

УДК 72.051.8:69:502.174.1

DOI <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2026.40.19>

РЕЦИКЛІНГ БУДІВЕЛЬНИХ ВІДХОДІВ У ЗВЕДЕННІ ЗАХИСНИХ СПОРУД

Рябцева Поліна Русланівна¹, Разенкова Анастасія Сергіївна²,
Седякіна Любов Веніамінівна³

¹ здобувач вищої освіти четвертого (бакалаврського) рівня,
Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури, Київ, Україна,
e-mail: polina.riabtseva@naoma.edu.ua, orcid: 0009-0001-4985-1960

² здобувач вищої освіти четвертого (бакалаврського) рівня,
Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури, Київ, Україна,
e-mail: anastasiia.razenkova@naoma.edu.ua, orcid: 0009-0002-3155-1617

³ PhD архітектури,
старша викладачка кафедри архітектурних конструкцій,
Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури, Київ, Україна,
e-mail: liubov.tiutina@naoma.edu.ua orcid: 0000-0002-8485-1878

Анотація. Мета. У роботі висвітлено потенціал рециклінгу відходів руйнації як стратегічного ресурсу для виробництва модульних захисних конструкцій швидкого розгортання, призначених для цивільного захисту та системи захисних споруд. Метою дослідження є оцінка ефективності таких модульних систем із вторинних матеріалів та визначення перспектив впровадження принципів циркулярної економіки та адитивних технологій (3D-друку) у формування захисної інфраструктури країни.

Методологія. Дослідження базується на комплексному підході, що поєднує теоретичний аналіз і конструктивне моделювання. Застосовано такі методи: порівняльний аналіз оцінював склад будівельних відходів (бетон, цегла, метал) та їхню придатність як заповнювачів у захисних конструкціях; системний підхід розглядає процес рециклінгу як послідовність розмінування, сортування, подрібнення та фракціонування матеріалу; конструктивне моделювання заключається в обґрунтуванні концепції «каркас-наповнювач», де подрібнений бетон поглинає частину енергії вибухової хвилі; метод узагальнення сформував рекомендації щодо розміщення швидкозбірних споруд на основі досвіду українських міст (Харків, Запоріжжя, Одеса) та положень Постанови Кабінету Міністрів України №1073.

Результати дослідження. Дослідження показало ефективність, що рециклінг відходів руйнації є стратегічним ресурсом для створення швидкозбірних захисних споруд у зонах підвищеного воєнного ризику. Використання конструкцій типу «каркас-наповнювач» із вторинним бетонним агрегатом дозволяє зменшити екологічне навантаження від накопичення будівельного сміття, скоротити споживання природних заповнювачів та оперативно розгортати укриття без застосування важкої техніки.

Наукова новизна. Удосконалено підхід до створення мобільних захисних споруд із використанням конструкцій типу «каркас-наповнювач», де продукти рециклінгу будівельних відходів (подрібненого бетону чи цегли) застосовуються як основний заповнювач для поглинання енергії вибухової хвилі. Показано

ефективність подрібненого матеріалу у розсіюванні ударної енергії та обґрунтовано використання мобільних переробних установок для переробки відходів безпосередньо на місцях руйнувань. Вперше запропоновано поєднання дрібних фракцій вторинної сировини з адитивними технологіями (3D-друком) для створення швидкозбірних захисних конструкцій складної форми.

Практична значущість. Застосування результатів дослідження можливе у проєктуванні мобільних цивільних укриттів, тимчасових бар'єрів та відновлювальних робіт на територіях, що постраждали від руйнувань. Впровадження принципів циркулярного будівництва допомагає відновлювати території та підвищує безпеку громад.

Ключові слова: рециклінг, відходи руйнації, енергоефективність, будівельне сміття, циркулярна економіка, захисні споруди, модульні конструкції, безкрановий монтаж конструкцій, швидкозбірні укриття.

ВСТУП

Рециклінг у будівельній галузі визначається як процес переробки відходів для їх повторного використання у виробничому циклі, що лежить в основі принципів циркулярної економіки. В умовах збройного конфлікту цей процес набуває особливої специфіки, оскільки відходи руйнації суттєво відрізняються від традиційних будівельних відходів. У контексті циркулярної економіки їх можна розглядати як ресурс для створення швидкозбірних модульних конструкцій, захисних споруд та інфраструктурних об'єктів. Так, бетонний щебінь після сортування і подрібнення може замінювати природний заповнювач у нових бетонних сумішах, металеві фрагменти – повертатися у металургійні цикли, а деревина та деревні плити після термічної або механічної обробки – використовуватися у виробництві композитних матеріалів. Скло та кераміка можуть слугувати фракціями для дорожнього покриття або будівельних блоків.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Рециклінг, в дослідженнях був виділений в роботах:

У дослідженні Нонік Л. Ю. Пацева, І. Г. Пічкур Т. В. зазначається, що відходи від руйнувань можуть містити токсичні, вибухонебезпечні, біологічні та радіоактивні компоненти, що становлять підвищену загрозу для довкілля та населення, та суттєво відрізняються від будівельних, а саме: впливом на довкілля та способами переробки. Робота Етчеберрія М., Марі А. Р. містить теми у яких обґрунтовано можливість використання вторинного щебеню у складі конструкційного бетону за умови належного контролю його якості. Автори підкреслюють потенціал переробленого заповнювача як повноцінного будівельного ресурсу. Фісуненко П. та Герасимова О. (2022) проаналізували підхід до оцінки вартості пошкоджених і зруйнованих будівель,

що передбачає визначення збитків із урахуванням витрат на демонтаж і ремонт «до заселення» [12; 22; 17].

Статистичні дані руйнувань російсько-української війни було враховано та використано нормативно документну базу, а саме хартії, а також законодавчі акти [18; 26; 25].

Тематика енергоефективності була досліджена в роботах: Стаття Роздорожнюк О. Я. у якій розглядається впровадження енергоефективних технологій у реновації зруйнованих війною населених пунктів в Україні. Питання енергоефективності в умовах екологічної кризи, було з'ясоване в роботі Сердюк В. (2023) спричиненої антропогенним впливом. Наголошується, що будівельна галузь України за умови впровадження циркулярної економіки може перейти до використання вторинних ресурсів і зменшити негативний вплив на довкілля [16; 14].

