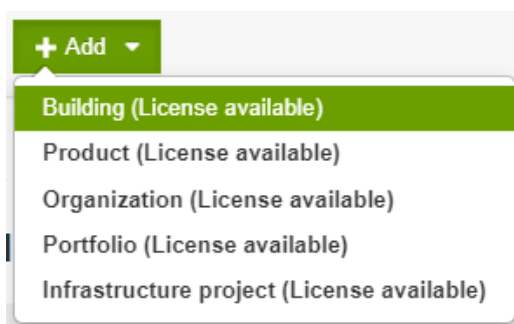


Рис. 5.3 - Створення проєкту

Після цього з'являється спливаюче вікно (рис. 5.4), в якому у вкладці **Basic information** («Базова інформація») слід ввести:

- Ліцензію - натиснути **Enter license key** («Ввести ліцензійний ключ») і застосувати наданий ліцензійний ключ.
- Назву вашого проєкту в полі **Name**, наприклад, «Мій перший проєкт»;
- Тип будівлі в полі **Type** – обрати зі спадаючого списку, наприклад, Apartment building («Житловий будинок»);
- Країну, де передбачається будівництво в полі **Country**. Це не вплине на результати, але покращить пошук даних у програмному забезпеченні, поставивши на перше місце точки даних для заданого регіону;

The image shows a two-step registration process. Step 1, 'Basic information', is the active tab. It includes a license key field, a mandatory name field (containing '1'), a folder dropdown (selected 'Main Page'), a mandatory type dropdown (selected 'Apartment buildings'), an address field (placeholder 'Type in at least 3 characters'), and a mandatory country dropdown (selected 'Ukraine'). Step 2, 'Optional information', is partially visible and includes a gross floor area field (100 m²), number of above ground floors (2), frame type dropdown (selected 'Not determined/not sure'), and an image upload section with an 'Upload' button and 'Drag & Drop Files' text. Navigation buttons 'Cancel', 'Back', and 'Next' are at the bottom of Step 1.

Рис. 5.4 - Вікно заповнення інформації про створений проєкт

Після цього у вкладці **Optional information** («Додаткова інформація») можна додати дані щодо загальної площі будівлі (поле **Gross floor area**), кількості надземних поверхів (поле **Number of above ground floors**) і тип каркасу (поле **Frame type**). Також передбачена опція додавання зображення для проєкту (поле **Image**).

Після натискання кнопки **Next** відбувається перехід на домашню сторінку проєкту **Project homepage** (рис. 5.5), де знаходяться вкладки:

Information («Інформація») - перегляд ліцензії та іншої інформації по проєкту;

Requests («Запити») - інформаційні запити по проєкту;

Attachments («Додатки») - прикріплення додаткових файлів;

Notes («Примітки») – створення текстових приміток.

Для початку роботи над проєктом натисніть кнопку **Get Started**.

Create a design

Name, design stage and calculation tools

Name ?

Design Option 1

Additional information (e.g. description in portfolio)

Stage of construction process (RIBA / AIA stages) ?

2 - Concept Design / Schematic Design

☒ Level(s) life-cycle assessment

Scope and type of analysis

Pre-defined scopes (if available)

Levels EU

Project type ?

New construction, whole building

Frame type ?

Concrete frame

Included parts. Check all applicable. ?

☒ Foundations and substructure

☒ Structure and enclosure

☒ Finishings and other materials

☒ External areas

☒ Services

Back

Next

Рис. 5.6 - Вікно налаштувань проєкту

Available calculation tools - Get more tools

Tools available in applied licences

☒ **Level(s) life-cycle assessment (EN15804 +A1)** Life-cycle assessment for Level(s) - overarching assessment tool 7: Cradle to cradle Life Cycle Asse [See all](#)

☒ **Level(s) life-cycle assessment (EN15804 +A2)** Life-cycle assessment for Level(s) - overarching assessment tool 7: Cradle to cradle Life Cycle Asse [See all](#)

☒ **Building Circularity** Material efficiency and circular economy - for BREEAM MAT 06 and GRI G4 reporting as well as other p [See all](#)

Toggle all

Next

Рис. 5.7 - Вікно вибору інструментів оцінки

▼ Design phase: 1 designs		⚙ Parameters ▼	+ Add a design	📊 Compare data	🏠 Carbon Designer 3D ▼	🔧 Tools ▼
Tool	Unit	2 - My first design ▼				
Level(s) life-cycle assessment (EN15804 +A1) ▼ ? Help	kg CO ₂ e	Input data  ▼				
Level(s) life-cycle assessment (EN15804 +A2) ▼ ? Help	kg CO ₂ e	Input data  ▼				
Building Circularity ? Help	%	Input data  ▼				

Рис. 5.8 - Вікно роботи над проєктом

5.3. Внесення даних для аналізу життєвого циклу на веб-платформі OneClickLCA

Після натискання на кнопку **Input data** користувач переходить до вкладок введення даних для аналізу.

Першою є вкладка **Building materials** («Будівельні матеріали», рис. 5.9), в якій за обраними при налаштуваннях категоріями конструктивних елементів необхідно вибрати у відповідних вкладках матеріали для їх виготовлення та ввести їх кількість.

