

УДК 624.012+502.15:69.003

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.73.1193

ОПТИМІЗАЦІЯ ДЕМОНТАЖУ ТА ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ У РАМКАХ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ

ЛЕВЧЕНКО Н. М.^{1*}, *д-р н. з держ. упр., проф.*,

ПОМАЗАН М. Д.², *канд. техн. наук, доц.*,

ЧЕЧЕЛЬ М. В.³, *ст. викл.*,

НЕСКОРОДОВА О. В.⁴, *зав. лаб.*,

СКАЧКОВ Р. О.⁵, *магістрант*

¹ Кафедра «Будівельне виробництво та управління проектами», Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (050) 807-85-27, e-mail: levchenkon65@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3283-6924

² Кафедра «Будівельне виробництво та управління проектами», Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (098) 856-12-07, e-mail: zdarovamax@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-0345-5118

³ Кафедра «Будівельне виробництво та управління проектами», Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (099) 619-17-77, e-mail: chechel@zp.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9462-9560

⁴ Кафедра будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (098) 532-78-27, e-mail: olgabvup@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-5933-4642

⁵ Кафедра «Будівельне виробництво та управління проектами», Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (068) 475-81-65, e-mail: dobro3342@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-9085-8418

Анотація. Стрімке зростання обсягів будівництва, а також умов невизначеності сьогодення обумовлює утворення значної кількості будівельних відходів, що становлять до 30–40 % загального обсягу твердих відходів у світі [1]. Ефективний рециклінг будівельних матеріалів і продуктів знесення є передумовою сталого розвитку будівельної галузі згідно Глобальних Цілей Сталого Розвитку (ЦСР) до 2030 р. [2], оскільки сприяє збереженню ресурсів та зниженню негативного впливу на довкілля. Наукова праця спрямована на аналіз та узагальнення теоретичних засад рециклінгу будівельних матеріалів і відходів знесення, паралельно з дослідженням сучасних наукових підходів і технологій для переробки відходів і оптимізації процесів демонтажу. Проведено огляд актуальних досліджень та практичних прикладів у сфері селективного демонтажу, повторного використання ресурсів і управління будівельними відходами, узагальнено принципи циркулярної економіки в будівництві, розглянуто інноваційні механізми переробки матеріалів та оптимізаційні рішення для демонтажу з використанням сучасних технологій. Наведено практичні аспекти впровадження цих рішень та розроблена в узагальненому вигляді оцінка стратегій управління будівельними відходами. В результаті проведено узагальнення результатів дослідження та рекомендації щодо впровадження ефективних стратегій рециклінгу і демонтажу з метою мінімізації негативного екологічного впливу та підвищення економічної ефективності будівельних проектів.

Ключові слова: будівельні відходи; рециклінг матеріалів; повторне використання; зведення та демонтаж будівель; цифрові технології; сталий розвиток; оптимізація будівельних процесів

OPTIMIZATION OF DEMOLITION AND REUSE OF CONSTRUCTION MATERIALS WITHIN THE FRAMEWORK OF A CIRCULAR ECONOMY

LEVCHENKO N.M.^{1*}, *Dr. of Sc. in Public Administration, Full Professor,*

POMAZAN M.D.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,*

CHECHEL M.V.³, *Sen. Lect.,*

NESKORODOVA O.V.⁴, *Head of laboratory,*

SKACHKOV R.O.⁵, *Stud.*

^{1*} Department of Construction Production and Project Management, National University Zaporizhzhia Polytechnic, 64, Zhukovskogo St., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, +38 (050) 807-85-27, e-mail: levchenkon65@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3283-6924

² Department of Construction Production and Project Management, National University Zaporizhzhia Polytechnic, 64, Zhukovskogo St., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (098) 856-12-07, e-mail: zdarovamax@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-0345-5118

³ Department of Construction Production and Project Management, National University Zaporizhzhia Polytechnic, 64, Zhukovskogo St., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (099) 619-17-77, e-mail: chechel@zp.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9462-9560

⁴ Department of Construction Production and Project Management, National University Zaporizhzhia Polytechnic, 64, Zhukovskogo St., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (098) 532-78-27, e-mail: olgabvup@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-5933-4642

