

УДК 504.06:005.52:330.3

DOI: <https://doi.org/10.32782/2522-4263/2025-3-12>

Марцинюк Є.О.

*аспірант кафедри менеджменту та публічного адміністрування
Харківського національного університету міського господарства
імені О.М. Бекетова*

Martsyniuk Yevgeniy

*Postgraduate Student at the Department of Management and Public Administration
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv*

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ ВІД РУЙНУВАНЬ У ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАДАХ

MATHEMATICAL MODEL FOR MANAGING CONFLICT-RELATED WASTE IN TERRITORIAL COMMUNITIES

АНОТАЦІЯ

У статті обґрунтовано доцільність застосування математичного моделювання для підвищення ефективності управління відходами від руйнувань інфраструктури в умовах збройного конфлікту на рівні територіальних громад України. Проблема актуальна через масштаб утворення, невідомість складу та небезпечні властивості таких відходів, що створюють ризики для здоров'я, довкілля й ускладнюють їх збирання, сортування та переробку. Запропоновано формалізований підхід до ранжування відходів за критерієм пріоритетності управлінського втручання на основі багатофакторної оцінки (обсяг, небезпечність, технологічна оброблюваність, логістична доступність). Такий підхід формує основу для створення інструментів муніципального управління, що поєднують принципи системного аналізу, логістичного планування, екологічної безпеки та доказового прийняття рішень в умовах постконфліктного середовища.

Ключові слова: управління відходами, територіальні громади, післявоєнне відновлення, відходи від руйнувань, математичне моделювання.

ANNOTATION

This article substantiates the need to implement mathematical modelling to enhance the efficiency of managing waste generated from the destruction of infrastructure during armed conflict, particularly at the level of territorial communities in Ukraine. The urgency of the issue arises from the unprecedented volume of such waste, the uncertainty of its morphological composition, and the presence of hazardous properties that pose significant risks to public health and the environment, while also complicating the implementation of waste collection, sorting, storage, and treatment operations. The need to implement the principles of the waste hierarchy and circular economy encourages the search for new approaches and mechanisms for managing such types of waste. Based on a critical analysis of current research and local management practices, the paper proposes a formalized approach to prioritizing intervention in conflict-related waste management. The proposed model is grounded in a multifactor assessment that incorporates four key parameters: the volume of waste, its level of hazard, its technological treatability, and the logistical availability of infrastructure for its management. Each parameter is normalized and integrated into a composite index that enables rapid assessment and informed decision-making even under conditions of limited resources. The model was tested using a simulated case of a de-occupied community, demonstrating its flexibility, scalability, and practical applicability for planning site clearance and optimizing resource allocation. The article also outlines prospects for the digital implementation of the model as part of decision-support systems for local authorities. The research findings carry both scientific and practical value in

the context of post-conflict recovery in Ukraine. The proposed approach lays the foundation for the development of municipal management tools that integrate principles of systems analysis, logistical planning, environmental safety, and evidence-based decision-making in crisis and post-conflict environments.

Keywords: waste management, territorial communities, post-war recovery, conflict-related debris, mathematical modelling.

Постановка проблеми. В умовах повномасштабної збройної агресії проти України проблема управління відходами, що утворюються внаслідок руйнування об'єктів інфраструктури, житлового та промислового фонду, набула виняткової гостроти. За оцінками Світового банку, Європейської комісії, уряду України та Програми розвитку ООН, станом на 2024 рік понад 13 % житлового фонду країни було частково або повністю зруйновано, а загальний обсяг відходів, що виникли внаслідок бойових дій, перевищує десятки мільйонів тонн [1]. Ці відходи мають складний морфологічний склад, часто містять токсичні, вибухонебезпечні або біологічно небезпечні компоненти [2].

Вимірювання обсягів і складу відходів від руйнування є критично важливим елементом для ефективного управління матеріальними потоками, підвищення рівня ресурсоефективності та реалізації принципів циркулярної економіки. Наявність верифікованих даних не лише забезпечує можливість планування оптимальних шляхів рециклінгу та повторного використання матеріалів, а й слугує основою для прийняття обґрунтованих управлінських рішень на рівні громад, регіонів і національної політики.

