

АЛГОРИТМ ПІСЛЯВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Шашенко О. М., Гапєєв С. М., Хозяйкіна Н. В.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»,
м. Дніпро, Україна

Анотація. Розглянуто сучасні підходи до відновлення об'єктів критичної інфраструктури після воєнних руйнувань в Україні. Обґрунтовано інтегрований алгоритм прийняття рішень, що містить оцінювання рівня пошкоджень, сценарний інженерний аналіз, визначення життєвого циклу, аналіз витрат і вигід та соціально-інституційну валідацію.

Ключові слова: інтегрований алгоритм, життєвий цикл, аналіз пошкоджень, відновлення інфраструктури, воєнні руйнування, валідація.

Вступ

Повномасштабні воєнні дії на території України призвели до безпрецедентних за масштабами та типом руйнувань об'єктів критичної інфраструктури, зокрема житлового фонду, транспортних споруд, енергетичних систем, об'єктів водопостачання, зв'язку та соціальної інфраструктури. За оцінками міжнародних і національних інституцій, сумарні прямі збитки та потреби у відновленні вимірюються сотнями мільярдів доларів, що потребує системного підходу до реконструкції територій та інфраструктурних систем [1–4].

Аналіз публікацій

У звітах третього експрес-аналізу збитків і потреб (Third Rapid Damage and Needs Assessment – RDNA3), підготовлених за участю Світового банку, ООН та Європейського Союзу, визначено, що руйнування охоплюють майже всі сектори критичної інфраструктури. Водночас темпи збільшення потреб у фінансуванні відновлення випереджають можливості бюджетного та донорського забезпечення. Завдана шкода в млрд дол. США за підходами RDNA в 2022–2025 за різними секторами критичної інфраструктури наведена на рис. 1 [1, 3].



Рис. 1. Фінансові збитки за різними секторами критичної інфраструктури за підходами RDNA (вимірюються у млрд дол. США) [1]

Таблиця 1 – Структура потреб відновлення за секторами (RNDA2 та RNDA3) у млрд дол. США [1, 3]

№	Сектор	RNDA2	RNDA3
1	Житлове будівництво	52	58
2	Освіта	3	5
3	Охорона здоров'я	1	2
4	Соціальний захист	0	0
5	Культура й туризм	1	4
6	Енергетика та видобувна галузь	10	10
7	Транспорт	35	33
8	Телекомунікації та цифрова інфраструктура	1	2
9	Водопостачання та санітарія	1	3
10	Розмінування та вибухонебезпечні залишки війни	3	1
11	Сільське господарство	8	9
12	Торгівля та промисловість	12	18
13	Іригація та управління водними ресурсами	1	1
14	Фінанси та банківський сектор	0	0
15	Довкілля та лісове господарство	1	3
16	Надзвичайне реагування та цивільний захист	0	0
17	Міське самоврядування та муніципальні послуги	0	0
18	Публічне управління	0	0

Примітка: Завдана шкода за RDNA2 охоплює період з 24 лютого 2022 року до 24 лютого 2023 року; завдана шкода за RDNA3 охоплює період з 24 лютого 2022 року до 31 грудня 2023 року

Еволюція аналізу збитків і потреб відновлення України за підходами RDNA [1, 3] наведена в табл. 1.

Особливої гостроти проблема набуває в 2024–2026 роках, коли одночасно необхідно вирішувати завдання аварійного відновлення, забезпечення базових послуг для населення та формування довгострокових програм сталого розвитку [3].

Мета та постановка задачі

Метою дослідження є обґрунтування структури інтегрованого алгоритму відновлення об'єктів критичної інфраструктури та доцільності поєднання дистанційних методів аналізу пошкоджень із польовими інженерними обстеженнями та локальним калібруванням моделей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: проаналізувати сучасні підходи до аналізу пошкоджень і відновлення об'єктів критичної інфраструктури в умовах післявоєнної реконструкції; визначити можливості інтеграції дистанційних методів моніторингу (супутникові дані, БПЛА, фотограмметрія) з результатами польових інженерних обстежень; розробити структуру інтегрованого алгоритму аналізу технічного стану та планування відновлювальних заходів; обґрунтувати доцільність застосування інтегрованого підходу з урахуванням принципів сталого розвитку та визначення життєвого циклу інфраструктур-

них об'єктів. Формування інтегрованого міждисциплінарного підходу поєднає оперативність післявоєнної реконструкції з принципами сталого розвитку та аналізом життєвого циклу об'єктів.

Основна частина

Ключовою особливістю сучасного етапу відбудови є необхідність поєднання швидкості реалізації відновлювальних заходів із забезпеченням довготривалої функціональної, енергетичної та соціальної стійкості об'єктів. Практика попередніх постконфліктних реконструкцій у різних країнах доводить, що орієнтація лише на швидке відновлення без урахування життєвого циклу будівель і споруд, локальних кліматичних умов і соціального контексту часто призводить до повторних втрат, неефективного використання ресурсів і зниження рівня довіри з боку громад [4–6].

Аналіз оновлених матеріалів RDNA4, підготовлених урядом України [3], свідчить про збільшення частки пошкоджень у секторах енергетики, житлового будівництва та транспортної інфраструктури, а також про збільшення витрат, пов'язаних із розчищенням завалів, тимчасовими рішеннями та аварійними ремонтами.

Водночас у більшості програм відновлення досі домінує фрагментарний підхід, за якого інженерні, економічні, екологічні та соціальні аспекти розглядаються окремо,

тобто без інтеграції в єдину методологічну систему [5, 7–9].