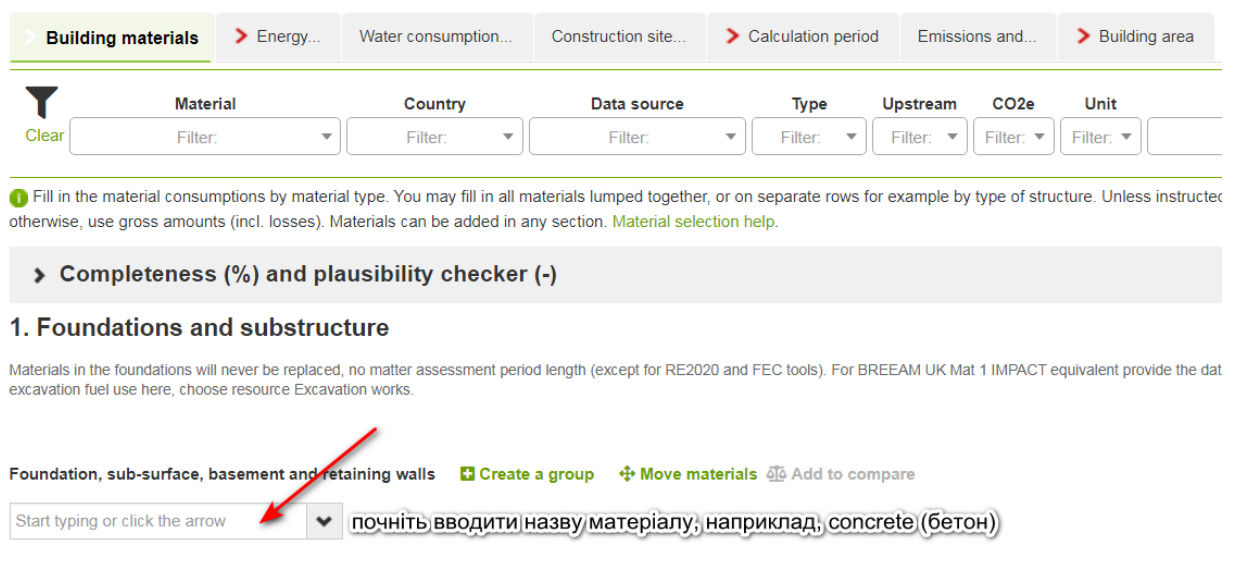


Рис. 5.9 - Вкладка **Building materials** («Будівельні матеріали»)

За замовчуванням передбачені наступні категорії конструктивних елементів:

1. **Foundations and substructure** (Фундаменти та підземні конструкції).
2. **Vertical structures and facade** (Вертикальні конструкції та фасади).
 - 2.1. **External walls and façade** (Зовнішні стіни та фасади)
 - 2.2. **Columns and load-bearing vertical structures** (Колони та несучі вертикальні конструкції – пілони, діафрагми жорсткості тощо)
 - 2.3. **Internal walls and non-bearing structures** (Внутрішні стіни та ненесучі конструкції)
3. **Horizontal structures: beams, floors and roofs** (Горизонтальні конструкції: балки, перекриття та покрівлі)

4. **Other structures and materials** (Інші конструкції та матеріали)

4.1. **Stairs, terraces** (Сходи, тераси).

4.2. **Windows and doors** (Вікна та двері).

4.3. **Finishes and coverings** (Оздоблення та підлоги)

5. **External areas and site elements** (Елементи зовнішньої території та майданчика – тротуари, вимощення тощо)

6. **Building technology** (Будівельна технологія – сантехніка, електрика, автоматика тощо).

Наприклад, для будівництва фундаменту передбачається використання бетону класу C20/25 в кількості 26,4 м³. Послідовність внесення даних про цей матеріал приведена на рис. 5.10. Внесення даних до всіх наступних вкладок виконується аналогічно.

В наступній вкладці **Energy consumption** («Споживання енергії») вносяться дані про річні витрати енергії та палива для побутових потреб, опалення та охолодження приміщень (рис. 5.11). Передбачені наступні поля:

1. **Electricity consumption** (Споживання електроенергії)

Розрахункова норма споживання електроенергії становить 100 кВт-год на родину з однієї особи. На кожного наступного члена сім'ї додатково дається 30 кВт-год на місяць, але не більше 220 кВт-год у сумі.

2. **Fuels demand, stationary units** (Споживання палива)

Розрахункова норма споживання газу становить 3,3 м³ на одну особу на місяць за наявності газової плити та централізованого гарячого водопостачання. У разі використання природного газу для індивідуального опалення – 5 м³ природного газу на 1 м² опалюваної площі на місяць в опалювальний період.

Далі на вкладці **Water consumption, annual** («Споживання води») заповнюються дані щодо річних витрат води на побутові та технічні потреби (рис. 6.12). Необхідно внести два значення:

1. **Tap water** («Водопровідна вода»)

2. **Wastewater from residence** («Каналізаційні стоки»).

Розрахункове споживання води на 1 людину на місяць становить:

6.3 м³/міс – в будинках з каналізацією і ванною з душем, без централізованої подачі ГВ (з газовим / електро водонагрівачем);

5.1 м³/міс – в будинках автономною каналізацією (септіком) і ванною з душем, без централізованої подачі ГВ (з газовим / електро водонагрівачем).

1. Foundations and substructure

Materials in the foundations will never be replaced, no matter assessment period length (except for RE2020 and FEC tools). For BREEAM UK excavation fuel use here, choose resource Excavation works.