Зазвичай, увага дослідників та наукової спільноти більше фокусується на відходах будівництва та знесення (англ. construction and demolition waste). Вони є доволі подібними до відходів від руйнувань, проте не тотожними, оскільки мають більш передбачуваний склад та кількості, меншу ймовірність вмісту небезпечних компонентів. У сучасній науковій літературі зростає інтерес до проблематики управління відходами будівництва і знесення, зокрема в контексті переходу до циркулярної економіки,

оптимізації ресурсів і реагування на надзвичайні ситуації, включаючи постконфліктні сценарії. Деякі дослідники, наприклад [3] наголошують, що перехід до циркулярної економіки в секторі управління такими відходами стримується багатьма бар'єрами, що охоплюють юридичну, технічну, соціальну, поведінкову та економічну сфери. Відсутність глобальної нормативної рамки, складність сортування, обробки та повторного використання матеріалів – усе це визначено як ключові виклики для впровадження принципів сталого управління відходами у будівництві.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попри увагу, управління відходами у постконфліктному чи кризовому середовищі досліджене недостатньо. У дослідженні Kabirifar K. та колег [4] основними бар'єрами для управління такими відходами визначено ставлення та поведінку учасників, слабе врахування управління відходами протягом усього життєвого циклу будівництва та недосконалість нормативно-правової бази. Cudecka-Purina N. та ін. [5] аналізують потенціал відновлення енергії та промислового симбіозу з використанням відходів від будівництва і знесення.

Практичний інструмент підтримки прийняття рішень подано у дослідженні van den Berg, M. та ін. [6], де враховано технічну, економічну, екологічну та соціальну ефективність стратегій повторного використання, переробки чи рекуперації. Цей підхід демонструє можливість інституційної інтеграції моделей прийняття рішень у сфері управління відходами в умовах сталого будівництва. У роботі Anshassi M. та ін. [7] підкреслено значення вдосконалення обліку й управління перероблюваними компонентами.

Проблематика управління відходами після збройних конфліктів представлена у роботі Ali A. i Ezeah C. [8], де досліджено досвід управління відходами Лівії після конфлікту. У статті Karunasena G. та Amaratunga D. [9] на прикладі Шрі-Ланки показано відсутність єдиного органу та регуляторної бази для управління відходами після стихійних лих. Досвід цих країн демонструє потребу у вдосконаленні законодавства, створенні єдиного органу та національних процедур управління відходами після криз.

Водночас результати сучасних досліджень свідчать про наявність суттєвих прогалин у методологічному забезпеченні процесу управління такими видами відходів. Зокрема, бракує стандартизованих методик вимірювання складу, обсягів і небезпечних властивостей відходів, які були б адаптовані до умов кризового чи постконфліктного середовища. Часто застосовують спрощені методики без урахування просторових відмінностей, небезпечності та логістичних бар'єрів, що зумовлює помилки прогнозів і неефективність очищення територій.

Більшість існуючих стратегій управління відходами зосереджені на короткотермінових

цілях, не враховуючи повний життєвий цикл матеріалів та збереження ресурсів. Як показують дослідження Singh [10], Barma i Modibbo [11], Roseckэ та ін. [12], Dai та ін. [13] i Benntez з колегами [14], математичне моделювання широко застосовується у сфері управління побутовими відходами для оптимізації логістики, вибору технологій і мінімізації витрат. Окремі роботи, зокрема Jing та ін. [15], Louis i Shih [16], а також Lee з колегами [17], зосереджуються на використанні моделей для вибору оптимальних місць розташування об'єктів збирання, переробки чи утилізації відходів. Водночас, як зазначають Levis та ін. [18] i Mavrotas з колегами [19], більшість таких моделей ігнорують екологічні наслідки, і для їх оцінки доцільно застосовувати аналіз життєвого циклу. У контексті відходів від руйнувань і знесення, дослідження Hussein [20] та Heydari з колегами [21] показують, що наявні математичні моделі здебільшого мають техніко-технологічний характер, рідко враховують змінність обсягів і складу відходів, дефіцит ресурсів та потребу в адаптивних рішеннях.

