

## **ДОСЛІДЖЕННЯ КОРЕЛЯЦІЙ МІЖ ВИРОБНИЧО- ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТА ПОКАЗНИКАМИ ЕКОСИСТЕМНОЇ РІВНОВАГИ**

*Дослідження кореляції між виробничо-експлуатаційними характеристиками та показниками екосистемної рівноваги спрямоване на формування інтегрованого аналітичного підходу до оцінювання впливу будівельного виробництва на довкілля. У роботі обґрунтовано необхідність міждисциплінарного поєднання екологічних, економічних і технологічних інструментів для кількісного визначення взаємозв'язків між параметрами енергоспоживання, використання ресурсів, викидами CO<sub>2</sub>, управлінням відходами та змінами у стані біорізноманіття. Показано, що традиційні підходи до оцінювання екологічного впливу не забезпечують достатньої глибини аналізу без застосування моделей кореляційного й регресійного аналізу, системного моделювання та оцінки життєвого циклу (LCA).*

*Розроблено концептуальні моделі взаємодії виробничих процесів і екосистемних індикаторів, які дозволяють формалізувати причинно-наслідкові зв'язки між техніко-технологічними параметрами та змінами екологічної стабільності. Запропоновано математичні залежності для оцінювання впливу енергоспоживання на обсяг викидів CO<sub>2</sub> та для моделювання змін біорізноманіття під впливом виробничих факторів. Встановлено, що інтеграція моделей LCA, екологічного моніторингу та методів оцінки ризиків (FMEA, HAZOP) забезпечує підвищення точності прогнозування екологічних наслідків будівельної діяльності.*

*Доведено, що оптимізація структурних параметрів процесно-технологічного середовища будівництва – зокрема вибору матеріалів, енергоспоживання, технологічних рішень і систем управління відходами – суттєво знижує екологічні ризики та сприяє досягненню екосистемної рівноваги. Обґрунтовано доцільність застосування комплексних багатofакторних моделей, які дозволяють визначити найбільш чутливі параметри виробничого процесу та формувати стратегії їх оптимізації відповідно до принципів сталого розвитку.*

*Практичне значення результатів полягає у можливості використання запропонованих моделей для стратегічного планування екологічно орієнтованого будівельного виробництва, мінімізації екологічного сліду та підвищення ресурсної ефективності галузі.*

**Ключові слова:** *виробничо-експлуатаційні характеристики, екосистемна рівновага, екологічне моделювання, LCA, кореляційний аналіз, викиди CO<sub>2</sub>, біорізноманіття, сталий розвиток.*



**Вступ.** Будівельне виробництво є складною відкритою системою, що функціонує у взаємодії з природним середовищем і суттєво впливає на стан екосистем. Зростання обсягів будівництва, урбанізація та інтенсифікація використання ресурсів актуалізують необхідність комплексного дослідження впливу виробничо-експлуатаційних характеристик на показники екосистемної рівноваги. Сучасні виклики, пов'язані зі зміною клімату, деградацією біорізноманіття та виснаженням ресурсів, зумовлюють потребу у впровадженні аналітичних моделей, здатних інтегрувати екологічні та технологічні параметри в єдину систему оцінювання.

Міжвиробничо-експлуатаційні характеристики включають параметри енергоспоживання, матеріаломісткості, водокористування, рівня викидів і утворення відходів. Їхній вплив на екосистемну рівновагу проявляється через зміну кліматичних показників, якості атмосферного повітря, стан ґрунтів та водних ресурсів. Водночас екосистемна рівновага визначається стабільністю біорізноманіття, здатністю природних систем до самовідновлення та рівнем антропогенного навантаження.

Застосування наукових моделей, таких як оцінка життєвого циклу, регресійний аналіз, моделі екологічних ризиків та системний підхід, дозволяє встановити кількісні кореляції між технологічними параметрами та екологічними індикаторами. Інтеграція цих моделей формує методичну основу для прийняття управлінських рішень, спрямованих на оптимізацію виробничих процесів і мінімізацію екологічного впливу.