Окремою проблемою є визначення ступеня пошкодження об'єктів і пріоритетів реконструкції. Традиційні методи інженерного обстеження, хоча й забезпечують високу точність, є ресурсомісткими та обмеженими за масштабом застосування [8, 9]. У відповідь на це останнім часом активно розвиваються дистанційні методи аналізу пошкоджень на основі супутникової інформації та оптичних знімків, які дозволяють оперативно охоплювати значні території. Проте без адаптації цих методик до локальних умов і без поєднання з польовою валідацією їх застосування може призводити до суттєвих похибок у прийнятті управлінських рішень [10, 11].

У міжнародних методичних документах, зокрема в Рамковій програмі сталого розвитку України [5], наголошується на необхідності переходу від логіки «швидкого ремонту» до комплексного відновлення зруйнованих об'єктів за концепцією «відбудувати краще за те, що було» (Build Back Better). Такий підхід передбачає інтеграцію вимог енергоефективності, кліматичної стійкості та соціальної залученості на всіх етапах реконструкції.

Концепція Build Back Better (далі – концепція BBB) передбачає не лише відтворення втрачених об'єктів, а й їх модернізацію відповідно до сучасних вимог безпеки, енергоефективності та сталого розвитку.

Однак практична реалізація цих принципів у масштабах національної програми відновлення потребує формалізованих інструментів, зрозумілих для інженерів, планувальників і органів влади. Таким чином, на сьогодні сформувалася науково-практична проблема, яка полягає у відсутності інтегрованих підходів до відновлення об'єктів критичної інфраструктури, що одночасно забезпечували б оперативний аналіз пошкоджень, обґрунтовану просторово-секторальну пріоритизацію, урахування життєвого циклу об'єктів, соціальну та інституційну стійкість результатів реконструкції.

Інтегрований підхід до відновлення та реконструкції об'єктів критичної інфраструктури України після воєнних руйнувань поєднує швидкість реалізації відновлювальних заходів із принципами сталого розвитку.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:

- ✓ здійснення огляду сучасних міжнародних і національних підходів до аналізу пошкоджень і потреб відновлення;

- ✓ аналіз можливості й обмеження дистанційних та інженерних методів обстеження;

- ✓ узагальнення принципів сталого відновлення щодо визначення життєвого циклу (life-cycle assessment) та аналізу, заснованому на «вигоді від витрат» (cost-benefit);

- ✓ визначення інтегрованого алгоритму реконструкції об'єктів критичної інфраструктури;

- ✓ визначення наукової новизни та практичної цінності запропонованого підходу.

Після початку повномасштабних воєнних дій в Україні головним інструментом кількісного аналізу збитків і потреб відновлення стала методологія «Швидкий аналіз збитків і потреб» – Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA), що реалізується в партнерстві з міжнародними фінансовими організаціями, установами системи ООН та органами державної влади України. Починаючи з перших етапів синтетичного аналізу 2022–2023 років і завершуючи комплексними звітами RDNA3 та RDNA4, цей підхід забезпечив формування єдиної аналітичної рамки для прийняття рішень у сфері відновлення.

Методологічно RDNA ґрунтується на поєднанні макроекономічного аналізу, секторального аналізу та просторового узагальнення інформації щодо прямих фізичних пошкоджень і непрямих економічних втрат [1–4]. Основна перевага такого підходу полягає в можливості швидкого отримання агрегованих показників, необхідних для бюджетного планування, міжнародної координації та залучення донорського фінансування.

Крім того, сама логіка RDNA передбачає певний рівень узагальнення, що неминуче обмежує глибину інженерного аналізу окремих об'єктів [4, 8, 9]. Зокрема в більшості випадків визначення рівня пошкоджень здійснюється за типологіями будівель і споруд, без детального врахування їхніх конструктивних особливостей, фактичного технічного стану та залишкового ресурсу.

Звіти RDNA3 і подальші оновлення демонструють чітку секторальну диференціацію потреб відновлення [1–3]. Найбільша частка збитків і потреб стабільно припадає на житловий фонд, транспортну інфраструктуру, енергетичні системи, об'єкти водопостачання та водовідведення.

Водночас у RDNA4 простежується тенденція до збільшення частки енергетичної інфраструктури в загальній структурі потреб через системні удари по об'єктах генерації і передачі енергії наприкінці 2025 та на початку 2026 років [2, 3].

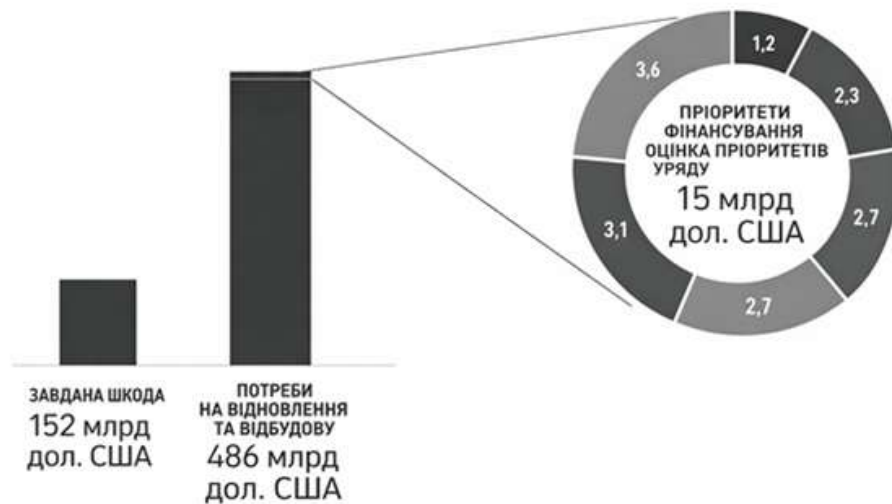


Рис. 2. Узагальнена схема «просторово-секторальної пріоритизації» у програмах відновлення (на основі логіки RDNA) [1–3]. Примітка: вартість у млрд дол. США за секторами: 1, 2 – міжсекторальні; 2, 3 – транспорт; 2, 4 – соціальна інфраструктура та послуги; 2, 7 – енергетика; 3, 1 – житлово-комунальні послуги; 3, 6 – промисловість і послуги

Це зумовлює необхідність перегляду підходів до пріоритизації проектів і переходу від реактивного відновлення до стратегічного планування з урахуванням енергетичної безпеки.