Актуальність досліджуваної проблематики підтверджується участю України у ключових міжнародно-правових актах, серед яких: Європейська енергетична хартія (1991 р.), Договір до Енергетичної хартії (1994 р.), Київський протокол до Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (2004 р.) [1; 3; 4].

Циркулярне будівництво в роботі Єлісеєва М.О. описується як будівельні відходи, що є цінним ресурсом у межах циркулярної економіки. Авторка наголошує, що після сортування та подрібнення такі матеріали можуть ефективно використовуватися як наповнювачі у виробництві нової будівельної продукції [9].

Дослідження типів технологій рециклінгу було проаналізовано в роботі Гнатюк Л. Р. [11]. У роботі Давидова А. М., Тютіної Л. В. розглядається типологія сучасних фасадних систем та їх вплив на формування пластичної архітектури. визначає нові підходи до формоутворення будівель. Олійник О. П., Токар М. М. акцентують увагу на просторовій організації та

функціональній структурі таких об'єктів як основі їх ефективного та збалансованого функціонування. Як формується конструкція та вигляд сучасних будівель описують Давидов А. М., Боборикін О. Б., Гнілоскурєнко М. Г., Чернявський В. В. та Тютіна Л. В. [8; 13; 20]. Автори підкреслюють, що поєднання технічних рішень і зовнішньої виразності є основою створення гармонійної архітектури. Азізов Т. Н., Люльченко В. Г., Орлова О. М. (2024) описує принципи використання подрібненого бетону і цегли в модульних конструкціях як дискретного середовища, що за рахунок внутрішнього тертя, переміщення частинок і локальних деформацій розсіює енергію вибуху та зменшує дію ударної хвилі [5]. Річардсон, А. Е., Ковентрі, К., і Грем, С. (2009) [27]; Хьюїнь Чонг Фуок, Нгуєн Тієн Зунг, Нго Сі Хюї і Во Зуй Хай (2017) [24]; Гусєв, В. О., Смирнов, А. С., & Нікіфорова, Т. Д. (2022) [7] пишуть про впровадження систем модульних захисних конструкцій у містах України з метою безпеки населення в умовах воєнних ризиків, особливо на територіях із підвищеною загрозою та об'єктах критичної інфраструктури. У роботі також наголошується на перспективності поєднання технологій 3D-друку з переробкою будівельних відходів як складової циркулярного підходу до відбудови та управління ресурсами. У дослідженні Рябцева П., Тютіна Л. та Річардсон А. Е., Ковентрі К., і Грем С. (2009) підкреслюється, що застосування сталевих або композитних рішень у поєднанні з ребрами жорсткості чи внутрішніми перегородками дозволяє забезпечити рівномірний розподіл навантажень, зберегти геометрію конструкції та підвищити її ефективність [15; 27].

Технології 3D-друку активно поширюються в різних галузях промисловості, зокрема й у будівництві. Їх розвитком та практичним застосуванням займаються як українські, так і зарубіжні дослідники Андросук Г. О., Даттон Р., Ванглер Т., Вегер Д., Гелен К., Ділленбургер Б., Діні Е., Кисіль О.В., Лоук Д., Мюллер Ф., Перро А., Хаберт Г., Хак Н., Хошневіс Б., Хуан І., Шатов С. В.

МЕТА

Дослідити можливості використання рециклінгу відходів руйнації як ресурсу для створення швидкозбірних захисних споруд, обґрунтувати ефективність модульних систем із вторинних матеріалів та визначити перспективи впровадження принципів циркулярної економіки й адитивних технологій у формуванні захисної інфраструктури.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

У наукових дослідженнях зазначається, відходи від руйнувань можуть містити токсичні, вибухонебезпечні, легкозаймисті, біологічні та радіоактивні компоненти, зокрема залишки матеріалів медичних і лабораторних установ, що створює підвищені ризики для довкілля та населення. "Відходи від руйнацій схожі за складом з відходами, які утворюються внаслідок стихійних лих, але вони не повторюють склад відходів будівництва та знесення. На відміну від останніх, відходи від руйнувань можуть містити вкрай небезпечні компоненти, а саме: токсичні, вибухонебезпечні, легкозаймисті, біологічні та радіоактивні компоненти медичних або лабораторних установ, які несуть загрозу навколишньому середовищу. Тому нині важливим завданням перед нашим суспільством є розроблення стратегій управління відходами руйнацій в умовах воєнного стану. Надважливим завданням є визначення пріоритетних шляхів реалізації Закону України «Про управління відходами», вирішення проблем перероблення та утилізації відходів війни без негативного впливу на довкілля, сприяння залученню інвестицій у створення екологічно дружньої інфраструктури перероблення відходів". Успішна реалізація положень Закону України «Про управління відходами» в умовах воєнного стану передбачає формування екологічно безпечної інфраструктури переробки, що дозволяє трансформувати потенційну екологічну загрозу на вторинний ресурс. Технологічний процес рециклінгу включає попереднє сортування, вилучення небезпечних компонентів, магнітну сепарацію металу, подрібнення та фракціонування матеріалу з подальшим лабораторним контролем його фізико-механічних характеристик [19].

Значний науковий інтерес становить використання переробленого бетонного заповнювача. Дослідження Тчеберрії М., Марі А. Р. та Васкеса Е. (2007) доводять можливість застосування вторинного щебеню у складі конструкційного бетону за умови контролю його якості, що підтверджує потенціал такого матеріалу як повноцінного будівельного ресурсу [1].

Одним із перспективних напрямів використання перероблених відходів руйнації є формування швидкозбірних захисних конструкцій. Подрібнений бетон та цегляний бій можуть застосовуватися як заповнювач габіонних систем або модульних захисних блоків. Такий підхід забезпечує: зменшення обсягів видалення відходів, скорочення логістичних витрат, мінімізацію вуглецевого сліду транспортування, оперативність зведення захисних бар'єрів та реалізацію принципів

локальної циркулярної економіки. Як вважають Фісуненко П. та Герасимова О., «оцінка вартості пошкоджених та зруйнованих будівель, що включатиме демонтаж та ремонт «до заселення» (без урахування зносу, інвестицій, запасів), є ключовим етапом визначення обсягу збитків. Відновлювальна вартість формується на основі прямих/загальновиробничих витрат, до яких додаються демонтажні роботи та поточні ціни на матеріали». Високі екологічні вимоги, значні витрати на вивезення, транспортування та переробку демонтованих матеріалів повинні дати поштовх для їхньої подальшої переробки, зменшення кількості відходів, відправлених на полігони. І варто зауважити, що рециклінг відходів руйнації може розглядатися не лише як екологічний інструмент, а й як стратегічний елемент формування оборонної інфраструктури в умовах воєнного часу. Особливо це актуально для міст, які постраждали від воєнних дій, де вторинна переробка будівельних матеріалів мінімізує екологічний збиток [17; 25].