Foundation, sub-surface, basement and retaining walls [+ Create a group](#) [+ Move materials](#) [Add to compare](#)

Start typing or click the arrow

- + Choose a category to see data or click here to see all.
- + Paints, coatings and lacquers - 1111 matches
- + Ready-mix concrete for external walls and floors C30-C35/4001-5500 psi - 1083 matches
- + Glass wool insulation - 1063 matches
- + Carpet flooring - 973 matches
- + **Ready-mix concrete for foundations and internal walls C20-C25/2501 - 4000 psi - 919 matches**
- + Ready-mix concrete for structures (beams, columns, piling) C40-C45/5501 - 6500 psi - 845 matches
- + Stone wool insulation - 827 matches

Foundation, sub-surface, basement and retaining walls [+ Create a group](#)

Start typing or click the arrow

- ☐ Ready-mix concrete, normal strength, generic, C25/30 (3600/4400 PSI)
- ☐ Ready-mix concrete, normal strength, generic, C25/30 (3600/4400 PSI)
- Click LCA
- ☐ **Ready-mix concrete, normal-strength, generic, C20/25 (2900/3600 PSI)**

Foundation, sub-surface, basement and retaining walls [+ Create a group](#)

Start typing or click the arrow

Resource Quantity

Ready-mix concrete, normal-strength

Рис. 5.10 - Послідовність внесення даних про вид та кількість матеріалу у вкладці **Building materials** («Будівельні матеріали»)

✓ Building materials
> **Energy consumption, annual**
Water...
Construction...
> Calculation period
Emissions and...
> Building area

1 For building life-cycle calculation and most other purposes the figures are provided on an annual basis. For product EPD calculations the data may also be given per unit product, if desirable.

1. Electricity consumption

Electricity use (mandatory)
 Select type of electricity and fill in the consumption and the use of electricity. The bought electricity is reported here. Electricity can be reported separate by purpose of use, or as overall electricity consumption. Average electricity is always used in building design stage calculations. For NS 3720 always use Norwegian degressive energy profiles here

Start typing or click the arrow

Resource	Quantity	CO ₂ e	Comment	Profile	Usage	
Electricity, Ukraine ?		kWh		IEA2021	Overall	change

2. Fuels demand, stationary units

Fuel use
 Select the fuels and fill in their consumption. Fuel for backup power generators is also typed in here. Select the fuels according to the unit you wish to use. Use fuel demand figures which account for efficiency. Do not provide transport fuels here.

Start typing or click the arrow

Resource	Quantity	CO ₂ e	Comment	Usage	
Natural gas ?		m ³		Overall	change

Рис. 5.11 - Вкладка **Energy consumption** («Споживання енергії»)

✓ Building materials
✓ Energy...
Water consumption, annual
Construction site...
> Calculation period
Emiss

1 This query collects data of water consumption.

1. The water consumption

Total water consumption
 Water embedded into structures or products is not reported here. They are reported separately.

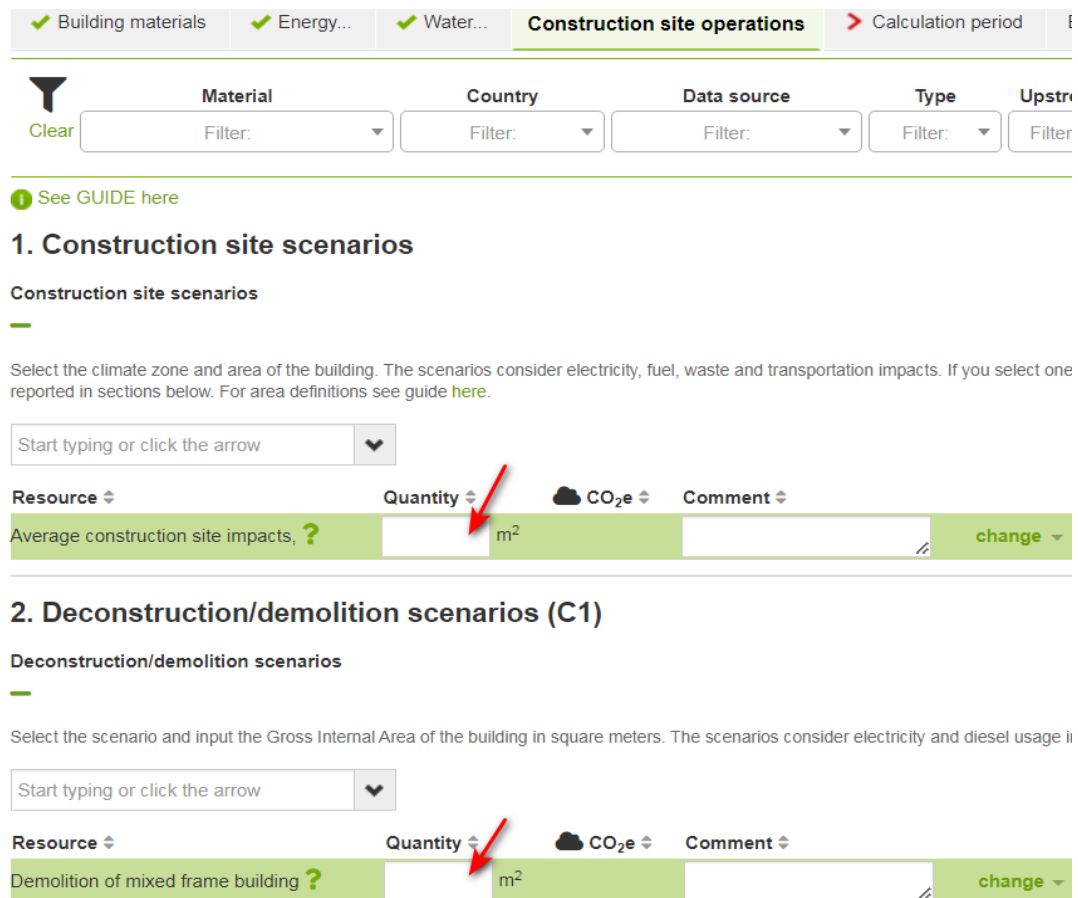
Start typing or click the arrow

Resource	Quantity	CO ₂ e	Comment	
Tap water, conventionally treated (?)		kg		change
Wastewater from residence ?		m ³		change