⁵ Department of Construction Production and Project Management, National University Zaporizhzhia Polytechnic, 64, Zhukovskogo St., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (068) 475-81-65, e-mail: dobro3342@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-9085-8418

Abstract. Rapid growth in construction volumes, combined with the prevailing uncertainty of modern times, leads to the generation of a significant amount of construction waste, which accounts for up to 30–40 % of the total volume of solid waste worldwide [1]. Effective recycling of construction materials and demolition products is a prerequisite for the sustainable development of the construction sector in accordance with the Global Sustainable Development Goals (SDGs) for 2030 [2], as it contributes to resource conservation and the reduction of adverse environmental impacts. This scientific work is aimed at analyzing and synthesizing the theoretical foundations of recycling construction materials and demolition waste, while simultaneously investigating contemporary scientific approaches and technologies for waste processing and demolition process optimization. A comprehensive review of current research and practical examples in the fields of selective demolition, resource reuse, and construction waste management has been conducted. In doing so, the study synthesizes the principles of a circular economy in construction, examines innovative mechanisms for material recycling, and reviews optimization solutions for demolition through the use of modern technologies. Practical aspects of implementing these solutions are also discussed. As a result, the study summarizes the findings and offers recommendations for implementing effective recycling and demolition strategies. These strategies are intended to minimize negative ecological impacts and enhance the economic efficiency of construction projects.

Keywords: *construction waste; material recycling; reuse; building construction and demolition; digital technologies; sustainable development; optimization of construction processes*

Вступ. Одним із найбільших «генераторів» твердих відходів сьогодення є будівельна сфера: щорічно у світі утворюється понад 10 мільярдів тонн відходів будівництва та знесення [1]. За оцінками дослідників, до 30–40 % загального обсягу твердих відходів припадає саме на будівництво і демонтаж будівель. У країнах ЄС будівельний сектор забезпечує понад 35 % сумарного утворення відходів та до 5–12 % національних викидів парникових газів [3]. Неналежне поводження з будівельними відходами може спричинити серйозні екологічні проблеми – захоронення великого обсягу матеріалів призводить до втрати цінних ресурсів, забруднення ґрунтів, води і повітря, а також створює ризики для здоров'я людини [4]. В свою чергу, питання виробництва нових будівельних матеріалів потребує значної кількості природних ресурсів і енергії, що свідчить про необхідність впровадження ефективних практик рециклінгу та повторного використання матеріалів як нагальну потребу для забезпечення екологічної безпеки та ресурсоефективності будівництва. Світове співтовариство

усвідомлює цю проблему та рухається в напрямі циркулярної економіки в будівництві. Згідно ієрархії поводження з відходами ЄС, пріоритетними є запобігання утворенню відходів і повторне використання матеріалів, а переробка і утилізація – наступні кроки. Відповідно до ВРД ЄС 2008/98/ЕС, поставлено ціль до 2030–2035 р. на повторну переробку відходів, котра має бути на рівні 60–65 % за загальною вагою.

Метою цієї статті є аналіз теоретичних основ та сучасних технологій рециклінгу будівельних матеріалів і продуктів знесення, рекомендацій щодо оптимізації процесів демонтажу та вторинного використання матеріалів. Наукова новизна полягає у комплексному аналізі інноваційних технологій (від традиційного дроблення до застосування IoT технологій) в контексті концепції сталого будівництва.

Методологія дослідження. Для досягнення мети проведено огляд наукової літератури і практичних кейсів, систематизовано механічні, хімічні та цифрові підходи до переробки будівельних відходів. Використано методи аналізу і синтезу літературних джерел, порівняння

технологічних рішень та системний підхід до оцінки життєвого циклу матеріалів з наданням подальших рекомендацій.

Стан проблеми та цілі дослідження. Численні дослідники приділяють увагу порівнянню підходів до демонтажу. В роботі [5] Pantini та співавтори застосували методологію оцінки життєвого циклу для критичного порівняння вибіркового (селективного) демонтажу із традиційним знесенням. Проаналізовано демонтаж житлової будівлі в Італії з врахуванням фактичних даних підрядників, і визначено ключові фактори, що впливають на екологічний баланс проекту демонтажу. Результати показали, що екологічна доцільність селективного демонтажу суттєво залежить від характеристик самої будівлі та розвитку місцевого ринку вторинних матеріалів. Висновок авторів – екологічну сталість селективного демонтажу слід оцінювати в кожному випадку окремо, оскільки в одних сценаріях він дає екологічний ефект, а в інших додаткові впливи (наприклад, від використання спеціалізованої техніки) можуть переважити користь.