Ці обмеження підкреслюють потребу у комплексних моделях, що поєднують дані про обсяги, небезпечність, логістику та інституційні можливості й слугують основою для науково обґрунтованого планування відновлення України.

Постановка завдання. Метою статті є розроблення математичної моделі оцінювання пріоритетності управління відходами від руйнувань у територіальних громадах, яка дозволяє враховувати масштаб утворення, небезпечні властивості, складність оброблення та логістичну доступність фракцій відходів, для обґрунтування рішень у сфері муніципального управління в умовах післявоєнного відновлення.

Виклад основного матеріалу дослідження. Одним із фундаментальних викликів у сфері управління відходами, які утворюються внаслідок збройних конфліктів, є необхідність забезпечення своєчасного, диференційованого й обґрунтованого реагування на ризики, що виникають у громадах. Управлінські рішення в такому середовищі, як показує аналіз українських і зарубіжних практик, приймаються в умовах високої невизначеності: немає достовірної інформації про склад відходів, ступінь їх небезпеки, доступність технічної інфраструктури. У цих обставинах постає нагальна потреба у створенні формалізованого інструменту, здатного забезпечити об'єктивне ранжування етапів управління відходами за критерієм пріоритетності управлінських дій. Таке ранжування має ґрунтуватися не на суб'єктивних оцінках чи доступності обладнання, а на верифікованих параметрах: масштабі утворення, морфологічному складі, ступені небезпеки, можливостях перероблення та логістичній доступності. Проведені раніше дослідження дозволили виокремити три ключові характеристики відходів від руйнувань, які значною мірою ускладнюють

організацію їх ефективного управління: масштабність утворення таких відходів, яка перевищує можливості наявної логістичної та інфраструктурної спроможності громад; невизначеність та непередбачуваність їх складу, що унеможлиблює застосування типових процедур сортування, обліку та оброблення; наявність широкого спектра небезпечних властивостей, які становлять ризик для здоров'я населення, безпеки працівників та стану довкілля [22].

У відповідь на ці виклики в роботі обґрунтовується застосування підходу багатofакторного оцінювання з використанням інтегрального індексу пріоритетності управління для окремих фракцій відходів. Методичне підґрунтя такого підходу формується на основі поєднання ідей системного аналізу, логіки прийняття рішень у критичних умовах, а також методів нормалізації даних і зваженого оцінювання.

Ключовим у даному підході є формалізація чотирьох базових компонентів, що безпосередньо впливають на обґрунтування управлінських пріоритетів:

1. Кількісні характеристики відходів – обсяг або маса відходів (в тому числі відходів певного типу), що утворилися в межах адміністративно-територіальної одиниці. Цей показник дозволяє враховувати навантаження на логістичну систему, ємність полігонів та потреби у технічних ресурсах.

2. Ступінь небезпеки відходів та їх окремих фракцій – обчислюється на основі аналізу наявності небезпечних властивостей відповідно до національної класифікації: НВ1–НВ15 [23]. Для агрегування цих характеристик вводиться індекс небезпечності, що може обраховуватись як зважена сума присутніх властивостей.

3. Придатність відходів та окремих фракцій до обробки – відображає наявність технічних можливостей для оброблення, рециклінгу або безпечного зберігання. У контексті післявоєнних територій це значення часто обмежується через дефіцит обладнання та сертифікованих підприємств.

4. Доступність інфраструктури – індикатор наявності та логістичної досяжності об'єктів управління відходами (тимчасові майданчики, сортувальні лінії, логістичні вузли, полігони).

Крім того, варто враховувати також контекст – специфіку громади, її територіальний масштаб, тип пошкоджених об'єктів та демографічну ситуацію.

Інтеграція зазначених параметрів здійснюється шляхом побудови індексу пріоритетності управління, що дозволяє ранжувати відходи за комплексним показником. Це відкриває можливості для системного планування управлінських дій – від сортування й маркування до вибору траєкторії логістики чи залучення ресурсів міжнародної технічної допомоги.