Рис. 5.12 - Вкладка **Water consumption, annual** («Споживання води»)

Вкладка **Construction site scenarios** («Сценарії будівельного майданчика») дозволяє отримати дані про викиди, пов'язані зі споживанням електроенергії, палива та виробництва відходів при виконанні будівельно-монтажних робіт по зведенню на початку життєвого циклу, а також по демонтажу при завершенні життєвого циклу будівлі. При цьому за відсутності у користувача детальної інформації про ці процеси веб-сервіс використовує усереднені дані по галузі для відповідного регіону, що віднесені до 1 м² площі будівлі. З огляду на це, у даній

вкладці слід внести значення загальної площі будівлі у відповідному полі (рис. 5.13).



✓ Building materials ✓ Energy... ✓ Water... **Construction site operations** > Calculation period f

Clear Material Country Data source Type Upstr

Filter: Filter: Filter: Filter: Filter

1 See GUIDE here

1. Construction site scenarios

Construction site scenarios

Select the climate zone and area of the building. The scenarios consider electricity, fuel, waste and transportation impacts. If you select one reported in sections below. For area definitions see guide [here](#).

Start typing or click the arrow

Resource	Quantity	CO ₂ e	Comment
Average construction site impacts, ?		m ²	

change

2. Deconstruction/demolition scenarios (C1)

Deconstruction/demolition scenarios

Select the scenario and input the Gross Internal Area of the building in square meters. The scenarios consider electricity and diesel usage in

Start typing or click the arrow

Resource	Quantity	CO ₂ e	Comment
Demolition of mixed frame building ?		m ²	

change

Рис. 5.13 - Вкладка **Construction site scenarios** («Сценарії будівельного майданчика»)

Остання вкладка **Calculation period** («Розрахунковий період») передбачає внесення терміну експлуатації будівлі. Рекомендованим значенням для житлових будівель є термін від 50 до 100 років. Період вноситься у відповідному полі вкладки (рис. 5.14).

Після завершення внесення даних необхідно натиснути на кнопку **Results**, щоб запустити розрахунок та перейти до результатів аналізу (рис. 5.15).

✓ Building materials ✓ Energy... ✓ Water consumption... ✓ Construction site... > **Calculation period**

i This query defines the service life (calculation period) of the building. [See GUIDE here](#)

1. Calculation period

Calculation period (mandatory)
 Required service life of the building. If not otherwise defined, use technical service life of the asset. Product replacements and maintenance at use allowed values between 0 and 80 years

| years

Рис. 5.14 - Вкладка **Calculation period** («Розрахунковий період»)

One Click LCA + Add Lice

Open the results. Saves and recalculates results automatically to ensure they are up to date.

Main > My first project > My first project > Level(s) life-cycle assessment (EN15804 +A1) > Input data : Building materials

Cancel Save **Results** Compare data (2) More actions

My first project

✓ Building materials ✓ Energy... ✓ Water consumption... ✓ Construction site... ✓ Calculation period

Рис. 5.15 - Запуск розрахунку

5.4. Перегляд результатів аналізу життєвого циклу на веб-платформі OneClickLCA

На сторінці перегляду результатів (рис. 5.16) доступні ряд вкладок, що дозволяють оцінити будівлю з точки зору її екологічного впливу.

Вкладка **Carbon Heroes Benchmark** («Клас будівлі за викидами») відображає шкалу із 7 класів за викидами вуглекислого газу (від найгіршого G до найкращого A) із позначенням класу, якому відповідає будівля (рис. 5.17).

Commercial usage is forbidden. Education Worldwide, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture (UA), 1 Named User, EDUCATION, Svitlana Shekhorkina 11.06.2024 13:43

CO₂ 162 Tonnes CO₂e 21.55 kg CO₂e / m² / year 8 081 € Social cost of carbon

- Carbon Heroes Benchmark
- Results
- Completeness (%) and plausibility checker (-)
- Most contributing materials
- Graphs

Classifications: Building Parts Change impact category

Рис. 5.16 - Загальний вигляд сторінки результатів

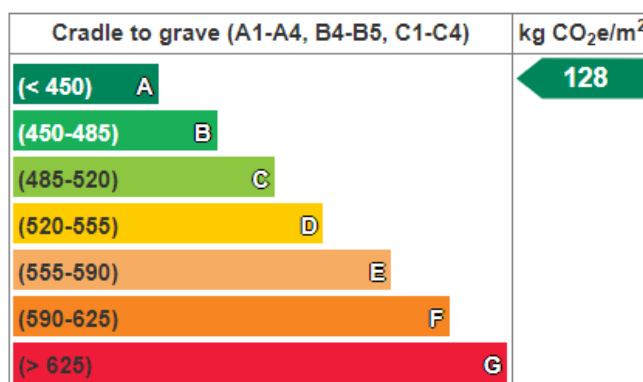


Рис. 5.17 - Шкала **Carbon Heroes Benchmark** («Клас будівлі за викидами»)

Вкладка **Results** («Результати») містить детальні результати обчислення кількості викидів за різними категоріями впливу (рис. 5.18):

- **Global warming** (Глобальне потепління);
- **Biogenic carbon storage** (Біогенне зберігання вуглецю);
- **Ozone Depletion** (Руйнування озонового шару);
- **Acidification** (Закислення);
- **Eutrophication** (Евтрофікація);
- **Formation of ozone of lower atmosphere** (Утворення озону нижніх шарів атмосфери);
- **Abiotic depletion potential for non fossil resources** (Потенціал абіотичного виснаження невикопних ресурсів);

— **Abiotic depletion potential for fossil resources** (Потенціал абіотичного виснаження викопних ресурсів).