**Актуальність дослідження** зумовлена посиленням екологічних вимог до будівельної галузі та необхідністю інтеграції принципів сталого розвитку у виробничі процеси. Будівництво є одним із найбільших споживачів енергетичних і матеріальних ресурсів, що формує значну частку глобальних викидів парникових газів. Водночас відсутність системного аналізу взаємозв'язків між виробничими параметрами та екологічними індикаторами ускладнює формування ефективних механізмів управління.

У сучасних умовах цифровізації та розвитку екологічного моніторингу з'являються можливості для збору великого масиву даних щодо техніко-технологічних процесів і стану довкілля. Це створює передумови для застосування кореляційних і регресійних моделей з метою визначення критичних факторів екологічного впливу. Особливої ваги набуває необхідність поєднання інструментів LCA, оцінки ризиків і математичного моделювання для формування комплексної аналітичної системи.

Підвищення вимог до екологічної прозорості та звітності підприємств також актуалізує потребу у кількісному підтвердженні результативності екологічних заходів. Саме тому дослідження кореляцій між виробничими характеристиками та екосистемними показниками є важливим для обґрунтування управлінських рішень, спрямованих на мінімізацію негативного впливу будівельного виробництва на довкілля.

**Постановка проблеми** полягає у відсутності інтегрованого інструментарію, який би дозволяв системно оцінювати кореляції між виробничо-експлуатаційними характеристиками та показниками екосистемної рівноваги в будівельному секторі. Існуючі підходи здебільшого фрагментарно аналізують окремі аспекти впливу – енергоспоживання, матеріаломісткість або рівень викидів – без урахування їх взаємодії та кумулятивного ефекту.

Недостатня формалізація цих взаємозв'язків обмежує можливість прогнозування довгострокових екологічних наслідків та знижує ефективність управлінських рішень. Відсутність єдиної методичної платформи ускладнює визначення пріоритетних напрямів оптимізації виробничих процесів. Отже, виникає потреба у розробленні комплексної моделі, яка забезпечить кількісне оцінювання впливу виробничих параметрів на стан екосистем та дозволить формувати обґрунтовані стратегії екологічної оптимізації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні наукові дослідження акцентують увагу на застосуванні LCA як базового інструменту оцінювання екологічного впливу виробничих процесів. Окремі роботи присвячені використанню статистичних методів для аналізу взаємозв'язків між енергоспоживанням і викидами CO<sub>2</sub>. Також активно розвиваються підходи до екологічного моніторингу та оцінки ризиків.

Водночас більшість досліджень зосереджується на окремих елементах виробничого процесу, залишаючи поза увагою комплексну інтеграцію моделей. Недостатньо розробленими залишаються питання кількісної оцінки впливу виробничих параметрів на біорізноманіття та формування багатофакторних моделей, що враховують часову динаміку екологічних змін.

**Метою цієї статті є** розроблення та обґрунтування інтегрованого підходу до дослідження кореляцій між виробничо-експлуатаційними характеристиками та показниками екосистемної рівноваги на основі поєднання моделей оцінки життєвого циклу, статистичного аналізу та системного моделювання.

**Виклад основної інформації.** Наукові моделі, котрі використовуються для дослідження кореляцій між виробничо-експлуатаційними характеристиками та показниками екосистемної рівноваги, базуються на міждисциплінарних підходах, вони поєднують екологічні, економічні та технологічні аспекти. Моделі дозволяють оцінити взаємозв'язок між технологічними процесами, використанням ресурсів, енергоспоживанням, виробничими викидами та станом навколишнього середовища на всіх етапах життєвого циклу продукту або проєкту. Вони розкривають механізми взаємодії між виробничими процесами і екосистемами, важливо для прогнозування екологічних наслідків і оптимізації виробництва з огляду на вимоги сталого розвитку [1].

Однією з основних моделей є модель оцінки життєвого циклу (LCA), вона системно оцінює вплив виробничо-експлуатаційних характеристик на екосистему протягом усього життєвого циклу продукту або послуги – від видобутку сировини до утилізації. Вона використовує різні екологічні показники, як викиди CO<sub>2</sub>, споживання енергії, забруднення води, викиди шкідливих речовин, і надає можливість оцінити їхній вплив на екосистему. Підхід є одним із найбільш повних для оцінки екологічних наслідків виробничих процесів, адже враховує безпосередній вплив на природу, довгострокові наслідки для клімату та здоров'я людей.