Альтернативою до одновимірних оцінок є багатокритеріальні моделі, що враховують не лише екологічні, а й економічні та соціальні ефекти рециклінгу будівельних матеріалів. Прикладом є дослідження Han Zhang та ін. [6], де запропоновано застосування концепції «тиск – стан – відгук» (Pressure – State – Response, PSR) для всебічної оцінки сталих сценаріїв управління. У рамках цієї роботи розроблено модель, яка інтегрує екологічні показники (зменшення викидів, економію ресурсів), економічні критерії (співвідношення витрат) та соціальні фактори, що дозволяє аналізувати результати впровадження різних стратегій переробки. Модель апробована на даних про поводження з відходами будівництва в місті Чунцін (Китай), де проаналізовано наявний стан управління відходами, співвідношення попиту і пропозиції вторинних матеріалів та ефективність галузі.

Окремим напрямом наукових пошуків є максимізація повторного використання будівельних компонентів (reuse) при демонтажі, що дозволяє скоротити потребу у виробництві нових матеріалів. У галузі конструктивних систем це набуває форми концепції design for deconstruction – проектування будівель із розрахунком на їхній розбір і повторне застосування елементів. Показовою є робота Brütting, Jan Friedrich Georg [7], де запропоновано оптимізаційний підхід до проектування сталевих каркасних конструкцій із використанням наявного складу демонтованих елементів, поєднуючи математичну оптимізацію із оцінкою життєвого циклу конструкції. Розрахунки для декількох типових інженерних конструкцій (ферм, каркасів будівель) показали, що рішення, спроектовані з повторно використаних сталевих балок, можуть мати до 60 % менший сумарний вплив на довкілля у порівнянні з оптимізованими конструкціями, виготовленими з нової (навіть переробленої) сталі.

Сучасні інформаційні моделі будівель (BIM) і суміжні технології розглядаються як перспективний засіб підвищення ефективності управління матеріальними потоками протягом життєвого циклу будівлі. Bahareh Nikmehr і співавтори в дослідженні [8] представили огляд останніх досягнень у застосуванні BIM-технологій для управління C&DW на різних стадіях проекту. Їхній scoring review охопив понад 300 наукових публікацій і виявив, що існуючі BIM-орієнтовані рішення зосереджені переважно на стадіях проектування та будівництва, тоді як фаза демонтажу та утилізації досі отримала недостатньо уваги. Іншими словами, наразі бракує комплексних цифрових інструментів, які б забезпечували «наскрізне» управління будівельними матеріалами від проектування до кінця життєвого циклу. Науковці відзначають, що більшість доступних BIM-модулів для поводження з відходами не інтегрують дані між стадіями та часто не враховують результати після будівництва, а також мають

слабку теоретичну обґрунтованість алгоритмів оптимізації потоків відходів. Таким чином, хоча ВІМ широко впроваджено для оптимізації дизайну та будівництва, його потенціал у плануванні демонтажу (наприклад, для проведення попереднього аудиту матеріалів, відстеження ресурсів, планування логістики розбирання) реалізований частково.

У статті вітчизняних науковців Левченко Н. М., Назаренко О. М. та ін. [9] розглядається підхід до управління будівельними відходами через призму економіки замкнутого циклу, що передбачає максимальну утилізацію та повторне використання будівельних матеріалів. Автори акцентують увагу на автоматизованих системах сортування, цифрових технологіях та нормативно-правових механізмах як ключових факторах ефективного рециклінгу. Увагу приділено економічним стимулам (податковим пільгам, «зеленим» закупівлям), які можуть сприяти зменшенню будівельних відходів та розвитку ринку вторинних матеріалів. Зроблено висновок, що системний підхід до управління відходами є критично важливим для зниження екологічного навантаження та забезпечення стійкості будівельної галузі.