З цієї вкладки можна завантажити отримані дані у файл Excel, натиснувши на кнопку **Download Results Summary**.

▼ Results

Life-Cycle Assessment for Level(s) in compliancy with EN 15978 [Download Results Summary](#)

Result category	Global warming kg CO ₂ e ?	Biogenic carbon storage kg CO ₂ e bio ?	Ozone Depletion kg CFC11e ?	Acidification kg SO ₂ e ?	Eutrophication kg PO ₄ e ?	Formation of ozone of lower atmosphere kg Ethenee ?	Abiotic depletion potential (ADP- elements) for non fossil resources kg Sbe ?	Abiotic depletion potential (ADP- fossil fuels) for fossil resources MJ ?
A1-A3 ? Construction Materials	1,63E+04	0,00E+00	7,42E-04	4,58E+01	2,04E+01	1,89E+00	1,46E+00	1,50E+05
+ A4 ? Transportation to site	1,68E+03		2,84E-04	2,46E+00	5,03E-01	2,53E-01	2,13E-04	2,22E+04
+ A5 ? Construction/installation process	3,80E+03		2,37E-04	1,96E+01	4,97E+00	7,77E-01	2,46E-01	5,15E+04
+ B1 ? Use phase								
+ B3 ? Repair	0,00E+00		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
+ B4-B5 ? Material replacement and refurbishment								
B6 ? Energy consumption	1,37E+05		4,57E-03	8,19E+02	2,77E+02	4,19E+01	7,20E-01	1,65E+06
B7 ? Water use	7,07E+02		6,68E-05	5,80E+00	2,35E+01	2,34E-01	3,52E-03	5,85E+03
+ C1-C4 ? End of life	2,00E+03		3,35E-04	8,75E+00	2,15E+00	3,50E-01	4,58E+00	3,71E+04
+ D ? External impacts (not included in totals)	-1,57E+04		-1,75E-04	-9,04E+01	-2,21E+01	-3,02E+00	2,83E-02	-4,04E+05
Total	1,62E+05	0,00E+00	6,24E-03	9,02E+02	3,28E+02	4,54E+01	7,01E+00	1,92E+06

Рис. 5.18 - Вкладка **Results** («Результати»)

Вкладка **Completeness and plausibility checker** («Перевірка повноти та достовірності») надає інформацію, наскільки повними є отримані результати на основі внесених вхідних даних. Програмне забезпечення надає рекомендації про бажані доповнення у вихідних даних для отримання більш достовірних даних. Попередження програми не означають, що поточні результати неправильні.

Вкладка **Most Contributing Materials** («Найбільш впливові матеріали») відображає перелік матеріалів, які характеризуються найбільшим потенціалом глобального потепління. Також програма пропонує переглянути більш екологічні альтернативи, для чого треба натиснути кнопку **Show sustainable alternatives** (рис. 5.19).

▼ Most contributing materials (Global warming)				
No.	Resource	Cradle to gate impacts (A1-A3)	Of cradle to gate (A1-A3)	Sustainable alternatives
1.	Reinforcement steel (rebar), generic, 0% recycled content (only virgin materials), A615  ?	33 tonnes CO ₂ e	47.9 %	Show sustainable alternatives
2.	Ready-mix concrete, normal-strength, generic, C20/25 (2900/3600 PSI), 0% recycled binders in cement (240 kg/m ³ / 14.98 lbs/ft ³)  ?	25 tonnes CO ₂ e	35.9 %	Show sustainable alternatives
3.	Perforated clay blocks, for walls, 910 kg/m ³  ?	11 tonnes CO ₂ e	16.2 %	Show sustainable alternatives

Рис. 5.19 - Вкладка **Most Contributing Materials** («Найбільш впливові матеріали»)

Вкладка **Graphs** («Діаграми») дозволяє переглянути та завантажити отримані результати у вигляді діаграм різного виду (кругових, стовпчастих, лінійних та деревоподібних). Діаграми є інтерактивними, тому при наведенні на них курсору можна побачити пов'язані з ними числа. При натисканні на ряд даних в легенді графіка можна тимчасово видалити його. Також доступне завантаження діаграм у кількох форматах.