Наукова доцільність такого моделювання полягає також у тому, що воно дозволяє здійснювати динамічне оновлення вхідних даних у

міру отримання нової інформації (наприклад, після обстежень, хімічної експертизи чи піротехнічної очистки). Таким чином, модель не є статичною – вона стає інструментом управління ризиками в режимі реального часу, що критично важливо в умовах швидкоплинної ситуації у громадах, які зазнали руйнувань.

Запропонований підхід також відповідає вимогам принципу evidence-based decision-making (прийняття рішень на основі доказів), що широко використовується в міжнародній практиці управління катастрофами [24], а також міжнародними організаціями для планування післявоєнного відновлення України [25]. Водночас його реалізація вимагає створення мінімального обліково-аналітичного забезпечення: шаблонів збору даних, табличних моделей розрахунку, цифрових форм звітності. Саме ці інструменти мають бути у фокусі подальших досліджень і практичного впровадження.

Управління відходами, що утворюються внаслідок руйнувань інфраструктури під час воєнних дій, є складною багатоаспектною задачею, яка охоплює технічні, логістичні, екологічні та ресурсні компоненти. Для її формалізації запропоновано математичну модель, яка дозволяє описати розподіл управлінських дій щодо різних відходів та їх фракцій з урахуванням їх властивостей, ризиків, обсягів утворення та обмежень ресурсного забезпечення.

Модель має на меті підтримку прийняття рішень щодо вибору та розподілу управлінських заходів (збирання, сортування, зберігання, утилізація тощо) у громаді за умов обмежених ресурсів, високої небезпечності окремих фракцій та динамічних змін обстановки. У математичній постановці вона базується на множинах фракцій відходів $i \in I$, управлінських заходів $j \in J$, типів ресурсів $k \in K$ і часових періодів $t \in T$. Основною змінною є обсяг відходів чи окремої фракції $x_{ij}(t)$, що підлягає заходу j у момент часу t . Ресурси, необхідні для реалізації кожного заходу, подаються як матриця $r_{jk}(t)$, а наявний ресурсний потенціал громади – як $R_k(t)$.

Цільова функція моделі може відображати мінімізацію загального ризику, витрат або екологічного навантаження (1):

$$\min_{x_{ij}(t)} Z = \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij} \cdot x_{ij}(t), \quad (1)$$

де C_{ij} – вагові коефіцієнти, що враховують ризик, складність чи вартість впровадження заходу j для фракції i .

Модель враховує кілька типових обмежень (2): ресурсні (забезпечення реалізації заходів лише в межах доступних ресурсів); кількісні (обсяг заходів не перевищує загального обсягу відходів), пріоритетність (для відходів із високим ризиком задається мінімальний рівень втручання та високий пріоритет терміновості здійснення операцій).

$$\sum_{j \in J} r_{jk}(t) \cdot x_{ij}(t) \leq R_k(t), \forall k \in K, t \in T. \quad (2)$$

Запропонований підхід є адаптивним до різних умов громад, дозволяє враховувати сценарні коливання ресурсної спроможності, зміни обсягів відходів, типи пошкоджень і локальні ризики. В результаті модель виступає як інструмент для формування обґрунтованих управлінських рішень у сфері управління відходами від руйнувань на місцевому рівні, з орієнтацією на безпечне та ресурсоефективне післявоєнне відновлення.

У контексті децентралізованої системи управління, яка функціонує в Україні, саме органи місцевого самоврядування мають оперативно приймати рішення щодо збирання, сортування, переміщення та тимчасового зберігання відходів від руйнувань. Однак без об'єктивного способу ранжування фракцій за рівнем небезпеки, обсягами та технічними обмеженнями ці рішення часто виявляються неефективними або ризикованими. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано формалізовану модель, яка дозволяє обчислити індекс пріоритетності управління для кожної фракції відходів у межах територіальної громади.

Модель базується на багатофакторній оцінці чотирьох ключових параметрів і має такий вигляд (3):

$$P_i = \alpha \cdot \bar{V}_i + \beta \cdot H_i + \gamma \cdot (1 - R_i) + \delta (1 - A_i), \quad (3)$$

де P_i — інтегральний показник пріоритетності управління відходами i (чим більше значення, тим вищий пріоритет); $\bar{V}_i$ — нормалізований обсяг або маса фракції відходів i в межах громади; H_i — зведений індекс небезпечних властивостей відходів чи окремих фракцій i ; $R_i \in [0;1]$ — індекс оброблюваності (технологічної керованості) відходів i ; $A_i \in [0;1]$ — індекс доступності інфраструктури для управління відходами i (наявність маршрутів, сортувальних потужностей тощо); $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ — вагові коефіцієнти, які визначають управлінські пріоритети громади щодо відповідних факторів.