Повномасштабна агресія російської федерації спричинила найбільш масштабну деструкцію матеріальної інфраструктури в Європі з середини ХХ століття. Станом на березень 2026 року процес руйнування українських міст трансформувалася з гуманітарної катастрофи у глобальний виклик для світової інженерії та урбаністики. Тож можна дійти до висновку, що рівень руйнувань в Україні вимагає не просто ремонту, а повної трансформації. Це найбільший будівельний майданчик планети, де світ має довести, що сучасні технології сильніші за радянську артилерію та тактику «випаленої землі».

Згідно з даними звіту прями збитки, завдані фізичним активам України, перевищили \$195 млрд. Проте фахівці наголошують, що цифри не здатні повною мірою відобразити глибину втрат. Наталія Шаповал, очільниця KSE Institute, у своєму коментарі до звіту «Росія заплатить» підкреслює: «Ми маємо справу з найбільшим в історії людства задокументованим руйнуванням приватної власності та цивільної інфраструктури. Це не просто цифри у звітах – це фактичне стирання матеріальної бази життя цілої нації». Загальна потреба на відновлення об'єктів за принципом модернізації сьогодні оцінюється у \$588 млрд. Найбільшого удару зазнав житловий фонд. За статистикою KSE Institute, пошкоджено або повністю знищено понад 260 тисяч будівель, що становить близько 14% усього житлового масиву країни. Окрім суто технічних втрат, дослідники звертають увагу на соціокультурний аспект руйнувань. Станом на

початок 2026 року, обсяги відходів, що утворилися внаслідок бойових дій, досягли катастрофічних масштабів. За даними звіту кількість відходів руйнації оцінюється у понад 30 млн тонн. Це приблизно дорівнює десятирічному обсягу всіх твердих побутових відходів України у довоєнний період. Витрати лише на демонтаж, розчищення завалів та безпечне управління відходами (включаючи розмінування територій звалищ) оцінюються у \$28,5 млрд. Понад 65% усіх відходів зосереджено у чотирьох областях: Донецькій, Харківській, Київській та Херсонській. Проблема ускладнюється наявністю небезпечних компонентів [25; 26]. Згідно з аналітикою Міндовкілля України, будівельний конгломерат руїн складається з бетону та цегли – 60–70%. Потенційний ресурс для дорожнього будівництва, металобрухту – 10–15%. Цінна сировина для металургії, азбесту та токсичних включень, близько 40% зруйнованих будівель старого фонду містили азбест, що при пошкодженні створює загрозу для здоров'я населення через канцерогенний пил [12]. Будівельні відходи є невід'ємним супутником розвитку галузі, формуючись на всіх етапах життєвого циклу споруд. За сучасними оцінками, щорічний обсяг будівельних відходів у світі сягає 2,5 млрд тонн (близько 20% від загального обсягу відходів людства). Проте для України 2022–2026 років ця проблема набула екстремального масштабу. Згідно зі звітом, лише внаслідок бойових дій утворилося понад 30 млн тонн відходів, що вимагає негайного впровадження моделі циркулярної економіки. Аналіз морфологічного складу будівельного сміття дозволяє визначити пріоритетні напрями його вторинного використання. У структурі відходів будівництва, переважають такі групи: бетон та залізобетон: майже 50%; стінові вироби (цегла, піно-/газобетон): близько 30%; дорожні покриття та розчини: до 10%; метали та інші матеріали: 5–7% [19;12]. В умовах переходу до моделі циркулярної економіки будівельні відходи доцільно розглядати не як баласт, а як цінний ресурс. Єлісеєва М.О. наголошує, що значна частина таких матеріалів після сортування та подрібнення може успішно застосовуватися як наповнювачі у виробництві нової будівельної продукції [3]. Для України підхід такий як зниження собівартості будівництва за рахунок локальної сировини та мінімізація логістичного навантаження на громади, що найбільш постраждали від руйнувань має подвійну вигоду/ Окрім воєнних руйнувань, суттєве навантаження на довкілля створюють накопичені промислові відходи. Зокрема, у межах Червоноградського гірничопромислового

району накопичено понад 100 млн м³ відходів вуглевидобутку на площі понад 270 га. Як зазначається у матеріалах конференції щодо безпеки територіальних громад, поєднання переробки «воєнного» бетону із залученням цих промислових відходів може стати ключовим чинником сталого відновлення. Це дозволить не лише очистити території, а й забезпечити громади ресурсами для зведення нового енергоефективного житла [2]. Однією з найважливіших тем у світі сьогодення є питання енергоефективності. Оскільки проблеми екології внаслідок великої кількості антропогенних факторів призвели до кризи у XXI столітті. Сучасна будівельна галузь України є найбільш енергоємним сегментом економіки та основним джерелом генерації техногенних відходів. Проте за умови впровадження моделі циркулярної економіки цей сектор здатен трансформуватися у головного споживача вторинних мінеральних ресурсів. Такий підхід дозволяє інтегрувати будівництво в екосистему безперервного життєвого циклу, забезпечуючи економічний розвиток без антропогенного забруднення довкілля. Що і дозволить рухатися Україні в напрямку енергоефективності та ресурсурсній ощадливості [17].

«Згідно із підрахунками Європейського Союзу використання вторинних мінеральних ресурсів сприятиме зниженню використання природних (первинних) матеріальних ресурсів промисловими підприємствами орієнтовно на 17–24 % до 2030 року» [21].

Також варто наголосити, на таких міжнародних договорах, цілеспрямованих до сталого розвитку, до яких доєдналася і Україна, насамперед слід виділити

Європейську Енергетичну Хартію (1991 р.) та Договір до Енергетичної хартії [1] (1994 р.), Кіотський протокол до Рамкової Конвенції ООН про зміну клімату [3] (2004 р.) тощо. Європейська енергетична хартія є фундаментом формування спільної енергетичної політики ЄС. Для України ратифікація Договору до Енергетичної хартії стала визначальним етапом, що заклав правову основу для інтеграції вітчизняного енергетичного сектору в європейський простір та гармонізації відповідних стандартів [4].