Іншим важливим інструментом є моделі оцінки екологічних ризиків, як методи FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) або HAZOP (Hazard and Operability Study), котрі використовуються для ідентифікації та аналізу потенційних екологічних загроз, які виникають в результаті виробничих процесів. Методи системно оцінюють ймовірність виникнення екологічних подій (наприклад, викидів або аварій) та їхній потенційний вплив на навколишнє середовище, що дає змогу розробляти стратегії для мінімізації цих ризиків і зменшення екологічного сліду.

Ще одним інструментом є екологічний моніторинг, він включає постійну оцінку екологічних показників, як рівень забруднення повітря, води, ґрунтів, біорізноманіття та викидів парникових газів. За допомогою моніторингу можна відслідковувати зміни в екосистемі під впливом виробничих процесів, вчасно виявляти негативні наслідки і коригувати стратегію управління виробництвом [2].

Моделі регресії і кореляційного аналізу є ще одними важливими інструментами для вивчення взаємозв'язку між виробничо-експлуатаційними характеристиками і показниками екосистемної рівноваги.

Моделі використовуються у поєднанні з іншими підходами, як системний аналіз, для розробки комплексних моделей, котрі прогнозують вплив різних виробничих процесів на екосистему. Системний підхід інтегрує різні види даних і моделей у єдину структуру, дає можливість оцінити взаємозв'язки між виробництвом, навколишнім середовищем та передбачити потенційні екологічні наслідки від зміни окремих параметрів виробничого процесу.

Моделі взаємодіють один з одним, створюючи більш точну картину екологічних впливів і допомагаючи зрозуміти, які виробничі характеристики найсильніше впливають на екосистемну рівновагу. Модель оцінки життєвого циклу (LCA) може бути доповнена результатами екологічного моніторингу для відстеження фактичних змін у навколишньому середовищі під впливом виробничих процесів та використанням методів оцінки ризиків для коригування процесу з урахуванням можливих загроз [3].

Метод регресійного аналізу з'ясовує, як зміни в енергоспоживанні чи викидах CO<sub>2</sub> прямо або опосередковано впливають на біорізноманіття або стабільність екосистеми. Моделі виявляють фактори, котрі найбільше впливають на екологічну рівновагу та розробляють стратегії для зниження екологічного впливу виробничих процесів.

На нижче наведеному рис. 1 зображена структура наукових моделей, котрі використовуються для аналізу кореляцій між виробничо-експлуатаційними характеристиками та показниками екосистемної рівноваги.

Рис. 2 показує концептуальну модель взаємозв'язку між виробничими характеристиками і екосистемною рівновагою. Ілюстрація відображає, як зміни в процесах енергоспоживання, викидів та використання ресурсів можуть впливати на різні аспекти екосистемної стабільності. Модель визначає, котрі компоненти виробничої діяльності потребують оптимізації для зниження негативного впливу на навколишнє середовище та досягнення сталого розвитку.

Формула оцінює вплив виробничих процесів на рівень викидів CO<sub>2</sub>, який є одним із основних чинників, що впливає на екосистему та клімат. Викиди CO<sub>2</sub> змінюють кліматичні умови і таким чином негативно впливають на екосистеми. Зниження викидів за допомогою технологічних удосконалень та оптимізації процесів може зменшити екологічний слід виробництва [6].

Моделювання впливу виробничих характеристик на екологічний ризик через викиди CO<sub>2</sub>:

$$CO_2 = \sum_{i=1}^n (E_i \times W_i), \quad (1)$$

де: CO<sub>2</sub> – загальна кількість викидів CO<sub>2</sub> на всіх етапах виробництва, E<sub>i</sub> – кількість енергії, що споживається на кожному етапі виробництва, W<sub>i</sub> – коефіцієнт викиду CO<sub>2</sub> для кожної одиниці енергії, що використовується.



Рис. 1. Структура наукових моделей для аналізу кореляцій між виробничо-експлуатаційними характеристиками та показниками екосистемної рівноваги (розроблено автором на основі [4])



Рис. 2. Концептуальна модель взаємозв'язку між виробничими характеристиками та екосистемною рівновагою (розроблено автором на основі [5])

Формула визначає, скільки CO<sub>2</sub> буде викинуто на кожному етапі виробництва, допомагає ідентифікувати етапи на яких викиди можна зменшити за допомогою енергоефективних технологій.