Нормалізований обсяг $\bar{V}_i$ визначає частку фракції i в загальному обсязі відходів, що утворилися у межах певної громади. Обчислення цього показника базується на результатах морфологічного аналізу, даних польових досліджень, супутникового зондування або структурних коефіцієнтів, характерних для типових зруйнованих споруд. Формально показник визначається як відношення фактичного обсягу фракції V_i до сумарного обсягу усіх фракцій (якщо розглядається весь обсяг відходів, значення V_i буде дорівнювати 1) (4):

$$\bar{V}_i = \frac{V_i}{\sum_{i \in I} V_i}. \quad (4)$$

Це дозволяє застосовувати модель до громад із різним масштабом руйнувань, зберігаючи її універсальність.

Другий параметр — індекс небезпечності H_i , який відображає ступінь потенційної загрози для здоров'я населення, працівників та

довкілля, пов'язаної з фракцією i . Оцінка цього індексу ґрунтується на нормативно затвердженій класифікації небезпечних властивостей, що включає, зокрема, вибухонебезпечність, гостру токсичність, канцерогенність, екотоксичність тощо. Показник H_i присвоюється фракціям за шкалою $[0; 1]$ на основі типового складу матеріалів, виявлених під час обстежень. Наприклад, фракції бетону чи цегли можуть мати індекс 0, тоді як фрагменти з вмістом азбесту, важких металів, залишків паливно-мастильних матеріалів або вибухових речовин — значення, близьке до 1.

Третім елементом системи є індекс оброблюваності R_i , що відображає технологічну складність вилучення, ідентифікації та механічного або ручного сортування фракції i . Цей показник формується з урахуванням рівня фрагментації, однорідності матеріалу, наявності домішок, а також доступності відповідної техніки. Наприклад, однорідні мінеральні фракції (бетон, цегла, метал) зазвичай мають високі значення $R_i \approx 1$, тоді як земля, змішана з уламками боеприпасів чи паливно-мастильних залишків, — мінімальні значення через потребу у складних технологіях ручного вилучення й хімічної експертизи.

Останнім у цьому наборі виступає індекс логістичної доступності A_i , що характеризує здатність громади забезпечити своєчасне вивезення, сортування або тимчасове зберігання конкретної фракції в межах існуючої транспортної, технічної та безпекової інфраструктури. Значення цього параметра враховують наявність доріг, сортувальних майданчиків, контейнерної бази, рівень мінної небезпеки на відповідних ділянках тощо. Значення $A_i \approx 1$ притаманне фракціям у зонах із розвинутою логістикою та доступним обладнанням; натомість $A_i = 0$ — типовий для зон із заблокованим доступом або повною відсутністю необхідних ресурсів.

Запропоновані параметри виступають складовими частинами функції оцінювання пріоритетності управління відходами в умовах обмежених можливостей, і дозволяють інтегрувати ризики, ресурси та типологічні особливості фракцій у єдину систему оптимізації.

Параметри моделі були відібрані на основі попереднього аналізу джерел утворення відходів, їх морфологічного складу та логістичних обмежень. У базовій версії моделі було обрано такі значення коефіцієнтів: $\alpha=0,25$ (масштаб утворення), $\beta=0,35$ (небезпечність), $\gamma=0,25$ (складність обробки), $\delta=0,15$ (інфраструктурна обмеженість).

Ці коефіцієнти можуть бути змінені залежно від регіональних або муніципальних особливостей. Важливо, що модель допускає адаптацію до конкретних сценаріїв — наприклад, у громаді з розвинутою інфраструктурою можна знизити вагу параметра A_i , натомість посилити акцент на параметрі H_i , якщо йдеться про ділянки з високим ризиком забруднення.