Впровадження принципів циркулярного будівництва в умовах воєнного стану в Україні трансформується з екологічної ініціативи у критичну необхідність. Концепція циркулярного будівництва виступає стратегічною відповіддю на виклик накопичення 30 млн тонн воєнних відходів. На відміну від лінійної моделі, де ресурси видобуваються, споживаються

і викидаються, циркулярний підхід замикає цикл життєдіяльності матеріалів. Архітектура майбутнього має базуватися на принципах адаптивності та повторного використання. Важливим елементом тут є селективний демонтаж, який дозволяє зберегти до 90% матеріалів для повторної інкорпорації в будівельний процес. Однією з ключових перешкод для широкого впровадження рециклінгу є не стільки технічна складність процесу, скільки потреба в оновленні нормативно-правової бази, яка б визнавала вторинний бетон повноцінним будівельним матеріалом.

«Головна проблема рециклінгу в Україні – це не відсутність технологій, а відсутність довіри до вторинної сировини. Але досвід європейських країн доводить: перероблений бетон може бути надійнішим за первинний, якщо витримати технологію селективного демонтажу». Згідно з аналітикою Центру економічного відновлення, використання мобільних переробних комплексів безпосередньо на місцях руйнувань дозволяє скоротити витрати на логістику інертних матеріалів на 25–30%. Крім того, нормативне врегулювання згідно з Постановою КМУ №1073 створює правове поле для інтеграції відходів війни у виробничі ланцюжки. Водночас, український досвід доповнює світову практику циркулярності унікальним етапом – обов'язковим очищенням вторинної сировини від вибухонебезпечних предметів та токсичних залишків боєприпасів, що робить цей процес складнішим, але безальтернативним для безпечного відновлення [10; 22].

Зосереджуючись на сучасній практиці цивільного захисту населення, можна спостерігати застосування різноманітних типів швидкосторуджуваних укриттів. Зокрема, відомі конструкції, виконані у вигляді П-подібних залізобетонних рам, а також модульні захисні споруди заводського виготовлення [12]. Основною особливістю таких систем є індустріальний характер виробництва та висока несна здатність. Водночас їх монтаж потребує обов'язкового залучення кранової техніки, що ускладнює процес зведення споруд у зонах активних бойових дій або в умовах обмеженої логістики. У воєнний період особливо актуальним є створення невеликих мобільних об'єктів захисту, які можуть бути змонтовані без застосування важкої техніки, оперативно демонтовані та переміщені на іншу ділянку. У цьому контексті доцільно виокремити безкранові технології, які можна поділити на три основні групи:

1. Габіонні та каркасно-насіпні системи.

Габіонні конструкції складаються з легких металевих каркасів або геоконтейнерів, які у складеному стані мають мінімальні габарити

та масу. Після розгортання вони заповнюються інертним матеріалом безпосередньо на місці встановлення. Ключовою перевагою таких систем у межах концепції рециклінгу є можливість використання відходів руйнації як наповнювача. Подрібнений бетон, цегляний бій або фрагменти залізобетону після сортування та очищення можуть ефективно замінювати природний щебінь. Це дозволяє: зменшити обсяги захоронення будівельних відходів, мінімізувати транспортні витрати, скоротити час розгортання захисних бар'єрів та реалізувати принцип локальної циркулярної економіки. З інженерної точки зору ефективність габіонних бар'єрів пояснюється їх дискретною структурою. Під дією ударної хвилі енергія розсіюється між окремими фракціями наповнювача за рахунок внутрішнього тертя та переміщення частинок, що забезпечує демпфування імпульсу та зменшує ризик крихкого руйнування.

2. Модульні блокові системи сухого складання

Іноваційним рішенням є модульні системи, що з'єднуються за принципом механічної фіксації (пазо-ребеневі або замкові елементи). Такі блоки монтуються методом «сухої кладки» без застосування цементних розчинів. Використання вторинного наповнювача у складі легких бетонів або композитних матеріалів дозволяє зменшити масу окремих елементів порівняно з традиційними залізобетонними плитами. Це мінімізує потребу в підйомній техніці та спрощує транспортування. Крім того, механічний принцип з'єднання забезпечує можливість багаторазового демонтажу та повторного використання конструкції.

3. Геоконтейнери та насипні мішкові системи Найбільш мобільним різновидом безкранових технологій є використання полімерних геоконтейнерів або багатошарових мішків. У порожньому стані вони мають незначну масу та можуть транспортуватися без спеціалізованої техніки. Перевагою цієї технології в умовах рециклінгу є можливість використання дрібнодисперсних фракцій відходів руйнації, зокрема бетонної крихти та цегляного відсіву. Полімерна оболонка утримує навіть сильно подрібнений матеріал, що забезпечує максимальне залучення вторинної сировини. Ефективність таких бар'єрів також ґрунтується на дискретному характері конструкції. При вибуховому навантаженні енергія витрачається на подолання сил тертя між окремими елементами та деформацію оболонок, що зменшує передачу імпульсу по всій довжині споруди та підвищує її живучість при повторних впливах. Таким чином, безкранові технології швидкоспоруджуваних захисних

конструкцій мають суттєві переваги в умовах воєнного стану завдяки мобільності, адаптивності та можливості інтеграції матеріалів рециклінгу. Їх застосування дозволяє поєднати завдання цивільного захисту з принципами сталого управління відходами.

Основною запропонованого підходу є перехід від монолітних стаціонарних споруд до динамічних модульних систем, сформованих за принципом «каркас – наповнювач». У цій моделі сталеві або композитні рами виконують роль силового скелета, а подрібнені відходи руйнації (бетонний і цегляний щебінь) формують захисну масу, що забезпечує інерційний опір вибуховим навантаженням.

Порівняно з традиційними залізобетонними укриттями, такі системи мають низку переваг. По-перше, логістична гнучкість: елементи транспортуються у компактному розібраному вигляді, що спрощує доставку в обмежених умовах. По-друге, швидкість розгортання – відсутність «мокрих» процесів дає змогу здійснювати монтаж упродовж кількох годин. По-третє, адаптивність просторової структури: модульність дозволяє масштабувати об'єкт від окремого захисного блоку до комплексної системи укриттів. Водночас використання локального будівельного лому знижує витрати та відповідає принципам циркулярної економіки.