Просторовий аналіз, поданий у звітах, демонструє значну нерівномірність руйнувань між регіонами [1–3]. Він наведений на рис. 2. Найбільш постраждалі області визначаються одночасним руйнуванням житлових, транспортних і соціальних об'єктів, що створює мультиплікативний ефект негативного впливу на економічну активність і демографічну стабільність територій. За таких умов просте ранжування проектів за вартістю або ступенем фізичного пошкодження є недостатнім.

Попри беззаперечну практичну цінність RDNA, аналіз його застосування містить низку системних обмежень, що мають принципове значення для подальшого розвитку методології відновлення:

по-перше, у більшості оцінок недостатньо враховується життєвий цикл об'єктів інфраструктури [6, 9]. Вибір між ремонтом, посиленням або повною реконструкцією об'єкта часто здійснюється без формалізованого аналізу життєвого циклу, що може призводити до нераціонального використання ресурсів у середньо- та довгостроковій перспективі;

по-друге, секторальний аналіз у переважній більшості здійснюється ізольовано, тобто без урахування міжсекторальних залежностей [1–3]. Наприклад, відновлення житлово-

го фонду без синхронного відновлення енергетичної та транспортної інфраструктури обмежує ефективність інвестицій і затримує повернення населення;

по-третє, під час реалізації програм відновлення досі обмежено використовуються інструменти соціальної валідації проектів [5, 7]. Недостатня залученість місцевих громад до процесу прийняття рішень знижує соціальну прийнятність реалізованих рішень і створює ризики повторного пошкодження або функціональної деградації об'єктів.

Відповідно до зазначених викликів у міжнародних документах з реконструкції дедалі більшого значення набуває концепція сталого відновлення, яка передбачає інтеграцію технічних, економічних, екологічних і соціальних аспектів у межах єдиної методологічної рамки. У рекомендаціях, розроблених під егідою програм розвитку ООН та підтриманих міжнародними фінансовими інституціями, наголошується на необхідності переходу від фрагментарних рішень до системного управління портфелем проектів відновлення [5, 6].

Особливу увагу приділено «концепції ВВВ», яка передбачає не лише відновлення втрачених функцій, але й підвищення стійкості об'єктів до майбутніх воєнних і кліматичних загроз. Реалізація цього принципу потребує розроблення формалізованих інструментів аналізу альтернативних сценаріїв реконструкції, що виходить за межі класичних інженерних розрахунків.

Таким чином, аналіз сучасних підходів до оцінки пошкоджень і потреб відновлення дозволяє дійти висновку, що методологія RDNA є необхідною, але недостатньою умовою для формування ефективної стратегії реконструкції критичної інфраструктури. Її подальший розвиток потребує доповнення інструментами інженерного аналізу, визначення життєвого циклу та соціально орієнтованого планування, що й зумовлює необхідність розроблення інтегрованих алгоритмів відновлення.

Інженерне обстеження будівель і споруд традиційно залишається основним джерелом достовірної інформації про їхній фактичний технічний стан. У післявоєнних умовах саме результати натурних оглядів дозволяють визначити тип пошкоджень несних конструкцій, ступінь втрати несної здатності, можливість подальшої експлуатації або доцільність демонтажу [8, 9].

Крім того, застосування класичних методів технічної експертизи в умовах масових руйнувань стикається з низкою обмежень: значна кількість пошкоджених об'єктів, обмежені людські та часові ресурси, небезпека доступу до окремих територій, необхідність швидкого прийняття управлінських рішень.

Таким чином, виникає потреба в методах попереднього масштабного аналізу пошкоджень, які можуть забезпечити загальний обсяг руйнувань і бути основою для пріоритетизації детальних інженерних обстежень.

З огляду на зазначені виклики протягом останніх років активно розвиваються методи аналізу пошкоджень будівель і інфраструктури на основі інформації, отриманої у процесі дистанційного зондування Землі [13–15], зокрема на основі супутникових даних радіолокаційного та оптичного типу, що дозволяють здійснювати регулярний моніторинг великих територій незалежно від доступності наземних спостережень [10, 11].

Практичне застосування інформації, що надається в межах програм спостереження за Землею Європейським космічним агентством, довело її високу ефективність для виявлення змін у забудові, визначення ступеня руйнування та класифікації пошкоджених об'єктів. Супутникові дані є особливо цінними завдяки незалежності від погодних умов і часу доби, що критично важливо в умовах активних бойових дій.

У наукових дослідженнях 2022–2024 років продемонстровано можливість автоматизованої класифікації пошкоджень із використанням методів машинного навчання та се-

мантичної сегментації зображень [10, 11]. Такі підходи дозволяють у короткі терміни формувати карти пошкоджень для цілих регіонів і використовувати їх для стратегічного планування відновлення.

Попри значний потенціал, дистанційні методи аналізу пошкоджень мають принципові обмеження, які не дозволяють розглядати їх як самодостатній інструмент прийняття інженерних рішень. Основні проблеми пов'язані з обмеженою здатністю дистанційної інформації відображати внутрішні пошкодження конструкцій, труднощами розрізнення часткових і критичних пошкоджень, залежністю точності класифікації від локальних умов забудови та типів конструкцій [10, 8].