Для апробації моделі було змодельовано типову ситуацію у деокупованій громаді, в якій

на момент оцінки ідентифіковано п'ять основних фракцій відходів (табл. 1).

Отримані результати свідчать, що найбільш пріоритетними з точки зору управління є фракції, які поєднують середній або великий обсяг з високою небезпечністю та низькою оброблюваністю – зокрема, ґрунт із залишками боеприпасів та пошкоджене електрообладнання. Водночас уламки бетону, хоча й становлять основний обсяг, є менш критичними з точки зору ризиків, що відображається в нижчому значенні P_i .

Запропонована модель дозволяє громадам, які постраждали внаслідок бойових дій, сформулювати чіткі управлінські пріоритети щодо управління різними типами відходів. Її застосування на етапі розробки локальних планів очищення територій може значно підвищити ефективність використання ресурсів, зменшити екологічні та техногенні ризики, а також слугувати підґрунтям для обґрунтування заявок на технічну допомогу від держави чи міжнародних донорів.

Крім того, модель придатна для цифрової реалізації – у вигляді електронної таблиці, модуля в геоінформаційній системі або мобільного додатку для муніципального менеджменту. Це забезпечить її інтеграцію в щоденні управлінські процеси, сприятиме підвищенню прозорості та підзвітності прийнятих рішень.

Висновки з проведеного дослідження. Без уніфікації методів оцінки, цифровізації процесів обліку та впровадження системного підходу на основі аналізу життєвого циклу матеріалів, досягнення цілей циркулярної економіки та стійкого управління відходами залишається малоімовірним. Це вимагає подальших міждисциплінарних досліджень, пілотних проектів та інституційної підтримки на рівні державної політики та муніципального управління. Особливе значення в системі управління відходами від руйнувань набуває рівень місцевого самоврядування, оскільки саме територіальні громади відповідальні за організацію збирання, сортування, тимчасового зберігання та очищення територій. Водночас переважна більшість громад не має ані достатніх матеріально-технічних ресурсів, ані нормативно-методичних інструментів для ухвалення рішень у критичних умовах. Це обумовлює потребу у створенні науково обґрунтованих моделей, що дозволяють оптимізувати пріоритети управлінських дій, розподіл ресурсів та мінімізацію екологічних ризиків.

Проведене дослідження дозволило розробити математичну модель пріоритетного управління відходами від руйнувань, яка враховує критичні фактори, що ускладнюють управлінські рішення в умовах післявоєнного відновлення територіальних громад України. На відміну від класичних моделей управління потоками відходів, запропонований підхід базується на оцінці інтегрального індексу пріоритетності управлінського втручання, що формується із урахуванням масштабності утворення, небезпечних властивостей, складності обробки та інфраструктурної доступності для кожної фракції відходів.

Модель забезпечує формалізовану основу для прийняття управлінських рішень у ситуації високої невизначеності, коли громади не мають повної інформації про морфологічний склад відходів, ступінь їх токсичності чи вибухонебезпечності, а також стикаються з обмеженням ресурсів. Застосування цієї моделі дозволяє ранжувати фракції відходів за ступенем управлінського пріоритету, що критично важливо для розподілу технічних і фінансових ресурсів, планування логістичних операцій, організації сортувальних майданчиків та обґрунтування запитів на міжнародну технічну допомогу.

Апробація моделі на умовному прикладі деокупованої громади засвідчила її здатність виявляти фракції з підвищеним ризиком для довкілля та населення, навіть у випадках, коли вони не є домінуючими за масою. Це особливо важливо для забезпечення екологічної та техногенної безпеки на етапі очищення та відбудови територій.

Результати дослідження підтверджують доцільність інтеграції математичних моделей у систему управління відходами від руйнувань на муніципальному рівні. Такий підхід може стати інструментом реалізації принципів управління, що ґрунтується на доказах, сприяти підвищенню ефективності місцевого самоврядування та формуванню прозорих, стандартизованих механізмів реагування на наслідки воєнних дій.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на уточнення вагових коефіцієнтів у залежності від типології громад; інтеграцію моделі в цифрові платформи управління (ПІС, мобільні додатки); адаптацію методики до різних фаз відновлення (аварійна очистка, стабілізація, реконструкція); тестування моделі в реальних польових умовах за участі муніципалітетів і міжнародних партнерів.