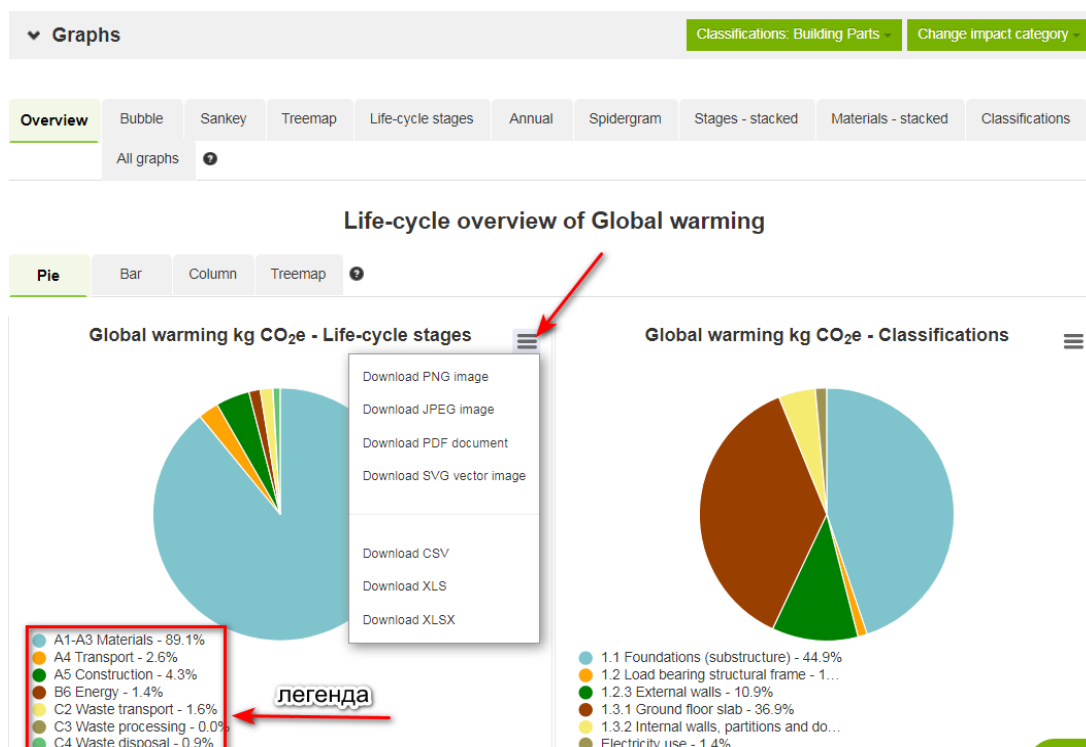


Рис. 5.20 - Вкладка **Graphs** («Діаграми»)

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, J. Randers, William W. Behrens III. The Limits to Growth. A report of the Club of Rome's Project on the predicament of mankind. New York, 1972. 205 p. URL : <https://www.donellameadows.org/wp-content/userfiles/Limits-to-Growth-digital-scan-version.pdf>.
2. Міжурядова група експертів зі зміни клімату. Вікіпедія. URL : https://uk.wikipedia.org/wiki/Міжурядова_група_експертів_зі_зміни_клімату. (дата звернення: 27.10.2025).
3. Global Risks 2006. A World Economic Forum Report. URL : https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2006.pdf. (дата звернення: 27.10.2025).
4. Global Risks Report 2025. 20th Edition. Insight report. World Economic Forum. URL : <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2025/>. (дата звернення: 27.10.2025).
5. Бордун М. Глобальні загрози і їх вплив на містобудування. *Український журнал будівництва та архітектури*, № 3 (027), 2025. С. 22 – 34. DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.22.1157.
6. Global Risks 2015. 10th Edition. Insight report. World Economic Forum. URL : <https://www.weforum.org/publications/global-risks-2015/>. (дата звернення: 27.10.2025).
7. Устінова І.І., Козятник І.П. Проблеми змін клімату у контексті містобудівних задач. II-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю (Екологія / Ecology – 2009) : Збірник наукових статей, м. Вінниця, 23 – 26 вересня 2009 р. Вінниця : ФОП Данилюк, 2009. С.412 – 416.
8. Ten things to know about the New Urban Agenda as we approach Habitat +5 | Urban Agenda Platform. NUA-home | Urban Agenda Platform. URL: <https://www.urbanagendaplatform.org/tenthings-to-know-about> (дата звернення: 27.10.2025).

9. The first world conference on the environment. United Nations. URL : <https://www.un.org/en/conferences/environment/stockholm1972>. (дата звернення: 27.10.2025).

10. UNEP - UN Environment Programme. UNEP - UN Environment Programme. URL: <https://www.unep.org/> (дата звернення: 27.10.2025).

11. World conservation strategy. Living Resource Conservation for Sustainable Development. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN). URL : <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/wcs-004.pdf>. (дата звернення: 27.10.2025).

12. Report of the United Nations Conference on environment and development. Annex I. Rio de Janeiro, 3-14 June 1992. URL : https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_CONF.151_26_Vol.I_Declaration.pdf (дата звернення: 27.10.2025).

13. UNFCCC. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol> (дата звернення: 27.10.2025).

14. UNFCCC. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> (дата звернення: 27.10.2025).

15. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. URL : <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf> (дата звернення: 27.10.2025).

16. Історія – Сталий розвиток для України. Сталий розвиток для України – Сталий розвиток для України. URL: <https://dev.sd4ua.org/shho-take-stalij-rozvitok/istoriya/> (дата звернення: 27.10.2025).

17. 17 Цілей сталого розвитку | Global Compact. Global Compact. URL: <https://globalcompact.org.ua/tsili-stijkogo-rozvytku/> (дата звернення: 27.10.2025).

18. The Life Cycle of a Plastic Product : From Cradle to Grave for a Thousand Years. Plastic Pollution. URL: <https://plasticpollutionblogsite.wordpress.com/2016/09/14/the-life-cycle-of-a-plastic->

product-part-1-from-cradle-to-grave-for-a-thousand-years/ (дата звернення: 27.10.2025).