Отже, тематика дослідження є актуальною, оскільки виникає потреба у комплексніших підходах, які одночасно оцінюють екологічні вигоди та витрати, що підтверджується іншими дослідженнями (наприклад, поєднанням LCA з аналізом життєвих витрат – LCC – для вибору оптимальної стратегії управління відходами). Проблема рециклінгу будівельних матеріалів та оптимізації демонтажу є надзвичайно актуальною через зростаючі обсяги будівельних відходів, необхідність відновлення міст, обмеженість природних ресурсів та необхідність впровадження циркулярної економіки.

Виклад основного матеріалу. Повторне використання і переробка будівельних матеріалів є складовою концепції сталого розвитку будівельної галузі. Теоретичною основою є циркулярна економіка, яка передбачає повернення ресурсів у

виробничий цикл та мінімізацію відходів. На відміну від лінійної моделі «виробництво – використання – утилізація», циркулярний підхід спрямований на замкнений цикл матеріалів, де будівельні відходи розглядаються як вторинна сировина для нових ресурсів. У будівництві це означає, що матеріали споруди в кінці її життєвого циклу не повинні перетворюватися на сміття, а мають повернутися у вигляді корисних ресурсів. Подібний системний підхід розглядає процеси демонтажу та переробки як частину життєвого циклу будівлі, інтегровану з етапами зведення і експлуатації. Методологічно необхідно враховувати екологічні пріоритети (мінімізація впливу на довкілля), економічну ефективність та впровадження інновацій при плануванні робіт з демонтажу і рециклінгу.

Теоретичні дослідження [3–9] підтверджують, що рециклінг будівельних матеріалів має суттєві переваги для довкілля. Завдяки повторному використанню ресурсів зменшується потреба у видобутку первинної сировини (піску, щебню, деревини тощо), скорочуються енерговитрати на виробництво нових матеріалів, а обсяг відходів, що направляються на полігони, істотно знижується. Переробка матеріалів також пов'язана зі зменшенням викидів парникових газів: скорочення виробництва цементу шляхом заміни його частки вторинними мінеральними добавками веде до зниження викидів CO₂, оскільки виробництво клінкеру є енергоємним та вуглецеємним процесом. Економічно рециклінг може бути вигідним за рахунок скорочення витрат на видалення сміття і придбання нових матеріалів.

Міжнародний досвід свідчить, що встановлення цільових показників і стандартів утилізації відходів сприяє розвитку інфраструктури переробки. Окрім згаданих директив ЄС щодо 60–70 % рециклінгу, багато країн впроваджують будівельні стандарти, які вимагають проектувати будівлі з урахуванням можливості демонтажу і вторинного використання матеріалів (концепція Design for Deconstruction) [10]. Теоретично це

підкріплюється поняттям “будівельний паспорт”, що містить інформацію про всі

матеріали будівлі та їх придатність до повторного застосування.

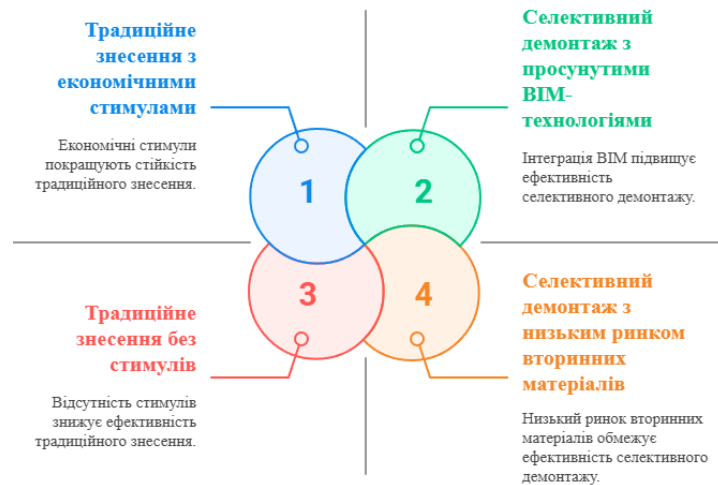


Рис. 1. Комплексна оцінка стратегій управління будівельними відходами

Таким чином, на основі теоретичних положень циркулярної економіки, принципів екологічної раціональності та системного підходу до життєвого циклу будівлі, була розроблена методологія комплексної оцінки стратегій управління будівельними відходами, що враховує як технологічні, так і економічні аспекти вибору демонтажних рішень. На рисунку 1 представлено типологізацію можливих стратегій з урахуванням рівня технологічної інтеграції та наявності економічних стимулів, що дозволяє оцінити потенціал кожної стратегії з точки зору ефективності поводження з відходами.