Модульні захисні споруди можуть мати різні конфігурації залежно від призначення та рівня загрози.

Коробчасті модулі – для наземних бар'єрів, блокпостів або окремих укриттів. Простий дизайн дозволяє швидко нарощувати висоту й товщину захисного шару. Тунельні та арочні системи – для захищених проходів та лінійних об'єктів. Арочна форма ефективно перерозподіляє навантаження та зменшує концентрацію напружень.

Напівзаглиблені конструкції – поєднують рециклований наповнювач із ґрунтом, підвищуючи стійкість до вибуху завдяки додатковому шару ґрунтового покриву та зменшенню відкритої площі.

Подрібнений бетон і цегла всередині модулів утворюють щільне дискретне середовище, що розсіює енергію вибуху через тертя між частинками, їх переміщення, локальну деформацію каркаса та поглинання уламків. Це функціонує як демпфувальне середовище, знижуючи передачу ударної хвилі [5]. Вибір матеріалу каркаса критичний для мобільності та довговічності. Сталеві рами міцні, але важкі та потребують антикорозійного захисту. Композитні профілі легші, стійкі до корозії та спрощують монтаж і транспортування. Каркас

повинен враховувати боковий тиск від насипного наповнювача, тому оснащується ребрами жорсткості або внутрішніми перегородками для рівномірного розподілу навантаження, запобігання локальним деформаціям та збереження геометрії. Оптимальна конструкція залежить від висоти модуля, складу рециклату та очікуваного вибухового навантаження. Таким чином, модульні споруди «каркас – наповнювач» поєднують гнучкість, мобільність та використання рециклінгу, забезпечуючи баланс між захисною ефективністю, швидкістю монтажу та економічністю [28; 16].

В умовах воєнних ризиків особливої актуальності набуває впровадження захисних конструкцій у місцях із потенційною загрозою повторних уражень, а також на територіях підприємств і стратегічно важливих об'єктів. Персонал таких локацій часто проживає у тимчасових модульних спорудах, що не забезпечують належного рівня безпеки. Це порушує питання необхідності інтеграції захисних рішень у проектування тимчасової інфраструктури як обов'язкової складової безпечної середовища, а не лише як додаткового заходу реагування. Практика впровадження модульних та швидкоспоруджуваних захисних конструкцій в Україні демонструє їх ефективність в умовах воєнного стану, особливо у містах, що перебувають під постійною загрозою ракетних та артилерійських обстрілів. У місті Харкові модульні укриття активно встановлюються у громадських просторах, поблизу зупинок громадського транспорту, ринків та житлових кварталів. Такі споруди здебільшого виконані у вигляді залізобетонних або комбінованих модулів заводського виготовлення, що монтуються у стислі терміни. Основною метою є забезпечення швидкого доступу населення до захисту під час повітряної тривоги в умовах щільної міської забудови. У Запоріжжі реалізовано проекти встановлення модульних залізобетонних укриттів у дворах багатоповерхових житлових будинків та поблизу об'єктів соціальної інфраструктури. Характерною особливістю є поєднання захисної функції з інтеграцією споруд у міський простір, що підвищує їх соціальну прийнятність та доступність. В Одесі модульні укриття застосовуються, зокрема, для захисту працівників критичної інфраструктури, включаючи портові та транспортні об'єкти. Тут акцент зроблено на мобільності конструкцій і можливості їх оперативного розміщення в зоні потенційної небезпеки. У Львові основна увага приділяється модернізації існуючих захисних споруд та створенню додаткових мобільних укриттів у громадських просторах. Хоча місто

не перебуває у безпосередній прифронтовій зоні, досвід впровадження модульних рішень свідчить про універсальність таких систем для різних регіонів країни. Загалом український досвід демонструє переважне використання заводських залізобетонних модулів. Водночас потенціал застосування технологій «каркас – наповнювач» із використанням рециклованих матеріалів залишається перспективним напрямом для подальшого розвитку.

Новітні тенденції будівельної сфери знаходяться на шляху активного застосування технології 3D-друку. Автоматизованість, виправдана економічна доцільність в перспективі, мінімізовані використання людського ресурсу набуватимуть все більшої актуальності. А технології рециклінгу будівельних відходів можуть якісно інтегруватися в цей процес.

Попри широке вивчення адитивних технологій, критично актуальним залишається поєднання 3D-друку із методами переробки будівельних відходів безпосередньо на об'єктах. Це корелює з Національною стратегією управління відходами до 2030 р., яка передбачає впровадження мобільних потужностей для рециклінгу та обов'язкове планування утилізації у проектно-кошторисній документації [27; 24; 7].

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження підтверджено значний потенціал рециклінгу відходів руйнації як ефективного ресурсу для створення модульних захисних конструкцій швидкого розгортання. Встановлено, що використання вторинних матеріалів дозволяє не лише зменшити навантаження на полігони відходів, але й суттєво оптимізувати матеріальні та економічні витрати у процесі формування систем цивільного захисту.

Оцінка ефективності запропонованих модульних систем показала їхню адаптивність, швидкість монтажу та відповідність вимогам безпеки в умовах надзвичайних ситуацій. Впровадження принципів циркулярної економіки у поєднанні з адитивними технологіями, зокрема 3D-друком, відкриває нові можливості для інноваційного розвитку захисної інфраструктури, забезпечуючи гнучкість проектних рішень і скорочення термінів реалізації.