Досвід застосування таких методів в Україні доводить, що без локальної калібровки моделей і без систематичної польової валідації результати автоматизованого аналізу можуть суттєво спотворювати реальний технічний стан об'єктів [10, 12]. Це важливо для об'єктів критичної інфраструктури, де помилка в оцінці може призвести до серйозних техногенних та соціальних наслідків.

Таким чином, дистанційне зондування доцільно розглядати не як альтернативу, а як доповнення до інженерної експертизи, що забезпечує первинну фільтрацію об'єктів і оптимізацію ресурсів на етапі детального обстеження.

Найбільш перспективним напрямом розвитку методів аналізу пошкоджень є інтеграція дистанційних даних із результатами польових інженерних оглядів у межах єдиної інформаційної системи (рис. 3) [10, 11, 8].

Такий підхід дозволяє оперативно ідентифікувати зони з найбільшим рівнем руйнувань, визначити черговість проведення детальних експертиз, підвищувати точність автоматизованих моделей завдяки регулярній валідації.

У цьому контексті важливого значення набуває створення **національних** алгоритмів аналізу пошкоджень, адаптованих до українських містобудівних, кліматичних і конструктивних особливостей. Адаптація міжнародних методик до локального контексту дозволяє істотно підвищити надійність результатів і зробити їх придатними для використання в державних програмах відновлення.

Поєднання дистанційних і інженерних методів створює передумови для переходу від фрагментарного аналізу пошкоджень до системного управління процесом реконструкції будівель і споруд.



Рис. 3. Інтегрований алгоритм аналізу пошкоджень із поєднанням дистанційних даних і польової валідації [10, 11, 8]

Саме на цьому етапі формується інформаційна база, яка дозволяє не лише визначити масштаби руйнувань, але й обґрунтувати вибір між альтернативними сценаріями відновлення – ремонтом, посиленням або повною реконструкцією об'єктів.

Отримана інформація стає основою для подальшого застосування інструментів аналізу життєвого циклу й економічної оптимізації, що є критично важливим для забезпечення довготривалої ефективності інвестицій у відновлення критичної інфраструктури.

Післявоєнна реконструкція критичної інфраструктури вимагає переходу від традиційних підходів аварійного ремонту до системного управління життєвим циклом об'єктів. У міжнародній практиці цей перехід пов'язується із впровадженням концепції сталого відновлення, яка передбачає збалансування технічних, економічних, екологічних і соціальних факторів на всіх етапах реалізації проєктів [5, 6].

У методичних документах, розроблених у межах програм розвитку ООН та міжнародних фінансових інституцій, сталий підхід розглядається як ключова умова зниження довгострокових ризиків і забезпечення ефективності інвестицій у відновлення. Зокрема у «Сталому алгоритмі відбудови для України», підготовленому UNDP, наголошується на необхідності інтеграції швидких відновлю-

вальних заходів із довгостроковою метою енергоефективності, кліматичної адаптації та соціальної стійкості. У контексті України ця проблема набуває особливої актуальності, оскільки масштаби руйнувань змушують одночасно реалізовувати тисячі проєктів різного рівня складності, що створює ризик формування «ілюзорної відбудови», тобто формального відновлення функцій без забезпечення їхньої довготривалої надійності [5, 7–9].

Визначення життєвого циклу – Life-cycle assessment (LCA) – є одним із ключових інструментів сталого проєктування та реконструкції, який дозволяє оцінювати сумарний вплив об'єкта протягом усього життєвого циклу: від виробництва будівельних матеріалів до експлуатації та утилізації. У післявоєнній реконструкції застосування LCA набуває особливого значення в процесі вибору між альтернативними сценаріями: ремонтом, посиленням або повною заміною конструкцій.

Наукові дослідження останніх років демонструють, що рішення, прийняті лише на основі початкових капітальних витрат, часто є неефективними в середньо- та довгостроковій перспективі. Зокрема в роботах, де досліджувався аналіз сталості постконфліктних програм реконструкції, зазначено, що додаткові інвестиції на етапі відновлення можуть суттєво зменшувати експлуатаційні витрати й екологічне навантаження протягом життєвого циклу об'єкта.

Для об'єктів критичної інфраструктури LCA дозволяє кількісно порівнювати альтернативні проєктні рішення, враховувати витрати на експлуатацію й обслуговування, оцінювати вплив на довкілля та енергоспоживання, обґрунтовувати доцільність застосування інноваційних конструктивних і технологічних рішень [6, 9].

Крім LCA важливу функцію у прийнятті рішень здійснює аналіз витрат і вигід, або cost-benefit аналіз [6], який дозволяє зіставляти витрати на реалізацію проєктів із очікуваними соціально-економічними вигодами. У масштабних програмах відновлення критичної інфраструктури цей інструмент є особливо важливим для пріоритизації проєктів за умов обмежених фінансових ресурсів.

У процесі післявоєнної реконструкції вигоди від реалізації проєктів часто є нематеріальними або відкладеного типу: підвищення рівня безпеки населення, зменшення соціальної напруги; стимулювання економічної

активності регіонів, збільшення рівня довіри до інституцій [1, 3, 7].

Інтеграція cost-benefit-аналізу з результатами LCA дозволяє формувати більш обґрунтовані рішення, які враховують не лише економічні показники, але й соціальні й екологічні ефекти реконструкції.

Концепція BBB та її інженерна інтерпретація [5, 6] у післявоєнній реконструкції означає відмову від механічного відтворення зруйнованих об'єктів у їхньому попередньому вигляді. З інженерної точки зору це передбачає підвищення конструктивної надійності та сейсмічної/вибухової стійкості, модернізацію інженерних систем, впровадження енергоефективних і ресурсозберігальних рішень, адаптацію об'єктів до змінених умов експлуатації.