19. The Life Cycle of a Plastic Product : Reworking and Looping the Cycle. Plastic Pollution. URL: <https://plasticpollutionblogsite.wordpress.com/2016/09/21/the-life-cycle-of-a-plastic-product-part-2-reworking-the-cycle/> (дата звернення: 27.10.2025).

20. Contributors to Wikimedia projects. Circular economy - Wikipedia. Wikipedia, the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Circular_economy (дата звернення: 27.10.2025).

21. William McDonough Waging Peace Through Commerce. William McDonough. URL: <https://mcdonough.com/>. (дата звернення: 27.10.2025).

22. Мазанко Т. О. Критичний аналіз еволюції наукових поглядів на циркулярну економіку. *«Економічний вісник НТУУ "Київський політехнічний інститут"»* (20), 2021. С. 31 – 36. DOI: 10.20535/2307-5651.20.2021.252590.

23. Braungart M., McDonough W., Bollinger A. Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design. *Journal of Cleaner Production*. 2007. № 15 (13 – 14). 2007. P. 1337–1348. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.003>.

24. Регенеративний дизайн повоєнного відновлення і розвитку України: колективна монографія / М. Савицький, М. Бевз, А. Радкевич [та ін.]; за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. М. Савицького. – Дніпро: ФОП Скрипець О.М., 2024. – 124 с.

25. International urban agendas and sustainable integrated urban develo... OpenEdition Journals. URL: <https://journals.openedition.org/cidades/3475> (дата звернення: 27.10.2025).

26. The WEF Nexus Index - The WEF Nexus Index. The WEF Nexus Index - The WEF Nexus Index. URL: <https://wefnexusindex.org/> (дата звернення: 27.10.2025).

27. Contributors to Wikimedia projects. Water, energy and food security nexus - Wikipedia. Wikipedia, the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Water,_energy_and_food_security_nexus (дата звернення: 27.10.2025).

28. The European Green Deal. European Commission. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (дата звернення: 27.10.2025).

29. Європейський зелений курс (European Green Deal). Представництво України в Європейському Союзі. URL: <https://ukraine-eu.mfa.gov.ua/posolstvo/galuzeve-spivrobitnictvo/klimat-yevropejska-zelena-ugoda> (дата звернення: 27.10.2025).

30. Білик А.С. Екологічний та економічний аналіз життєвого циклу каркасів будівель: монографія. – К.: УЦСБ, КНУБА, 7БЦ, 2022. – 263 с.

31. Monticelli C., Zanelli A. Life Cycle Design and Efficiency Principles for Membrane Architecture: Towards a New Set of Eco-design Strategies. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 155. P. 416–425. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.045> (дата звернення: 27.10.2025).

32. Building Life Cycle Assessment. *Envirolink.me*. URL: <https://www.envirolink.me/building-life-cycle-assessment/> (дата звернення: 27.10.2025).

33. Koroneos C., Dompros A. Environmental assessment of brick production in Greece. *Building and Environment*. 2007. Vol. 42, no. 5. P. 2114–2123. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.03.006> (дата звернення: 27.10.2025).

34. Gibberd J. Sustainability impacts of building products: An assessment methodology for developing countries. *Acta Structilia*. 2014. Vol. 21, no. 2. P. 69–84. URL: <https://doi.org/10.38140/as.v21i2.152> (дата звернення: 27.10.2025).

35. Cutieru A. A Guide to Design for Disassembly. *ArchDaily*. URL: <https://www.archdaily.com/943366/a-guide-to-design-for-disassembly> (дата звернення: 27.10.2025).

36. ДСТУ ISO 14040:2013. Оцінювання життєвого циклу. Принципи та структура. (ISO 14040:2006, IDT). Національний стандарт України. – Київ, Мінекономрозвитку України, 2014. 17 с.

37. ДСТУ ISO 14044:2013. Оцінювання життєвого циклу. Вимоги та настанови. (ISO 14044:2006, IDT). Національний стандарт України. – Київ, Мінекономрозвитку України, 2014. 37 с.

38. World Green Building Council. URL: <https://worldgbc.org/> (дата звернення: 27.10.2025).

39. LEED Certification: An International Standard - Wattsense. Wattsense. URL: <https://www.wattsense.com/blog/regulations/leed-certification-an-international-standard/> (дата звернення: 27.10.2025).

40. constructingexcellence. BREEAM & WELL Buildings Standard, Chris Ward, BREEAM. Slideshare. URL: <https://www.slideshare.net/slideshow/breeam-well-buildings-standard-chris-ward-breeam/72233454> (дата звернення: 27.10.2025).

41. About the DGNB System. DGNB GmbH. URL: <https://www.dgnb.de/en/certification/important-facts-about-dgnb-certification/about-the-dgnb-system> (дата звернення: 27.10.2025).

42. Experimental study on the preparation of wood aggregate recycled concrete using waste wood and recycled fine aggregate from construction and demolition wastes / P. Wang et al. Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 90. P. 109471. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109471> (дата звернення: 27.10.2025).

43. Process of Silica Fume Production | VALO Concrete. Valo Concrete. URL: <https://www.valoconplus.com/pt/knownledges-corner/process-of-silica-fume-production> (дата звернення: 27.10.2025).

44. Towards Carbon-Neutral Built Environment: A Critical Review of Mycelium-Based Composites / Y. Jin et al. Energy and Built Environment. 2025. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2025.01.004> (дата звернення: 27.10.2025).

45. 12 sustainable alternatives to traditional concrete. University of the Built Environment. URL: <https://www.ube.ac.uk/whats-happening/articles/concrete-alternatives/> (дата звернення: 27.10.2025).