У поєднанні з інформаційним моделюванням такі підходи дозволяють ще на стадії проектування передбачити сценарії кінця життєвого циклу будівлі. У результаті, нормативні вимоги спонукають учасників ринку до впровадження циркулярних рішень, а також створюють попит на інновації у сфері рециклінгу будівельних відходів.

Отже, теоретичні засади рециклінгу будівельних матеріалів базуються на принципах циркулярної економіки, екологізації будівництва та системного підходу до життєвого циклу будівель. Вони підкріплені економічними розрахунками вигідності вторинного використання та нормативними вимогами, що задають

орієнтири для практичної реалізації цих процесів.

Сучасний рівень розвитку технологій відкриває широкі можливості для ефективної переробки будівельних відходів. Існує комплекс підходів до переробки – від традиційних механічних методів до хімічних технологій та впровадження цифрових рішень, які автоматизують і оптимізують процес.

Механічна переробка є найпоширенішим методом утилізації будівельних відходів, що охоплює комплекс операцій – від дроблення великих фрагментів конструктивних елементів до їх подрібнення, сортування та очищення з метою перетворення матеріалів у вторинну сировину, придатну для повторного використання. За допомогою спеціалізованих дробарок здійснюється дроблення масивних фрагментів залізобетону, бетону та цегли у дрібні фракції, такі як щебінь, гравій або піщано-гравійна суміш, що використовуються як заповнювачі у виробництві нового бетону або як основа для дорожніх покриттів.

Подальше сортування, яке може проводитися як вручну, так і за допомогою автоматизованих ліній з використанням грохотів, сит та сенсорних систем, дозволяє розділити суміш відходів на окремі потоки – бетон, цеглу, метал, деревину, скло та пластик, причому очищення від домішок за

допомогою магнітних або повітряних сепараторів значно покращує якість отриманої вторинної сировини. Специфічні механічні технології передбачають, що металеві компоненти надалі відправляються на переплавку, деревину – повторно використовуються або дробляться для виробництва деревостружкових плит, скло – переплавляється або застосовується як теплоізоляційний матеріал, а асфальтобетон переробляється у матеріал, що дозволяє знизити споживання первинного бітуму.

Використання мобільних рециклінгових комплексів, здатних обробляти відходи безпосередньо на будівельному майданчику, сприяє оптимізації логістики перевезення матеріалів до стаціонарних переробних підприємств, що зменшує транспортні витрати та екологічне навантаження, забезпечуючи тим самим ефективно впровадження циркулярних підходів у будівництві. Хімічні та термічні технології рециклінгу забезпечують глибшу обробку будівельних відходів, які важко переробити виключно механічними методами, і сприяють покращенню характеристик отриманих вторинних матеріалів. Один із підходів полягає в активації дробленого бетону: додаткове тонке подрібнення у поєднанні з хімічною обробкою слабкими кислотними або лужними розчинами дозволяє видалити залишки цементного каменю, очистити поверхню щебеню та підвищити його адгезивні властивості, що забезпечує кращу міцність нових бетонних сумішей. Інший напрямок – термічна активація, яка передбачає випалювання бетонного бою при температурах у діапазоні 500–700°C, що призводить до розкладу гідратованих цементних фаз та утворення активного порошку, здатного частково замінити портландцемент у виробництві нового бетону. Крім того, хімічні методи дозволяють інтегрувати будівельні відходи у виробництво новітніх матеріалів, таких як геополімерні цементы, що характеризуються високою міцністю та зниженим вуглецевим

слідом. Особливо важливою є також переробка полімерних та небезпечних компонентів, де застосовують методи термічного розкладання (піроліз) для отримання базових нафтохімічних продуктів, а спеціальні технології дозволяють перетворити азбест та бітумні матеріали на безпечні та придатні для повторного використання продукти.