Формула застосовується для оцінки впливу виробничих процесів на біорізноманіття, яке є одним із основних показників екосистемної рівноваги. Вона враховує взаємозв'язок між виробничими характеристиками, як витрати ресурсів, і змінами в екологічному стані, зокрема в біорізноманітті. Чим більший вплив на навколишнє середовище, тим сильніше зміщення в біорізноманітті [7].

Моделювання взаємозв'язку між виробничими характеристиками та показниками екосистемної рівноваги через біорізноманіття:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i \times F_i)}{T}, \quad (2)$$

де:  $B$  – зміна в біорізноманітті, що відбувається через виробничі процеси;

$P_i$  – параметри виробничих характеристик (наприклад, витрати води, використання землі);

$F_i$  – екологічний вплив кожного параметра (викиди, забруднення);

$T$  – період часу, протягом якого спостерігався вплив на біорізноманіття.

Формула вимірює, як виробничі процеси впливають на стан біорізноманіття в екосистемі, даючи змогу прогнозувати потенційні зміни в екосистемі при змінах параметрів виробництва.

Таблиця 1 надає порівняння основних наукових моделей, котрі використовуються для дослідження кореляцій між виробничо-експлуатаційними характеристиками та показниками екосистемної рівноваги. У ній представлені ключові моделі, як оцінка життєвого циклу (LCA), регресійний, кореляційний аналіз та моделі оцінки екологічних ризиків, котрі застосовуються для визначення впливу виробничих процесів на екологічні показники. Таблиця демонструє переваги і недоліки кожної моделі, обирає найбільш відповідну для конкретного типу аналізу і прогнозування екологічних наслідків.

Процесно-технологічне середовище будівельного виробництва складається з численних параметрів, котрі впливають на екосистемну рівновагу. Вони включають фактори, як вибір будівельних матеріалів, енергоспоживання, технологічні процеси, управління відходами, використання води та рівень забруднення, котрий виникає в результаті виконання робіт. Кожен з цих параметрів має свій вплив на навколишнє середовище і зміни в одному з них призводять до значних екологічних наслідків.

Вибір будівельних матеріалів є одним з найважливіших структурних параметрів, оскільки матеріали, котрі використовуються на різних етапах будівництва, можуть мати значний вплив на навколишнє середовище. Традиційні будівельні матеріали, як бетон, сталь та інші мають високий рівень енергоспоживання та викидів CO<sub>2</sub> на етапі виробництва. Однак існують альтернативи, котрі значно знижують вплив, зокрема використання екологічно чистих матеріалів або матеріалів, що переробляються. Матеріали, що не можуть бути повторно використані або перероблені створюють велику кількість відходів та забруднюють довкілля. Вибір матеріалів, які мають мінімальний вплив на екосистему та використовуються повторно є критичним для збереження екологічної рівноваги [5].

Енергоспоживання на різних етапах будівництва має величезний вплив на екосистему, використання невідновлюваних джерел енергії, як вугілля, газ або

нафта, призводить до значних викидів парникових газів, що сприяє змінам клімату. Споживання енергії впливає на здатність екосистем до відновлення, вона залежить від ресурсів, доступних на планеті. Переходячи на відновлювані джерела енергії (сонце, вітер, геотермальні джерела), будівельний сектор значно зменшує екологічний слід і підвищує свою енергоефективність, котра позитивно вплине на навколишнє середовище.