Крім того, практична реалізація концепції відбудови «краще за те, що було», або build back better (BBB), часто стикається з обмеженнями через дефіцит часу, фінансів і кваліфікованих кадрів. У таких умовах особливо важливою є наявність формалізованих критеріїв, які дозволяють обґрунтувати, у яких випадках доцільно застосовувати поглиблену реконструкцію, а де лише обмежитися мінімально необхідними відновлювальними заходами.

Сталий підхід до реконструкції не може бути зведений лише до техніко-економічних аспектів. Досвід відновлення післявоєнних конфліктів доводить, що ігнорування соціальних і культурних факторів значно знижує довгострокову ефективність проєктів.

Особливої уваги потребують об'єкти культурної спадщини й ідентичності громад [16]. У міжнародних рекомендаціях зазначається, що відновлення таких об'єктів має розглядатися не лише як інженерне завдання, але і як інструмент соціальної стабілізації та відновлення довіри [17, 18].

Тобто застосування інструментів life-cycle assessment-, cost-benefit-аналізу та принципів build-back better створює методологічну основу для переходу від фрагментарної реконструкції до системного управління відновленням критичної інфраструктури. Крім того, ефективно впровадження цих підходів можливе лише за умови їх інтеграції з результатами аналізу пошкоджень і механізмами просторово-секторальної пріоритизації, що зумовлює необхідність розроблення єдиного інтегрованого алгоритму.

Масштаб і складність завдань післявоєнного відновлення критичної інфраструктури

зумовлюють необхідність багаторівневої інституційної координації між центральними органами влади, органами місцевого самоврядування, міжнародними фінансовими інституціями та донорськими організаціями. У цьому контексті звіти RDNA розглядаються не лише як інструмент визначення рівня збитків, але і як основа для формування спільної мови між усіма учасниками процесу відновлення [1–3, 5].

Крім того, процес реалізації відновлювальних програм демонструє, що відсутність чітко формалізованих процедур пріоритизації та відбору проєктів призводить до фрагментації зусиль і зниження загальної ефективності використання ресурсів. Зокрема це проявляється на регіональному та муніципальному рівнях, де рішення часто приймаються під тиском короткострокових соціальних очікувань.

Однією з ключових проблем масштабних програм реконструкції є ризик нецільового або неефективного використання фінансових ресурсів. У звітах аналітичних центрів і громадських організацій, зокрема в матеріалах Центру економічного розвитку (Center for Economic Strategy), зазначається, що навіть за наявності значного міжнародного фінансування відсутність прозорих механізмів моніторингу може суттєво знизити реальний ефект від відновлювальних інвестицій.

Аналітика громадського контролю свідчить, що найбільші ризики виникають на етапах формування переліків пріоритетних проєктів, вибору технічних рішень без належного обґрунтування, реалізації проєктів у стислі терміни без повного циклу експертизи.

У цьому контексті інтеграція інженерних, економічних і соціальних критеріїв у процес прийняття рішень розглядається як один із ключових інструментів зниження корупційних ризиків і підвищення довіри до програм відновлення.

Досвід післяконфліктної реконструкції у різних країнах переконливо доводить, що залучення місцевих громад до процесу планування та реалізації відновлювальних проєктів є важливим чинником їхньої довготривалої стійкості.

Підходи партисипативного дизайну, або participatory design, дозволяють враховувати реальні потреби користувачів інфраструктури, знижувати соціальне напруження та підвищувати рівень прийняття реалізованих рішень. Для об'єктів критичної інфраструк-

тури участь громад має особливе значення, оскільки саме локальні користувачі найкраще розуміють функціональні пріоритети та вразливі місця систем. Водночас без належної методичної підтримки партисипативний дизайн може перетворюватися на формальну процедуру, що не має реального впливу на інженерні рішення.

Ефективна інтеграція громадської участі потребує чітких правил взаємодії між інженерами, планувальниками та громадою, прозорого пояснення технічних обмежень і альтернатив, формалізованих механізмів урахування зворотного зв'язку.

Соціальна прийнятність рішень у сфері післявоєнної реконструкції безпосередньо впливає на довготривалу ефективність об'єктів критичної інфраструктури. Проекти, реалізовані без урахування локального контексту, часто стикаються з проблемами експлуатації, саботажу або нераціонального використання, що знижує очікуваний соціально-економічний ефект.

Через це соціальні аспекти реконструкції варто розглядати не як другорядні, а як повноцінну складову інженерного й управлінського аналізу. Поєднання соціальної валідації з інструментами life-cycle assessment- і cost-benefit-аналізу дозволяє формувати більш збалансовані та стійкі рішення.

З огляду на вищезазначене, можна дійти висновку, що інституційні та соціальні аспекти післявоєнного відновлення критичної інфраструктури є невід'ємною частиною сталого підходу до реконструкції. Відсутність прозорих механізмів пріоритезації, належного контролю та участі громад істотно знижує ефективність навіть технічно обґрунтованих проєктів.

Це доводить необхідність розроблення інтегрованих алгоритмів, у межах яких інженерні, економічні та соціальні критерії розглядаються як єдина система прийняття рішень

Аналіз міжнародних і національних підходів до післявоєнного відновлення критичної інфраструктури, здійснений у попередніх розділах, дозволяє визначити системну науково-практичну проблему, яка є міждисциплінарною. З одного боку, сучасні програми реконструкції орієнтовані на максимальну швидкість відновлення базових функцій, що є критично важливим у гуманітарному та безпековому вимірах, з іншого боку, відсутність інтегрованих методик, які поєднують швидкість реалізації з оцінкою довгострокових наслідків, призводить до прийняття рішень, що є неефективними з позицій життєвого циклу об'єктів, енергетичної ефективності та соціальної стійкості.