Цифрові та інноваційні технології відіграють ключову роль у сучасному управлінні будівельними відходами та оптимізації процесів демонтажу. Сучасні системи інформаційного моделювання, такі як BIM, дозволяють створити детальний цифровий паспорт будівлі з даними про її матеріальний склад, що дає можливість ще на стадії проектування розробити стратегію демонтажу з максимальним збереженням придатних елементів. Інтеграція мережі датчиків і систем Інтернету речей забезпечує моніторинг стану відходів у режимі реального часу, оптимізує логістику перевезень та мінімізує транспортні витрати. Сучасні алгоритми штучного інтелекту сприяють автоматизованому сортуванню змішаних відходів, дозволяючи з високою точністю класифікувати матеріали за фракціями та підвищувати ефективність переробки. Такі технології, поряд із застосуванням блокчейн-систем для прозорості інформаційних потоків, сприяють розвитку циркулярної економіки в будівництві, забезпечуючи комплексний підхід до управління матеріальними ресурсами від етапу проектування до кінця життєвого циклу будівлі. У якості аналізу була створена таблиця з виявленням недоліків та переваг наведених методів переробки будівельних матеріалів (табл.).

Згідно таблиці, ефективна реалізація повторного використання потребує комплексного підходу, який поєднує механічні, хімічні, термічні та цифрові технології для забезпечення високої якості вторинної сировини, оптимізації виробничих процесів та мінімізації екологічного впливу.

Таблиця

Узагальнення методів повторного використання будівельних матеріалів

Методологія	Опис	Переваги	Недоліки/Обмеження	Сфера застосування
Механічна переробка	Дроблення, подрібнення, сортування та очищення будівельних відходів з метою отримання вторинної сировини.	Простота технології, значне зменшення об'єму відходів, широко застосовується.	Обмежена якість отриманої сировини, потреба у додатковому сортуванні та очищенні.	Рециклінг бетону, цегли, металу, деревини, скла.
Хімічна або термічна активація	Активація дробленого бетону через хімічну обробку та/або випалювання (термічна активація) для отримання активного порошку, який підвищує властивості матеріалу.	Покращення адгезії та міцності вторинних сумішей, підвищення якості сировини для нових бетонних виробів.	Висока енерговитратність, складність технологічного процесу, потреба у спеціалізованих умовах.	Виробництво нового бетону із частковою заміною портландцементу.
Перетворення відходів на нові матеріали	Використання дрібнодисперсних мінеральних залишків для виробництва геополімерних цементів та інших інноваційних матеріалів.	Зниження вуглецевого сліду, максимальне використання відходів, створення нових матеріалів	Потребує спеціалізованих реагентів та технологій, складність масштабування процесу.	Будівельні блоки, панелі, фундаментні конструкції.
Рециклінг полімерних і небезпечних матеріалів	Застосування технологій піролізу для термічного розкладу пластикових відходів, а також спеціальних методів утилізації азбесту та бітумних матеріалів.	Отримання нафтохімічних продуктів, утилізація небезпечних компонентів, повернення базових хімічних компонентів	Висока енерговитратність, технологічна складність, потреба у строгому контролі процесів.	Отримання базових компонентів для нових матеріалів, утилізація небезпечних відходів.
Комплексні термохімічні процеси	Плазмова переробка, що включає газифікацію будівельних відходів при надвисоких температурах з утворенням синтез-газу та інертного шлаку.	Повна деструкція домішок, універсальність для змішаних відходів, можливість обробки небезпечних компонентів.	Дуже висока енерговитратність, висока вартість, обмежене застосування через складність обладнання.	Переробка змішаних та спеціалізованих (небезпечних) відходів.

Управління демонтажем будівель на сучасному етапі має починатись з ретельного обстеження споруди із застосуванням сучасних технологій, таких як 3D-сканування, лазерна діагностика, дрони та IoT-системи [11]. Завдяки отриманій точній цифровій моделі будівлі визначається її технічний стан, можливість повторного використання різних елементів (несучих конструкцій, облицювальних матеріалів,

інженерного обладнання) та виявляються потенційно небезпечні компоненти (азбест, свинець у фарбі, цвіль).

Вибір методу демонтажу є критичним – механізований демонтаж із застосуванням важкої техніки забезпечує оперативність, але зазвичай генерує змішаний уламковий матеріал, що ускладнює подальше сортування. Селективний демонтаж (деконструкція) дозволяє поступово

розібрати будівлю, зберігаючи цілі компоненти для повторного використання або переплавлення, хоча потребує більше часу і ресурсів.