*Таблиця 1*

**Порівняння наукових моделей для дослідження кореляцій між виробничо-експлуатаційними характеристиками та показниками екосистемної рівноваги**

<b>Модель / Підхід</b>	<b>Опис</b>	<b>Переваги</b>	<b>Недоліки</b>
<i>Оцінка життєвого циклу (LCA)</i>	Моделювання впливу на навколишнє середовище на всіх етапах життєвого циклу продукту чи процесу	Повний аналіз, який охоплює всі етапи – від видобутку матеріалів до утилізації	Велика кількість даних, складність при великій кількості етапів
<i>Регресійний та кореляційний аналіз</i>	Оцінка впливу виробничих характеристик на екологічні показники через статистичні методи	Можливість оцінити взаємозв'язки між декількома змінними одночасно	Залежність результатів від вибору відповідних змінних і моделей
<i>Моделі оцінки екологічних ризиків (FMEA, HAZOP)</i>	Оцінка ймовірності екологічних подій та їхнього впливу на екосистему	Ідентифікація ризиків на ранніх етапах, дозволяє запобігти катастрофам	Не завжди може охопити всі варіанти ризиків, потребує детальних даних
<i>Екосистемний моніторинг</i>	Постійний моніторинг екологічних показників для виявлення змін, пов'язаних з виробничими процесами	Дозволяє відслідковувати екологічний стан у реальному часі, що дає можливість оперативно реагувати	Висока вартість та складність у зборі та обробці даних

*Джерело: розроблено автором на основі [8]*

Технологічні процеси мають важливий вплив на екосистемну рівновагу. Традиційні методи будівництва, як використання важкої техніки, спричиняють значні викиди CO<sub>2</sub>, шумове забруднення та негативно впливають на довкілля через витрати ресурсів. Водночас, новітні технології, як 3D-друк в будівництві, модульне будівництво або використання високотехнологічних матеріалів, що потребують меншої енергії для виробництва, значно знижують екологічні наслідки [9].

Управління відходами є ще одним важливим параметром. Під час будівництва утворюється велика кількість відходів, як залишки матеріалів, металеві частини, деревина, пластик тощо. Невірне управління відходами, відсутність системи переробки або утилізації призводять до забруднення ґрунтів, води та повітря. Оптимізація процесів управління відходами через сортування, переробку, повторне

використання матеріалів дозволяє значно зменшити негативний вплив будівельного виробництва на навколишнє середовище [10].

Використання води на етапах будівництва є критичним параметром, який впливає на екологічну рівновагу. Багато будівельних процесів потребують значної кількості води, що призводить до її виснаження в регіонах, де її дефіцит. Збереження водних ресурсів через використання сучасних методів, як замкнуті водопостачальні системи, переробка води, використання водозберігаючих технологій, допомагає зменшити цей вплив.

Забруднення викидами на різних етапах будівництва має безпосередній вплив на атмосферу, здоров'я людей і екосистему в цілому. Викиди парникових газів, пилові забруднення, викиди токсичних речовин можуть спричинити зміни в кліматі, пошкоджувати екосистеми і знижувати їх здатність до самовідновлення. Оптимізація викидів і застосування сучасних технологій, що мінімізують викиди, є ключовим фактором для зниження цього впливу.

Оптимізація параметрів структурних компонентів значно знижує екологічний вплив будівництва і покращує екологічну рівновагу. Використання екологічно чистих матеріалів, енергоефективних технологій, переробка відходів, води та зменшення викидів CO<sub>2</sub> на всіх етапах виробництва будівельних об'єктів призводять до значного зниження негативного впливу на навколишнє середовище. Застосування принципів сталого розвитку та використання інноваційних технологій допомагає зберегти ресурси для майбутніх поколінь, забезпечуючи екологічно чисте та економічно ефективне будівництво.

Оптимізація параметрів зменшує екологічний вплив та підвищує економічну ефективність будівельного виробництва, зменшення витрат енергії, води та матеріалів веде до зниження витрат і покращення фінансових показників компанії. Зміни сприяють розвитку сталих та екологічно чистих технологій у будівельній галузі [11].

Рис. 3 зображує структуру екологічних параметрів процесно-технологічного середовища будівельного виробництва. Ілюстрація показує основні фактори, котрі визначають екологічний вплив будівельних процесів, зокрема енергоспоживання, використання матеріалів, управління відходами та викидами. Модель демонструє, як кожен з параметрів взаємодіє з іншими елементами, що оцінює їхній вплив на екосистемну рівновагу.