Рис. 4. Інтегрований алгоритм відновлення критичної інфраструктури [1–3, 5–11]

Основними елементами цієї проблеми є такі: аналіз пошкоджень часто здійснюється без прямого зв'язку з вибором сценарію реконструкції; інженерні рішення приймаються без формалізованого аналізу життєвого циклу; основою пріоритетизації проєктів переважно є обсяги пошкоджень або політичні міркування, а не інтегральна ефективність; соціальні й інституційні фактори враховуються фрагментарно.

Таким чином, формується ризик так званої «ілюзорної відбудови», за якої відновлені об'єкти формально вводяться в експлуатацію, але мають обмежений її термін, підвищені експлуатаційні витрати або низьку соціальну прийнятність.

Для подолання зазначених обмежень пропонується інтегрований алгоритм відновлення об'єктів критичної інфраструктури, який поєднує інженерні, економічні, екологічні та соціальні аспекти в єдину систему підтримки прийняття рішень.

Ключовою ідеєю алгоритму є перехід від лінійної логіки «аналіз пошкоджень – ремонт» до циклічної моделі, де кожний етап реконструкції перевіряється щодо довгострокової ефективності та стійкості [5–11]. Алгоритм ґрунтується на чотирьох взаємопов'язаних рівнях:

1 рівень – аналіз пошкоджень. Передбачає поєднання дистанційних методів (спутникові, оптичні дані) з результатами інженерних обстежень для формування достовірної карти технічного стану об'єктів;

2 рівень – сценарний інженерний аналіз. Формування альтернативних сценаріїв відновлення (ремонт, посилення, реконструкція) з урахуванням конструктивних особливостей і залишкового ресурсу;

3 рівень – життєвий цикл та економічний аналіз. Застосування LCA- та cost-benefit-аналізу для порівняльного аналізу сценаріїв з позицій життєвого циклу, експлуатаційних витрат і соціально-економічних вигід;

4 рівень – соціально-інституційна валідація. Урахування участі громад, прозорості процедур та відповідності стратегічній меті відновлення.

Запропонований алгоритм передбачає, що рішення про відновлення об'єкта приймається не на основі одного критерію, а за результатами багатокритеріального аналізу, де кожен сценарій аналізується за інтегральним показником ефективності.

Такий підхід дозволяє мінімізувати ризик нерационального використання бюджетних коштів, збільшити рівень прозорості проце-

су прийняття рішень, забезпечити узгодженість короткострокових і довгострокової мети реконструкції, адаптувати міжнародні принципи сталого відновлення до українського контексту. На практиці алгоритм може бути реалізований як методичні рекомендації або цифрові інструменти підтримки прийняття рішень для органів державної влади та місцевого самоврядування.

Запропонований інтегрований алгоритм не суперечить методології RDNA, а логічно її доповнює, забезпечуючи перехід від технічного аналізу до обґрунтованих інженерних і управлінських рішень на рівні конкретних об'єктів і проєктів. Таким чином, алгоритм може бути використаний як інструмент деталізації національних і регіональних програм відновлення, підвищення ефективності донорського фінансування, зниження ризиків фрагментарної реконструкції [19, 20].

Висновки

У статті розглянуто сучасні підходи до відновлення та реконструкції об'єктів критичної інфраструктури України після воєнних руйнувань і на цій основі сформульовано такі основні висновки:

визначено, що наявні міжнародні та національні методики аналізу пошкоджень (RDNA) є необхідним, але недостатнім інструментом для прийняття інженерно обґрунтованих рішень щодо реконструкції об'єктів критичної інфраструктури, оскільки вони не враховують повною мірою життєвий цикл об'єктів та довгострокові наслідки відновлення;

зазначено, що дистанційні методи аналізу рівня пошкоджень на основі супутникових та оптичних даних мають високий потенціал для оперативного дослідження великих територій, однак можуть бути ефективними лише за умови інтеграції з польовими інженерними обстеженнями та локальної калібровки моделей;

обґрунтовано доцільність застосування інструментів life-cycle assessment- і cost-benefit-аналізу як обов'язкових елементів прийняття рішень у програмах післявоєнної реконструкції, що дозволяє знизити ризик неефективного використання ресурсів і підвищити довгострокову стійкість об'єктів;

запропоновано інтегрований алгоритм відновлення, який поєднує аналіз пошкоджень, сценарний інженерний аналіз, LCA, економічну оптимізацію та соціально-інституційну валідацію в єдину систему підтримки прийняття рішень.