Отже, трансформування будівельної індустрії до умов циркулярної економіки сприятиме розвитку стійких місцевих громад, поліпшить комфортні умови проживання чи перебування людей в будівлях, а також зменшить навантаження на довкілля шляхом відповідального та розумного використання природних ресурсів.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Про ратифікацію Договору до Енергетичної Хартії та Протоколу до Енергетичної Хартії з питань енергетичної ефективності і суміжних екологічних аспектів : Закон України від 06.02.1998 № 89/98-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/89/98-вр#Text> (дата звернення: 02.03.2026).
- [2] Про управління відходами : Закон України від 20.06.2022 № 2320-ІХ . URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text> (дата звернення: 02.03.2026).
- [3] Кіотський протокол до Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату (укр/рос) : Протокол Орг. Об'єдн. Націй від 11.12.1997 : станом на 17 листоп. 2006 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_801#Text (дата звернення: 02.03.2026).
- [4] Про затвердження Порядку поводження з відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків та внесення змін до деяких постанов Кабінету Міністрів України : Постанова Каб. Міністрів України від 27.09.2022 № 1073 : станом на 13 груд. 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1073-2022-п#Text> (дата звернення: 05.03.2026).
- [5] Азізов Т. Н., Люльченко В. Г., Орлова О. М. Швидкоспоруджувана захисна споруда цивільного захисту. *Environmental Safety and Natural Resources*. 2024. Т. 2, № 50. С. 78–87. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.78-87>
- [6] Гаврись А. П., Яковчук Р. С., Стародуб Ю. П., ТурН.Ю.Управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних із затопленням територій на рівні об'єднаних територіальних громад. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. Т. 1, № 15. С. 101–109. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcs.2023.1\(15\).101-109](https://doi.org/10.33269/nvcs.2023.1(15).101-109)
- [7] Гусев В. О., Смирнов А. С., Нікіфорова Т. Д. Використання бетонних сумішей на основі продуктів рециклінгу будівельних відходів для зведення будівель методом 3d-друку. *Переможемо-відбудемо!* : Всеукр. науково- практ. форум, м. Дніпро, 29–30 черв. 2022 р. 2022. С. 40–42. URL: <https://pgasa.dp.ua/wp-content/uploads/2023/06/Zbirnyk-tez-Peremozhemo-vidbuduyemo.pdf>
- [8] Давидов А. М. Тютіна Л. В. Типологія новітніх фасадних систем та її вплив на пластичну мову архітектури ХХІ ст. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 1. С. 102–108. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ujba_2021_1_15
- [9] Єлісеєва М. О., Ходус М. В. Порівняння нормативної бази Європейського Союзу та України в питанні управління та рециклінгу будівельних відходів. *Інноваційні технології підготовки кадрів для промисловості та транспорту 2025* : зб. наук. праць міжнар. конф., м. Дніпро, 25–26 квіт. 2025 р. Дніпро : НТУ «ДП», 2025. URL: <https://ir.nmu.org.ua/entities/publication/6208c2ac-00a3-48a9-b2dd-bb51b8acefcb>.
- [10] Лір В. Енергетична політика сталого розвитку як вектор інтеграції Україна-ЄС. *Науковий вісник*. 2016. № 4 (236). С. 158–177. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nv_2016_4_15
- [11] Новік Г. В., Гнатюк Л. Р., Візір А. С. Практичність модульного будівництва: досвід минулого та перспективи. *Theory and practice of design*. 2022. № 25. С. 76–84. DOI: <https://doi.org/10.18372/2415-8151.25.16783>
- [12] Нонік Л. Ю., Пацева І. Г., Пічкур Т. В. Розроблення стратегії управління відходами руйнацій в умовах воєнного стану. *Екологічна безпека та технології захисту довкілля*. 2023. Т. 4. С. 40–47. URI: <http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/8292>
- [13] Олійник О. П. Токар М. М. Принципи сталого розвитку в центрах сімейного дозвілля. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2023. Т. 65. С. 236–250. DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.65.236-250>
- [14] Роздорожнюк О. Я. Впровадження енергоефективних технологій у комплексній реновації зруйнованих війною в Україні населених пунктів. In VII International Scientific and Practical Conference «Science of post-industrial society: globalization and transformation processes». 2024. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.05.07.2024.056>
- [15] Рябцева П. Р., Тютіна Л. В. Аспекти рециклінгу відходів демонтажу будівель у формуванні захисних комплексів. *Архітектура історичного Києва. Актуальні перспективи відбудови. Київський національний університет будівництва і архітектури*. 2025. С. 607. URL: https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/01/2025/73_2025.pdf
- [16] Сердюк В. Циркулярна економіка: українські реалії та перспективи впровадження в будівельній галузі. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2023. Т. 34. С. 156–164. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-1-156-164>
- [17] Фісуненко П., Герасимов О. Напрями зменшення ризиків воєнного екоциду за допомогою рециклінгу будівельних відходів в девелопменті нерухомості. *Економіка та суспільство*. 2022. № 45. С. 2–4. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-45-41>
- [18] Центр економічної стратегії. Economy during the war tracker. URL: <https://ces.org.ua/tracker-economy-during-the-war/> (дата звернення: 06.03.2026).
- [19] Ефективне управління відходами – Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. *Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України – офіційний сайт*. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/reformy/efektyvne-upravlinnya-vidhodamy/> (дата звернення: 01.03.2026).
- [20] Davydova., Boborykin O., Hniloskurenko M., Cherniavskiy V., Tiutina, L. Formation of the principles of tectonics of modern architectural forms. *Architectural Studies*. 2024. Т. 10, № 2. P. 136–148. DOI: <https://doi.org/10.56318/as/2.2024.136>
- [21] European Commission. Circular economy: New rules will make EU the global front-runner in waste management and recycling. *Press release*. URL: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-3846_en.htm (date of access: 06.03.2026).
- [22] Etxeberria M., Marí A. R., Vázquez E. Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and Structures*. 2006. Vol. 40, no. 5. P. 529–541. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9161-5>

[23] Home - Energy Charter. URL: <https://www.energycharter.org/> (date of access: 12.03.2026).

[24] Huynh T.P., Nguyen T.D., Ngo S.H., Vo D.H. An experimental study on properties of high-performance concrete using recycled aggregates. *Journal of Science and Technology*. 2017. Vol. 12, no. 121. P. 19–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-89838-6.00015-3>

[25] *Kyiv School of Economics*. Прямі збитки, нанесені інфраструктурі України в ході війни, складають майже \$63 млрд. Загальні втрати економіки \$543-600 млрд. *Russia Will Pay*. URL: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/zbitki-naneseni-infrastrukturukrayini-v-hodi-viyni-skladayut-mayzhe-63-mlrd> (дата звернення: 05.03.2026).

[26] *Kyiv School of Economics*. Звіт про прямі збитки інфраструктури та непрямі втрати економіки від руйнувань внаслідок агресії РФ. *Russia Will Pay*. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24_Damages_Report.pdf (дата звернення: 02.03.2026).