Рис. 4 ілюструє концептуальну модель оптимізації екологічних параметрів у будівельному виробництві. Модель демонструє, як зміни в технологічних процесах і параметрах використання матеріалів, енергії та ресурсів зменшують негативний вплив на екосистему та сприяти сталому розвитку. Оптимізація кожного з етапів, починаючи від вибору матеріалів до кінцевої утилізації відходів, дозволяє досягти зниження екологічного сліду і забезпечити більш екологічно чисте будівництво.

Формула оцінює вплив використаних матеріалів на екологічний слід будівельного процесу. Матеріали, використовувани на різних етапах будівництва, мають різний рівень екологічного впливу через процеси їх виробництва, транспортування і утилізації. Моделювання впливу допомагає визначити, як зменшення використання матеріалів з високим екологічним впливом може скоротити загальний екологічний слід проєкту [6].



Рис. 3. Структура екологічних параметрів процесно-технологічного середовища будівельного виробництва (розроблено автором на основі [12])

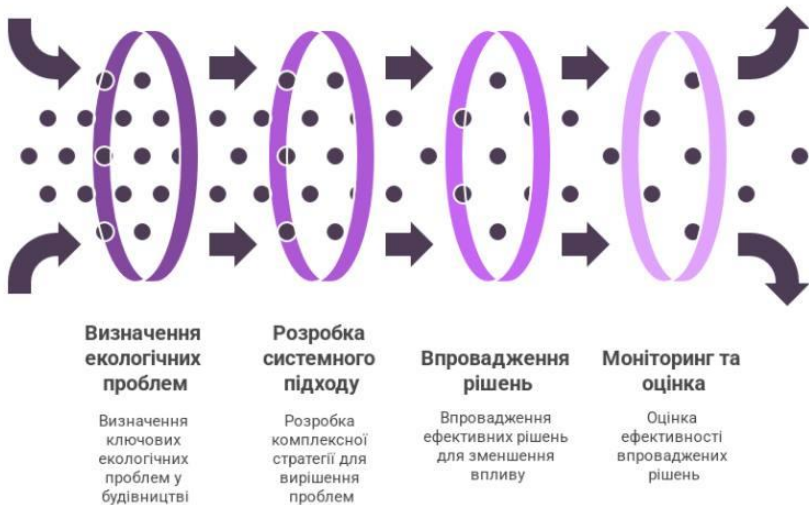


Рис. 4. Концептуальна модель оптимізації екологічних параметрів для зниження ризиків у будівництві (розроблено автором на основі [13])

Моделювання впливу використання матеріалів на екологічний слід у процесі будівництва:

$$E_m = \sum_{i=1}^n (M_i \times C_i), \quad (3)$$

де:  $E_m$  – загальний екологічний вплив матеріалів, що використовуються в будівництві,  $M_i$  – кількість одиниць матеріалу  $i$ , що використовується на етапі будівництва,  $C_i$  – коефіцієнт екологічного впливу для кожного матеріалу (враховує енергоспоживання, викиди CO<sub>2</sub>, споживання води тощо).

Формула використовується для оцінки ефективності процесів оптимізації енергоспоживання і управління відходами з огляду на зниження викидів CO<sub>2</sub>. Викиди CO<sub>2</sub> є одними з найбільших джерел екологічного впливу у будівельному виробництві, тому зменшення викидів є важливою метою для забезпечення сталого розвитку. Застосування оптимізованих технологій та ефективного управління відходами дозволяє значно знизити цей вплив. Формула показує, як відсоток зменшення викидів CO<sub>2</sub> може бути вимірний на основі порівняння початкових і оптимізованих показників [8].

Оптимізація відходів та енергоспоживання через зниження викидів CO<sub>2</sub>:

$$S = \frac{W_0 - W_{opt}}{W_0} \times 100, \quad (4)$$

де:  $S$  – відсоток зменшення викидів CO<sub>2</sub> після оптимізації.  $W_0$  – початковий рівень викидів CO<sub>2</sub> без застосування оптимізаційних заходів,  $W_{opt}$  – рівень викидів CO<sub>2</sub> після оптимізації.

Формула вимірює результативність оптимізації процесів управління відходами та енергоспоживання, що безпосередньо впливає на екологічний вплив проєкту.