Література

1. Government of Ukraine, World Bank, European Union, and United Nations, *Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3): Ukraine, February 2022 – December 2023*. Washington, DC: World Bank Group, 2024. [Online]. Available: <https://www.un4ukrainiancities.org/resources/ukraine-third-rapid-damage-and-needs-assessment-rdna3-february-2022-december-2023>
2. World Bank, United Nations, and European Union, *Updated Ukraine Recovery and Reconstruction Needs Assessment*. Washington, DC: World Bank Group, 2025. [Online]. Available: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2025/02/25/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released>
3. Government of Ukraine, World Bank, European Union, and United Nations, *Fourth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4): February 2022–December 2024*. Washington, DC: World Bank Group, 2025. [Online]. Available: <https://ukraine.un.org/en/290001-fourth-rapid-damage-and-needs-assessment-rdna4-february-2022-december-2024>
4. World Bank, *Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment 2022–2023: Synthesis Report*. Washington, DC: World Bank Group, 2023. Available: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099184503212328877/p1801740d1177f03c0ab180057556615497>
5. United Nations Development Programme (UNDP), *Sustainable Reconstruction Framework for Ukraine*. New York, NY: UNDP, 2023. [Online]. Available: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2023-11/oct_17_-_v1_-_sustainable_reconstruction_framework.pdf
6. Rezk J., Pons-Valladares O., Muñoz-Blanc C. Evaluating sustainability in post-conflict reconstruction: a case study of blast-damaged buildings without structural collapse risk in Syria. *Buildings*. 2025. Vol. 15. No. 3. P. 369. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15030369>
7. Li X, Guo L. and Chan J. C. W. Combined Sentinel-1 and Sentinel-2 imagery for destroyed building classification in conflict zones. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2024. Vol. 18. Pp. 3827–3839. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3522389>
8. Butenko Y. and Petrychenko S. Monitoring and assessment of the scale of destruction by remote sensing methods during the war in Ukraine, in *Proceedings of GeoTerrace-2023 Conference*. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510105>
9. Косенко С. М., Бойко І. П. Відновлення об'єктів критичної інфраструктури в умовах воєнних дій: інженерні та організаційні аспекти. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, 2023. Доступно: <https://science.lpnu.ua/uk/visnyk>
10. War-related building damage assessment in Kyiv, Ukraine, using Sentinel-1 radar and Sentinel-2 optical images / Y. Aimaiti *et al. Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. No. 24. P. 6239, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14246239>
11. Sandhini Putri A. F., Widyatmanti W. and Umarhadi D. A. Sentinel-1 and Sentinel-2 data fusion to distinguish building damage level after the Lombok earthquake. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2022. Vol. 26. P. 100724. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100724>
12. Барабаш О. В., Ляшенко В. І. Сталий розвиток та реконструкція будівель і споруд в Україні. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2024. Доступно: <https://ces.org.ua/en/recovery-finance/>
13. Bilham R., Gaur V. K. and Molnar P. Himalayan seismic hazard. *Science*. 2001. Vol. 293. No. 5534 p. 1442–1444. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1062584>
14. Energy and material flows of megacities / C. A. Kennedy *et al. Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2015. Vol. 112. No. 19. Pp. 5985–5990. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1504315112>
15. Chang S. E. Urban disaster recovery: a measurement framework and its application to the 1995 Kobe earthquake. *Disasters*. 2010. Vol. 34. No. 2. Pp. 303–327. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2009.01130.x>
16. International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) and International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property (ICCROM). *Guidance on Post-Disaster and Post-Conflict Recovery and Reconstruction for Heritage Places*. Rome: ICCROM, 2023. Available: https://www.iccrom.org/sites/default/files/publications/2024-02/en_icomos-iccrom_guidance_iccrom_2024.pdf
17. Olshansky M. and Johnson L. A. *Clear as Mud: planning for the Rebuilding of New Orleans*. Chicago: APA Press, 2010. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315706599>
18. Lizarralde A., Johnson C., and Davidson C. *Rebuilding After Disasters: From Emergency to Sustainability*. London: Routledge, 2010. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203842302>
19. Центр економічної стратегії. Моніторинг прозорості фінансування відновлення України (Recovery Spending Watchdog). Київ, 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://ces.org.ua/en/recovery-finance/>
20. Cabinet of Ministers of Ukraine, *Procedure for Conducting Work on Cultural Heritage Sites during Martial Law*. Kyiv, 2022. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1342-2022-%D0%BF>