[27] Richardson, A. E., Coventry, K., Graham, S. Concrete manufacture with un-graded recycled aggregates. *Structural Survey*. 2009. Vol. 27. P. 62–70. DOI: <https://doi.org/10.1108/02630800910941692>

[28] P. D. Smith. Blast walls for structural protection against high explosive threats: A review. *International Journal of Protective Structures*. 2010, Vol. 1(1), P. 67–84. DOI: <https://doi.org/10.1260/2041-4196.1.1.67>

REFERENCES

[1] Закон України Про ратифікації Договору до Енергетичної Хартії та Протоколу до Енергетичної Хартії з питань енергетичної ефективності і суміжних екологічних аспектів [Law of Ukraine on the ratification of the Energy Charter Treaty and the Protocol on Energy Efficiency and Related Environmental Aspects]. (1998, February 6). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/89/98-вр#Text> [in Ukrainian]

[2] Закон України Про управління відходami [Law of Ukraine on Waste Management]. (2022, June 20). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text> [in Ukrainian]

[3] Киотський протокол до Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату [Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change]. (1997, December 11). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_801#Text [in Ukrainian]

[4] Постанова Кабінету Міністрів України Про затвердження Порядку поводження з відходами, що утворилися у зв'язку з пошкодженнями (руйнуваннями) будівель та споруд внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсії або проведення робіт з ліквідації їх наслідків та внесення змін до деяких постанов Кабінету Міністрів України [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine on approval of the procedure for management of waste generated as a result of damage (destruction) of buildings and structures caused by hostilities, terrorist acts, sabotage, or emergency response works, and amendments to certain resolutions of the Cabinet of Ministers of Ukraine]. (2022, September 27). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1073-2022-н#Text> [in Ukrainian]

[5] Azizov, T. N., Lyulchenko, V. H., & Orlova, O. M. (2024). Shvydkosporudzhuvana zakhysna

sporuda tsyvilnoho zakhystu [A prefabricated civil defense structure]. *Environmental Safety and Natural Resources*, 50(2), 78–87. DOI: <https://doi.org/10.36059/978-966-397-484-2-42> [in Ukrainian]

[6] Havrys, A. P., Yakovchuk, R. S., Starodub, Yu. P., & Tur, N. Yu. (2023). Upravlinnia ryzykamy vynykennia nadzvychainykh sytuatsii, poviazanykh iz zatoplenniam terytorii na rivni obiednanykh terytorialnykh hromad [Risk management of emergencies situations related to the flooding of territories at the level of united territorial communities]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1(15), 101–109. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvz.2023.1\(15\).101-109](https://doi.org/10.33269/nvz.2023.1(15).101-109) [in Ukrainian].

[7] Husiev, V. O., Smyrnov, A. S., & Nikiforova, T. D. (2022). Vykorystannia betonnykh sumishei na osnovi produktiv retsyklinhu budivelnnykh vidkhodiv dlia zvedennia budivel metodom 3D-druku [Use of concrete mixtures based on recycled construction waste for 3D printing]. In *Peremozhemo-vidbuduiemo!: Proceedings of the All-Ukrainian scientific and practical forum* (pp. 40–42). Dnipro URL: <https://pgasa.dp.ua/wp-content/uploads/2023/06/Zbirnyk-tez-Peremozhemo-vidbuduyemo.pdf> [in Ukrainian].

[8] Davydov, A. M., & Tiutina, L. V. (2021). Typolohiia novitnykh fasadnykh system ta yii vplyv na plastychnu movu arkhitektury XXI st. [Typology of modern facade systems and its influence on architectural plastic language]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury*, (1), 102–108. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ujba_2021_1_15 [in Ukrainian].

[9] Yeliseieva, M. O., & Khodus, M. V. (2025). Porivniannia normatyvnoi bazy Yevropeiskoho Soiuzu ta Ukrainy v pytanni upravlinnia ta retsyklinhu budivelnnykh vidkhodiv [Comparison of EU and Ukraine regulatory frameworks in construction waste management]. In *Innovatsiini tekhnologii pidhotovky kadriv dlia promyslovosti ta transportu 2025: Proceedings of the international conference*. Dnipro: NTU «DP». URL: <https://ir.nmu.org.ua/entities/publication/6208c2ac-00a3-48a9-b2dd-bb51b8acefcb>. [in Ukrainian].

[10] Lir, V. (2016). Enerhetychna polityka staloho rozvytku yak vektor intehratsii Ukraina–YeS [Energy policy of sustainable development as a vector of Ukraine–EU integration]. *Naukovyi visnyk*, 4(236), 158–177. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nv_2016_4_15 [in Ukrainian].

[11] Novik, H. V., Gnatiuk, L. R., & Vizir, A. S. (2022). Praktychnist modulnoho budivnytstva: dosvid mynuloho ta perspektyvy [Practicality of modular construction: past experience and prospects]. *Theory and Practice of Design*, (25), 76–84. DOI: <https://doi.org/10.18372/2415-8151.25.16783> [in Ukrainian].

[12] Nonik, L. Yu., Patseva, I. H., & Pichkur, T. V. (2023). Rozroblennia stratehii upravlinnia vidkhodami ruinat sii v umovakh voiennoho stanu [Development of a strategy for managing demolition waste under martial law]. *Ekolohichna bezpeka ta tekhnologii zakhystu dovkillia*, 4, 40–47. URI: <http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/8292> [in Ukrainian].

[13] Oliinyk, O. P., & Tokar, M. M. (2023). Pryntsyipy staloho rozvytku v tsestrakh simeinoho dozvillia [Principles of sustainable development in family leisure centers]. *Suchasni problemy arkhitektury*

ta *mistobuduvannia*, 65, 236–250. DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.65.236-250> [in Ukrainian].

[14] Rozdorozhniuk, O. Ya. (2024). Vprovadzhennia enerhoefektyvnykh tekhnolohii u kompleksnii renovatsii zruinovanykh viinoiu v Ukraini naselenykh punktiv [Implementation of energy-efficient technologies in the renovation of war-damaged settlements in Ukraine]. In *Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference "Science of post-industrial society: globalization and transformation processes"*. Kyiv. 2024. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.05.07.2024.056> [in Ukrainian].

[15] Riabtseva, P. R., & Tiutina, L. V. (2025). Aspekty retskyklinhu vidkhodiv demontazhu budivel u formuvanni zakhysnykh kompleksiv [Aspects of recycling demolition waste in the formation of protective complexes]. In *Arkhitektura istorychnoho Kyieva. Aktualni perspektyvy vidbudovy* (p. 607). Kyiv: «KNUBA». URL: https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/01/2025/73_2025.pdf [in Ukrainian].