Сучасні цифрові технології в перспективі мають можливість інтегрувати дані з різних стадій життєвого циклу будівлі – від проектування до демонтажу – забезпечуючи прозорість і контроль за матеріальними потоками. Комплексний підхід дозволяє не лише оптимізувати процес демонтажу та повторного використання матеріалів, а й стимулює розвиток циркулярної економіки в будівництві, сприяючи екологічній та економічній стійкості галузі, цифровізації будівництва.

Висновки

У даній статті розглянута інтегральна концепція сталого управління будівельними відходами, яка охоплює всі стадії життєвого циклу споруди – від етапу проектування, через демонтаж, до переробки та повторного використання матеріалів. В результаті аналізу були охоплені сучасні механічні, хімічні (у тому числі термічні) та цифрові підходи, завдяки яким можна не лише мінімізувати об'єми відходів, а й покращити їх якість як вторинної сировини для подальшого застосування. В перспективі подальших наукових досліджень наявне використання ВІМ та алгоритмів ШІ дає можливість створити цифрові моделі будівель, що сприяють визначенню оптимальних сценаріїв демонтажу та повторного використання елементів вже на ранніх стадіях проектування. У практичному контексті дослідження теоретичних підходів, так і реальних кейсів. Зроблено висновок, що комплексний підхід – злиття технологічних інновацій, традиційних методів переробки та системного планування – є ключовим

чинником у досягненні стійкого розвитку будівельної галузі. Запропонована методологія комплексної оцінки стратегій управління будівельними відходами створює основу для впровадження інновацій, оптимізації логістики демонтажу та переробки матеріалів, що в свою чергу сприяє ефективному використанню ресурсів, збереженню навколишнього середовища та розвитку циркулярної економіки.

Обов'язковим етапом реалізації запропонованих стратегій є їх адаптація на муніципальному рівні. Співпраця між місцевою владою, роботодавцями, бізнес-сектором та громадськими організаціями створює сприятливе середовище для формування інфраструктури з переробки та демонтажу. Впровадження економічних стимулів, таких як податкові пільги та «зелені» закупівлі, а також розробка відповідних нормативно-правових механізмів сприятимуть впровадженню інтегрованих підходів та забезпечать умови для сталого розвитку регіонів.

Підсумовуючи, отримані результати дозволяють розглядати інтегровані технологічні рішення як базу для трансформації будівельної галузі з орієнтацією на цілісний екологічний, соціально-економічний та інституційний підхід. Проведене дослідження обґрунтовує ефективність міждисциплінарного підходу до реалізації циркулярних стратегій, який не лише сприяє збереженню природних ресурсів, але й стимулює економічний розвиток та підвищує соціальну згуртованість на рівні місцевих громад. Реалізація цієї системи потребує послідовної інтеграції зусиль на рівні місцевих органів влади, бізнесу та суспільства, що стане запорукою сталого трансформаційного процесу у будівельній сфері.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Islam N., Sandanayake M., Muthukumaran S., Navaratna D. Review on Sustainable Construction and Demolition Waste Management – Challenges and Research Prospects. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, № 8. P. 3289. DOI: 10.3390/su16083289.
2. Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року : Указ Президента України від 30.09.2019 № 722/2019. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text> (дата звернення: 14.02.2025).
3. Skanche M. 70 % of construction and demolition waste shall be re-used or recycled by 2020. Loopfront Blog. 23.03.2020. URL: <https://blog.loopfront.com/blog/70-of-construction-and-demolition-waste-shall-be-re-used-or-recycled-by-2020> (дата звернення: 17.02.2025).