References

1. Government of Ukraine, World Bank, European Union, and United Nations, *Third Rapid Damage*

- and Needs Assessment (RDNA3): Ukraine, February 2022–December 2023. Washington, DC: World Bank Group, 2024. [Online]. Available: <https://www.un4ukrainiancities.org/resources/ukraine-third-rapid-damage-and-needs-assessment-rdna3-february-2022-december-2023>
2. World Bank, United Nations, and European Union, *Updated Ukraine Recovery and Reconstruction Needs Assessment*. Washington, DC: World Bank Group, 2025. [Online]. Available: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2025/02/25/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released>
 3. Government of Ukraine, World Bank, European Union, and United Nations, *Fourth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4): February 2022–December 2024*. Washington, DC: World Bank Group, 2025. [Online]. Available: <https://ukraine.un.org/en/290001-fourth-rapid-damage-and-needs-assessment-rdna4-february-2022-december-2024>
 4. World Bank, *Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment 2022–2023: Synthesis Report*. Washington, DC: World Bank Group, 2023. Available: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099184503212328877/p1801740d1177f03c0ab180057556615497>
 5. United Nations Development Programme (UNDP), *Sustainable Reconstruction Framework for Ukraine*. New York, NY: UNDP, 2023. [Online]. Available: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2023-11/oct_17_-_v1_-_sustainable_reconstruction_framework.pdf
 6. Rezk, J., Pons-Valladares, O., Muñoz-Blanc, C. (2025). Evaluating sustainability in post-conflict reconstruction: a case study of blast-damaged buildings without structural collapse risk in Syria. *Buildings*, vol. 15, no. 3, p. 369. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15030369>
 7. Li, X, Guo, L. and Chan, J. C. W. (2024). Combined Sentinel-1 and Sentinel-2 imagery for destroyed building classification in conflict zones. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 18, pp. 3827–3839. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3522389>
 8. Butenko, Y. and Petrychenko, S. (2023). Monitoring and assessment of the scale of destruction by remote sensing methods during the war in Ukraine, in *Proceedings of GeoTerrace-2023 Conference*. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510105>
 9. Kosenko, S. M., Boiko, I. P. (2023). Restoration of critical infrastructure facilities under wartime conditions: Engineering and organizational aspects. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University*. <https://science.lpnu.ua/uk/visnyk>
 10. War-related building damage assessment in Kyiv, Ukraine, using Sentinel-1 radar and Sentinel-2 optical images / Y. Aimaiti et al. *Remote Sensing*, vol. 14, no. 24, p. 6239, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14246239>
 11. Sandhini Putri, A. F., Widyatmanti, W., Umarhadi, D. A. (2022). Sentinel-1 and Sentinel-2 data fusion to distinguish building damage level after the Lombok earthquake. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 26, p. 100724, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100724>
 12. Barabash, O. V., Liashenko, V. I. (2024). Sustainable development and reconstruction of buildings and structures in Ukraine. *Building Structures: Theory and Practice*. <https://ces.org.ua/en/recovery-finance/>
 13. Bilham, R., Gaur, V. K., Molnar, P. (2001). Himalayan seismic hazard. *Science*, vol. 293, no. 5534, p. 1442–1444. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1062584>
 14. Energy and material flows of megacities / C. A. Kennedy et al (2015). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112, no. 19, pp. 5985–5990. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1504315112>
 15. Chang, S. E. (2010). Urban disaster recovery: a measurement framework and its application to the 1995 Kobe earthquake. *Disasters*, vol. 34, no. 2, pp. 303–327. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2009.01130.x>
 16. International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) and International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property (ICCROM), *Guidance on Post-Disaster and Post-Conflict Recovery and Reconstruction for Heritage Places*. Rome: ICCROM, 2023. Available: https://www.iccrom.org/sites/default/files/publications/2024-02/en_icomos-iccrom_guidance_iccrom_2024.pdf
 17. Olshansky, M., Johnson, L. A. (2010). *Clear as Mud: Planning for the Rebuilding of New Orleans*. Chicago: APA Press. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315706599>
 18. Lizarralde, A., C. Johnson, C., Davidson, C. (2010). *Rebuilding After Disasters: From Emergency to Sustainability*. London: Routledge. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203842302>
 19. Center for Economic Strategy, *Recovery Spending Watchdog: Monitoring Transparency of Ukraine's Reconstruction*. Kyiv, 2024. [Online]. Available: <https://ces.org.ua/en/recovery-finance/>
 20. Cabinet of Ministers of Ukraine, *Procedure for Conducting Work on Cultural Heritage Sites during Martial Law*. Kyiv, 2022. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1342-2022-%D0%BF>
- Шашенко Олександр Миколайович**, д.т.н., професор кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7012-6157>; shashenko.o.m@nmu.one
- Гапєєв Сергій Миколайович**, д.т.н., професор, завідувач кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0203-7424>; hapieiev.s.m@nmu.one

Хозяїкіна Наталія Володимирівна, к.т.н.,
доцент кафедри будівництва, геотехніки
і геомеханіки,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4747-3919>;
khoziaikina.n.v@nmu.one

Національний технічний університет «Дніпровська
політехніка», проспект Дмитра Яворницького, 19,
м. Дніпро, 49000, Україна.

Algorithm for post-war restoration of buildings and structures of critical infrastructure

Abstract. Problem. The large-scale destruction of critical infrastructure caused by the war in Ukraine has created an urgent need for reliable tools to assess damage and prioritize reconstruction efforts. Existing recovery approaches often emphasize rapid rebuilding but insufficiently integrate engineering assessment, economic evaluation, and institutional decision-making. As a result, reconstruction strategies may lack transparency, efficiency, and long-term sustainability. **Goal.** This study aims to develop and justify the structure of an integrated algorithm for the recovery of critical infrastructure facilities that supports evidence-based decision-making in post-war reconstruction. **Methodology.** The research is based on the application of the international RDNA (Rapid Damage and Needs Assessment) framework, which integrates macroeconomic analysis, sectoral assessment, and spatial aggregation of data on direct physical damage and indirect economic losses. The proposed approach combines remote sensing-based damage assessment, field engineering surveys, scenario-based infrastructure analysis, and economic evaluation tools, including life-cycle assessment (LCA) and cost-benefit analysis. **Results.** An integrated algorithm for infrastructure recovery is proposed that structures the reconstruction process into four interconnected stages: damage assessment, scenario-based engineering analysis, life-cycle and economic evaluation of reconstruction alternatives, and socio-institutional validation of decisions. The framework enables the formation of a balanced portfolio of recovery projects by integrating technical feasibility, economic efficiency, and sustainability criteria within a unified decision-support system. **Originality.** The study contributes to the field of

infrastructure recovery by proposing an interdisciplinary decision-support framework that links RDNA-based damage assessment with engineering scenario analysis and life-cycle economic evaluation. Unlike conventional reconstruction planning approaches, the proposed algorithm explicitly integrates technical, economic, and institutional dimensions of post-war recovery within a single analytical structure. **Practical value.** The proposed framework can support national and local authorities in prioritizing infrastructure reconstruction projects, improving transparency in the allocation of recovery funding, and reducing the risk of inefficient or short-term reconstruction decisions. The approach also contributes to strengthening the resilience and sustainability of infrastructure systems in post-conflict recovery contexts.

Keywords: integrated algorithm, life cycle, damage assessment, infrastructure restoration, military destruction, validation

Olexandr Shashenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7012-6157>, shashenko.o.m@nmu.one

Nataliia Khoziaikina¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4747-3919>, khoziaikina.n.v@nmu.one

Hapiejiev Serhii¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0203-7424>, hapiejiev.s.m@nmu.one

Dnipro University of Technology, ave. Dmytro
Yavornytsky, 19. Dnipro, 49000, Ukraine.

Стаття надійшла до редакції / Received:
20.01.2026.

Прийнята до друку після рецензування / Revised
and Accepted: 26.01.2026.

Дата публікації статті / Published: 11.05.2026.