Таблиця 2 надає порівняння структурних параметрів, котрі впливають на екологічні ризики в процесно-технологічному середовищі будівельного виробництва. Вона демонструє ключові фактори, як вибір матеріалів, енергоспоживання, технологічні процеси, управління відходами та викидами CO<sub>2</sub>, і їхній вплив на екологічний слід будівельних проєктів.

*Таблиця 2*

**Порівняння структурних параметрів, що впливають на екологічні ризики в процесно-технологічному середовищі будівельного виробництва**

<b>Параметр</b>	<b>Опис</b>	<b>Вплив на економічні ризики</b>
<i>Вибір матеріалів</i>	Оцінка екологічних характеристик матеріалів, таких як відновлюваність, перероблюваність, викиди CO <sub>2</sub>	Вибір неекологічних матеріалів збільшує забруднення навколишнього середовища, підвищує викиди парникових газів
<i>Енергоспоживання</i>	Витрати енергії на виробництво, транспортування і будівельні процеси	Високе енергоспоживання призводить до збільшення викидів CO <sub>2</sub> та негативно впливає на екосистеми
<i>Технологічні процеси</i>	Методи та технології, що застосовуються на етапах будівництва, виробництва і демонтажу	Застарілі технології можуть призводити до більшої кількості викидів і відходів, що шкодить навколишньому середовищу

Продовження табл. 2

Параметр	Опис	Вплив на економічні ризики
<i>Управління відходами</i>	Переробка, утилізація або зберігання будівельних відходів	Недостатнє управління відходами може спричинити забруднення ґрунту та вод, викиди в атмосферу
<i>Викиди CO<sub>2</sub></i>	Кількість CO <sub>2</sub> , що викидається в атмосферу під час будівництва	Зниження викидів CO <sub>2</sub> допомагає зменшити парниковий ефект і мінімізувати зміни клімату
<i>Використання води</i>	Кількість води, що споживається на різних етапах будівництва	Високе споживання води може призвести до виснаження водних ресурсів та забруднення води через стоки
<i>Біорізноманіття</i>	Оцінка впливу будівельних процесів на флору і фауну	Будівництво може знижувати біорізноманіття шляхом знищення природних середовищ або забруднення навколишнього середовища

*Джерело: розроблено автором на основі [14]*

**Висновки.** Проведене дослідження підтверджує, що виробничо-експлуатаційні характеристики будівельного виробництва мають комплексний і багаторівневий вплив на показники екосистемної рівноваги. Встановлено, що найбільш чутливими параметрами є енергоспоживання, матеріаломісткість, рівень викидів CO<sub>2</sub> та система управління відходами. Застосування інтегрованих моделей дозволяє кількісно визначити ступінь їхнього впливу та сформувані пріоритетні напрями оптимізації.

Поєднання LCA, кореляційного та регресійного аналізу, а також моделей оцінки ризиків забезпечує формування цілісної аналітичної платформи для прогнозування екологічних наслідків. Доведено, що системна оптимізація технологічних процесів, впровадження енергоефективних рішень і використання екологічно безпечних матеріалів сприяють зниженню екологічного сліду та підвищенню економічної ефективності виробництва.

Отримані результати можуть бути використані для формування екологічно орієнтованої стратегії розвитку будівельних підприємств, інтеграції принципів сталого розвитку у виробничу діяльність та підвищення рівня екосистемної стійкості.

#### **Список літератури:**

1. Шерстюк Р., Козловський А., Летун О. Методичні підходи до оцінки ефективності діяльності підприємств у контексті цифрової трансформації менеджменту. *Соціально економічні проблеми і держава*. 2024. Вип. 2 (31). С. 52-63. <https://doi.org/10.33108/sepd2024.02.052>

2. Боголюбов В.М., Сальнікова А.В., Ракоїд О.О. Екологічний моніторинг: навч. посіб. За ред. проф. В.М. Боголюбова. Київ: НУБіПУ, 2023. 200 с.