4. Menegaki M., Damigos D. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2018. Vol. 13. Pp. 8–15.
5. Pantini S. et al. Is selective demolition always a sustainable choice? *Waste Management*. 2020. Vol. 103. Pp. 169–176. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.12.033.
6. Zhang H. et al. Integrated Benefits of Sustainable Utilization of Construction and Demolition Waste in a Pressure-State-Response Framework. *Sustainability*. 2023. Vol. 16, № 19. P. 8459. DOI: 10.3390/su16198459.
7. Brütting J. F. G. Optimum design of low environmental impact structures through component reuse : Doctoral Thesis. EPFL, Switzerland. 2020. DOI: 10.5075/epfl-thesis-8448.
8. Nikmehr B. et al. BIM-Based Tools for Managing Construction and Demolition Waste (CDW) : a scoping review. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, № 15. P. 8427. DOI: 10.3390/su13158427.
9. Левченко Н. М., Назаренко О. М., Березовська А. О., Белоусова П. В., Щемелев М. В., Гаджівердієв А. А. Інноваційні технології в управлінні будівельними відходами згідно економіки замкнутого циклу. *Науковий вісник будівництва*. 2024. № 110. С. 78–85. DOI: 10.33042/2311-7257.2024.110.1.9.
10. Derikvand M., Fink G. Design for Deconstruction : Benefits, Challenges, and Outlook for Timber – Concrete Composite Floors. *Buildings*. 2023. Vol. 13, № 7. P. 1754. DOI: 10.3390/buildings13071754.
11. Rustamov A., Gasanov A., Azizullayev M. G. Analysis of modules and systems used in effective control of UAVS in radio electronic combat environment. 2024. DOI: 10.13140/RG.2.2.25339.12326.

REFERENCES

1. Islam N., Sandanayake M., Muthukumaran S. and Navaratna D. Review on Sustainable Construction and Demolition Waste Management – Challenges and Research Prospects. *Sustainability*. 2024, vol. 16, no. 8, p. 3289. DOI: 10.3390/su16083289.
2. *Pro Tsily stalogo rozvytku Ukrayiny na period do 2030 roku : Ukaz Prezydenta Ukrayiny vid 30.09.2019 № 722/2019* [On the Sustainable Development Goals of Ukraine for the period until 2030 : Decree of the President of Ukraine dated September 30, 2019 No. 722/2019]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text> (accessed on: February 14, 2025). (in Ukrainian).
3. Skanche M. 70 % of construction and demolition waste shall be re-used or recycled by 2020. Loopfront Blog. 23.03.2020. URL: <https://blog.loopfront.com/blog/70-of-construction-and-demolition-waste-shall-be-re-used-or-recycled-by-2> (accessed on: 17.02.2025).
4. Menegaki M. and Damigos D. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2018, vol. 13, pp. 8–15.
5. Pantini S. et al. Is selective demolition always a sustainable choice? *Waste Management*. 2020, vol. 103, pp. 169–176. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.12.033.
6. Zhang H. et al. Integrated Benefits of Sustainable Utilization of Construction and Demolition Waste in a Pressure-State-Response Framework. *Sustainability*. 2023, vol. 16, no. 19, p. 8459. DOI: 10.3390/su16198459.
7. Brütting J.F.G. Optimum design of low environmental impact structures through component reuse : Doctoral Thesis. EPFL, Switzerland, 2020. DOI: 10.5075/epfl-thesis-8448.
8. Nikmehr B. et al. BIM-Based Tools for Managing Construction and Demolition Waste (CDW) : a scoping review. *Sustainability*. 2021, vol. 13, no. 15, p. 8427. DOI: 10.3390/su13158427.
9. Levchenko N.M., Nazarenko O.M., Berezovska A.O., Bilosova P.V., Shchemelev M.V. and Hadzhiverdiyev A.A. *Innovatsiyni tekhnolohiyi v upravlinni budivel'nyh vidkhodamy zhidno ekonomiky zamknutogo tsyклу* [Innovative technologies in construction waste management according to the closed-loop economy]. *Naukovyy visnyk budivnytstva* [Scientific Bulletin of Construction]. 2024, no. 110, pp. 78–85. DOI: 10.33042/2311-7257.2024.110.1.9. (in Ukrainian).
10. Derikvand M. and Fink G. Design for Deconstruction : Benefits, Challenges, and Outlook for Timber – Concrete Composite Floors. *Buildings*. 2023, vol. 13, no. 7, p. 1754. DOI: 10.3390/buildings13071754.
11. Rustamov A., Gasanov A. and Azizullayev M.G. Analysis of modules and systems used in effective control of UAVS in radio electronic combat environment. 2024. DOI: 10.13140/RG.2.2.25339.12326.

Надійшла до редакції: 11.09.2025.