46. Green Concrete: An Eco-Friendly Alternative to the OPC Concrete / D. A. F. Hashmi et al. CONSTRUCTION. 2022. Vol. 2, no. 2. P. 93–103. URL: <https://doi.org/10.15282/construction.v2i2.8710> (дата звернення: 27.10.2025).

47. Yadav, R., & Kumar, J. (2022). Engineered Wood Products as a Sustainable Construction Material: A Review. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.99597.

48. Порівняння конопляних утеплювачів. HEMPBUD. URL: <https://hempbud.com.ua/konopliani-utepliuвачi-vid-ukrainskykh-vyrobnykiv-porivniannia-ruloniv-dlia-idealnoho-uteplennia/> (дата звернення: 27.10.2025).

49. Солом'яний дім. Будинок із солом'яних тюків в каркасі. Будинок із соломи. Все про екодома в деталях. Натуральні види будівництва екодомів будинків із природних матеріалів.. Екодома - сайт про екологічні будинки. URL: <https://ecodoma.in.ua/dom-iz-solomennih-blokov.html> (дата звернення: 27.10.2025).

50. Second Life for Steel: The Rise of Circular Bridges. The International Information Center for Civil Engineers | TheCivilEngineer.org. URL: <https://www.thecivilengineer.org/news/second-life-for-steel-the-rise-of-circular-bridges> (дата звернення: 27.10.2025).

51. Recycled bricks - bunbury landscaping supplies. bunbury landscaping supplies. URL: <https://bunburylandscapingsupplies.com.au/all-products/recycled-bricks/> (дата звернення: 27.10.2025).

52. Recycled brick house extension in Melbourne | Inspiration & Advice. House Renovation Builders & Contractors | Refresh Renovations UK. URL: <https://www.refreshrenovations.co.uk/articles/recycled-brick-house-extension-in-melbourne> (дата звернення: 27.10.2025).

53. Zero-Waste Recycling on Mallorca Turns Crushed Stone and Ceramic into Awesome New Material. Good News Network. URL: <https://www.goodnewsnetwork.org/zero-waste-zero-kilometer-recycling-on-mallorca-turns-crushed-stone-and-ceramic-into-awesome-new-material/> (дата звернення: 27.10.2025).

54. Heriyanto, Pahlevani F., Sahajwalla V. From waste glass to building materials – An innovative sustainable solution for waste glass. Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 191. P. 192–206. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.214>.

55. Build a Gorgeous Greenhouse Recycled Windows Building in 9 Steps – DIY projects for everyone!. Ideas2Live4. URL:

<https://ideas2live4.com/diyprojects/2016/09/30/build-a-gorgeous-greenhouse-from-old-windows/> дата звернення: 27.10.2025).

56. Kaliyavaradhan S. K., Ling T.-C., Mo K. H. Valorization of waste powders from cement-concrete life cycle: A pathway to circular future. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 268. P. 122358. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122358>.

57. K pfer C., Bastien-Masse M., Fivet C. Reuse of concrete components in new construction projects:critical review of 77 circular precedents. *Journal of Cleaner Production*. 2022. P. 135235. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135235>.

58. Planks & Profiles. Recycled Plastic Lumber, Recycled Timber Plastics, Recycled Plastic Wood. URL: <https://www.kedel.co.uk/planks-profiles.html> (дата звернення: 27.10.2025).

59. Plastic Paving Stones - Filcris. Filcris. URL: <https://www.filcris.co.uk/category/landscaping/paving> (дата звернення: 27.10.2025).

60. Саманний будинок плюси і мінуси - Як збудувати дом із саману. Сільське господарство та садівництво: все про сад та город - корисні поради від експертів. URL: <https://www.xpert.com.ua/samannui-bydunok.html> (дата звернення: 27.10.2025).

61. Покрівля з очерету - Буд-Інфо. Буд-Інфо - Все про будівництво і ремонт. Розцінки на будівельні та ремонтні роботи. URL: <https://bud-info.net.ua/budivnytstvo/dah/pokrivlya-z-ocheretu/> (дата звернення: 27.10.2025).

62. What is Reclaimed Wood? | Definition of Reclaimed Wood. Centennial Woods. URL: <https://centennialwoods.com/pages/the-ultimate-guide-to-reclaimed-wood> (дата звернення: 27.10.2025).

63. Make Furniture for Your Living Room with Pallets – Interior Design Blogs. Interior Design Blogs. URL: <https://www.interiordesignblogs.eu/make-furniture-for-your-living-room-with-pallets> (дата звернення: 27.10.2025).

64. Assessment of environmental product declaration and databases: Towards ensuring data quality assurance practices / O. I. Olanrewaju et al. *Environmental Impact Assessment Review*. 2025. Vol. 112. P. 107803. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107803> (дата звернення: 27.10.2025).

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Микола Савицький

Світлана Шехоркіна

Марина Бордун

Артем Сопільняк

Тетяна Нікіфорова

Марина Бабенко

Оксана Зінкевич

**ВПЛИВ БУДІВЕЛЬ
НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ
ПРОТЯГОМ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Редактори: Савицький М., С. Шехоркіна, Бордун М.

Підп. до друку 23.10.2025, відп. до рішення Вченої ради ННІ ПДАБА (Протокол № 3 від 23.10.2025р.).
Формат А4. Гарнітура Times New Roman. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 6,14.
Електронне видання.

Видавець і виготовник: Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектура»
49005, м. Дніпро, вул. Архітектора Олега Петрова, 24А