3. Зосим М. Оцінка життєвого циклу (Life cycle assessment – LCA). URL: <https://www.maxzosim.com/otsinka-zhittevogo-tsiklu/>

4. Балджи М.Д. Організаційно-економічні засади комплексного природокористування на регіональному рівні: монографія. Одеса: Атлант, 2010. 500 с.
5. Skorobogatova N. Creating the model of balanced business development based on ecosystem approach. *Technology Audit and Production Reserves*, 2022, 2 (4 (64)), 6–10. DOI: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.256610>.
6. Кривомаз Т.І. Зменшення вуглецевого сліду як механізм адаптації до змін клімату [електронний ресурс]: конспект лекцій. Київ: КНУБА, 2025. 103 с. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/a5e42a54-1792-4162-bc87-229b1b93e8a9/content>
7. Сітак І.Л. Управління економічною стійкістю підприємства: дис. ... канд. екон. наук: 08.00.04. Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків, 2021. 244 с.
8. Математичні методи і моделі в управлінні економічними процесами: монографія / Л.М. Малярець, Є.Ю. Місюра, В.В. Койбічук та ін. Харків ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2016. 420 с.
9. Ковальчук Ю., Дудник В., Гречанюк В., Яменко О. Адитивні технології в будівництві: 3D друк будівель, розробка матеріалів. *Маркетингові стратегії, підприємництво і торгівля: сучасний стан, напрямки розвитку*: тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції з нагоди 95-річчя КНУБА, 10 квітня 2025 року / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт.; відп. ред. П.В. Захарченко. Київ: КНУБА, 2025. С. 647 - 650.
10. Чуприна Ю.А. Дослідження екологічних загроз, пов'язаних із управлінням відходами в Україні та світі, та їхній ефект на екосистеми. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*, 2024, 54(2), 334-351. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54\(2\).334-351](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54(2).334-351).
11. Лабенко О. М. Формування фінансової політики природокористування в Україні: дис. ... д-ра екон. наук: 08.00.08. Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2024. 415 с.
12. Гудина Л.О. Імплементация стандартів екологічного будівництва – чинник сталого розвитку держави. *Економіка та суспільство*. 2024. Вип. 60. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-60-102>
13. Чурилін В., Віткін Л. Сучасний погляд на поняття екологічного ризику: концептуальна основа. *Вчені записки Університету «КРОК»*, 2024, (2(74)), 198–203. <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2024-74-198-203>.
14. Бредун В.І. Екологічна безпека та управління ризиками: навч. посіб. Полтава: Видання Національного університету імені Юрія Кондратюка, 2021. 189 с.

**Dmytro NIKOLAYKO**

***Study of correlations between production and operational characteristics and indicators of ecosystem balance***

*The study of correlations between production and operational characteristics and indicators of ecosystem balance is aimed at forming an integrated analytical approach to assessing the environmental impact of construction activities. The paper substantiates the need for an interdisciplinary integration of ecological, economic, and technological tools to quantitatively determine the relationships between parameters of energy consumption, resource use, CO<sub>2</sub> emissions, waste management, and changes in biodiversity status. It is demonstrated that traditional approaches to environmental impact assessment do not*

*provide sufficient analytical depth without the application of correlation and regression models, system modeling techniques, and Life Cycle Assessment (LCA).*

*Conceptual models of interaction between production processes and ecosystem indicators have been developed, enabling the formalization of cause-and-effect relationships between technical and technological parameters and changes in environmental stability. Mathematical relationships are proposed to assess the impact of energy consumption on CO<sub>2</sub> emissions and to model biodiversity changes under the influence of production factors. It has been established that the integration of LCA models, environmental monitoring systems, and risk assessment methods (FMEA, HAZOP) enhances the accuracy of forecasting environmental consequences of construction activities.*

*It is proven that optimization of structural parameters of the process-technological environment in construction – particularly the selection of materials, energy consumption patterns, technological solutions, and waste management systems – significantly reduces environmental risks and contributes to achieving ecosystem balance. The expediency of applying comprehensive multifactor models is substantiated, as they allow identification of the most sensitive production parameters and the development of optimization strategies in accordance with the principles of sustainable development.*

*The practical significance of the results lies in the possibility of applying the proposed models for strategic planning of environmentally oriented construction production, minimizing the ecological footprint, and increasing resource efficiency within the industry.*

***Keywords: production and operational characteristics, ecosystem balance, environmental modeling, LCA, correlation analysis, CO<sub>2</sub> emissions, biodiversity, sustainable development.***

Дата надходження статті: 09.01.2026

Дата прийняття статті: 16.02.2026