[16] Serdiuk, V. (2023). Tsyrukliarna ekonomika: ukraïnski realii ta perspektyvy vprovadzhennia v budivelnni haluzi [Circular economy in construction sector]. *Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruktsii v budivnytstvi*, 34, 156–164. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-1-156-164> [in Ukrainian].

[17] Fisunenکو, P., & Herasymov, O. (2022). Napriamy zmnshennia ryzykiv voïennoho ekotsydu za dopomohoiu retskyklinhu budivelnykh vidkhodiv v developmenti nerukhomosti [Ways to reduce the risks of wartime ecocide through recycling of construction waste in real estate development]. *Ekonomika ta suspilstvo*, (45), 2–4. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-45-41> [in Ukrainian].

[18] Centre for Economic Strategy. (n.d.). Economy during the war tracker. URL: <https://ces.org.ua/tracker-economy-during-the-war/> [in Ukrainian].

[19] Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy. (n.d.). Efektyvne upravlinnia vidkhodamy [Efficient waste management]. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/reformy/efektyvne-upravlinnya-vidhodamy/>

(дата звернення: 01.03.2026). [in Ukrainian].

[20] Davydov, A., Boborykin, O., Hniloskurenko, M., Cherniavskiy, V., & Tiutina, L. (2024). Formation of the principles of tectonics of modern architectural forms. *Architectural Studies*, 10(2), 136–148. DOI: <https://doi.org/10.56318/as/2.2024.136>

[21] European Commission. (n.d.). Circular economy: New rules will make EU the global front-runner in waste management and recycling. URL: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-3846_en.htm (date of access: 06.03.2026).

[22] Etxeberria, M., Marí, A. R., & Vázquez, E. (2006). Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and Structures*, 40(5), 529–541. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9161-5>

[23] Home - Energy Charter. URL: <https://www.energycharter.org/> (date of access: 12.03.2026).

[24] Huynh, T. P., Nguyen, T. D., Ngo, S. H., & Vo, D. H. (2017). An experimental study on properties of high-performance concrete using recycled aggregates. *Journal of Science and Technology*, 12(121), 19–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-89838-6.00015-3>

[25] Kyiv School of Economics. (n.d.). Direct damages to Ukraine's infrastructure due to the war amount to nearly \$63 billion; total economic losses \$543–600 billion. *Russia Will Pay*. URL: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/zbitki-naneseni-infrastrukturi-ukrayini-v-hodi-viyni-skladayut-mayzhe-63-mlrd> (дата звернення: 05.03.2026).

[26] Kyiv School of Economics. (n.d.). Report on direct infrastructure damages and indirect economic losses caused by Russian aggression. *Russia Will Pay*. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24_Damages_Report.pdf (дата звернення: 02.03.2026).

[27] Richardson, A. E., Coventry, K., & Graham, S. (2009). Concrete manufacture with un-graded recycled aggregates. *Structural Survey*, 27, 62–70. DOI: <https://doi.org/10.1108/02630800910941692>

[28] Smith, P. D. (2010). Blast walls for structural protection against high explosive threats: A review. *International Journal of Protective Structures*, 1(1), 67–84. DOI: <https://doi.org/10.1260/2041-4196.1.1.67>

ABSTRACT

Riabtseva P., Razenkova A., Sediakina L. Recycling of construction waste in the construction of protective structures

Purpose. The paper highlights the potential of recycling demolition waste as a strategic resource for the production of rapidly deployable modular protective structures intended for civil protection and shelter systems. The aim of the study is to assess the effectiveness of such modular systems made from secondary materials and to determine the prospects for implementing the principles of the circular economy and additive technologies (3D printing) in the development of national protective infrastructure.

Methodology. The research is based on an integrated approach combining theoretical analysis and structural modeling. The following methods were applied: comparative analysis to evaluate the composition of construction waste (concrete, brick, metal) and its suitability as infill material in protective structures; a systems approach, which considers the recycling process as a sequence of demining, sorting, crushing, and fractionation of materials; structural modeling, which substantiates the

"frame-infill" concept, where crushed concrete absorbs part of the blast wave energy; and a generalization method, which developed recommendations for the placement of rapidly deployable structures based on the experience of Ukrainian cities (Kharkiv, Zaporizhzhia, Odesa) and the provisions of the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1073.

Results. The study demonstrates that recycling demolition waste is an effective strategic resource for the creation of rapidly deployable protective structures in areas with elevated military risk. The use of "frame-infill" systems with recycled concrete aggregate reduces environmental impact from construction waste accumulation, decreases the consumption of natural aggregates, and enables the rapid deployment of shelters without the use of heavy machinery.

Scientific novelty. An improved approach to the design of mobile protective structures using "frame-infill" systems has been developed, in which recycled construction materials (crushed concrete or brick) are used as the primary infill for absorbing blast wave energy. The effectiveness of crushed materials in dissipating impact energy has been demonstrated, and the use of mobile recycling units for on-site processing of debris has been substantiated. For the first time, a combination of fine fractions of recycled materials with additive technologies (3D printing) is proposed for the creation of rapidly deployable protective structures of complex geometry.

Practical relevance. The results of the study can be applied in the design of mobile civil shelters, temporary barriers, and recovery operations in areas affected by destruction. The implementation of circular construction principles contributes to territorial recovery and enhances community safety.

Keywords: recycling, demolition waste, energy efficiency, construction debris, circular economy, protective structures, modular systems, crane-free assembly, rapidly deployable shelters.

AUTHOR'S NOTE:

Riabtseva Polina, bachelor's degree student (fourth year), National Academy of Fine Arts and Architecture, Kyiv, Ukraine, e-mail: polina.riabtseva@naoma.edu.ua, orcid: 0009-0001-4985-1960.

Razenkova Anastasiia, bachelor's degree student (fourth year), National Academy of Fine Arts and Architecture, Kyiv, Ukraine, e-mail: anastasiia.razenkova@naoma.edu.ua, orcid: 0009-0002-3155-1617.

Sediakina Liubov, PhD in Architecture, Senior Lecturer at the Department of Architectural Structures, National Academy of Fine Arts and Architecture, Kyiv, Ukraine, e-mail: liubov.tiutina@naoma.edu.ua, orcid: 0000-0002-8485-1878.

Дата першого надходження статті до видання: 31.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії
відкритого доступу CC BY 4.0