Таблиця 1

Результати апробації оцінювання пріоритетності управління відходами у деокупованій громаді

№	Фракція відходів	$\bar{V}_i$	H_i	R_i	A_i	P_i
1	Уламки бетону з арматурою	0.65	0.1	0.85	0.9	0.25
2	Пошкоджене електрообладнання	0.02	0.75	0.3	0.3	0.55
3	Змішані уламки з фарбами	0.13	0.6	0.4	0.35	0.49
4	Фрагменти скла	0.1	0.2	0.6	0.7	0.24
5	Ґрунт із залишками боеприпасів	0.15	0.85	0.25	0.2	0.64

Джерело: підготовлено автором

Таким чином, створена модель є важливим елементом сучасного інструментарію муніципального менеджменту в умовах післявоєнного відновлення та може бути покладена в основу нормативно-методичних розробок для органів місцевого самоврядування.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. World Bank, European Commission, United Nations, Government of Ukraine. Ukraine: Fourth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4). 2024. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099022025114040022/pdf/P180174-ca39eccd-ea67-4bd8-b537-ff73a675a0a8.pdf> (дата звернення: 16.07.2025)
2. Gafurova O.V., Novak T.S. Information on waste generated as a result of war: the issue of legal protection. *Scientific Bulletin of Uzhhorod National University*. 2023. № 1 (79). P. 349–355. DOI: <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2023.79.1.58>
3. Purchase C.K., Al Zulayq D.M., O'Brien B.T. et al. Circular economy of construction and demolition waste: A literature review on lessons, challenges, and benefits. *Materials*. 2022. Vol. 15 (1). Article 76. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15010076>
4. Kabirifar K., Mojtahedi M., Wang C.C. A systematic review of construction and demolition waste management in Australia: Current practices and challenges. *Recycling*. 2021. Vol. 6 (2). Article 34. DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling6020034>
5. Cudecka-Purina N., Kuzmina J., Butkevics J. et al. A comprehensive review on construction and demolition waste management practices and assessment of this waste flow for future valorization via energy recovery and industrial symbiosis. *Energies*. 2024. Vol. 17 (21). Article 5506. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17215506>
6. van den Berg M., Hulsbeek L., Voordijk H. Decision-support for selecting demolition waste management strategies. *Buildings and Cities*. 2023. Vol. 4 (1). P. 883–901. DOI: <https://doi.org/10.5334/bc.318>
7. Anshassi M., Laux S.J., Townsend T.G. Approaches to integrate sustainable materials management into waste management planning and policy. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019. Vol. 148. P. 55–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.011>
8. Ali A., Ezeah C. Framework for management of post-conflict waste in Libya. *European Scientific Journal*. 2017. Vol. 13 (5). P. 32–49. DOI: <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n5p32>
9. Karunasena G., Amaratunga D. Capacity building for post disaster construction and demolition waste management: A case of Sri Lanka. *Disaster Prevention and Management*. 2016. Vol. 25 (2). P. 137–153. DOI: <https://doi.org/10.1108/DPM-09-2014-0172>
10. Singh A. Solid waste management through the applications of mathematical models. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019. Vol. 151. Article 104503. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104503>
11. Barma M., Modibbo U.M. Multiobjective mathematical optimization model for municipal solid waste management with economic analysis of reuse/recycling recovered waste materials. *Journal of Computational and Cognitive Engineering*. 2022. Vol. 1 (3). P. 122–137. DOI: <https://doi.org/10.47852/bonviewJCCE149145>
12. Rosecký M., Šomplák R., Slavík J. et al. Predictive modelling as a tool for effective municipal waste management policy at different territorial levels. *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 286. Article 112584. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112584>
13. Dai C., Li W., Xu L. A two-stage support-vector-regression optimization model for municipal solid waste management – a case study of Beijing, China. *Journal of Environmental Management*. 2011. Vol. 92 (3). P. 302–310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.038>
14. Benítez S.O., Armijo de Vega C., Montoya M.G. Mathematical modeling to predict residential solid waste generation. *Waste Management*. 2008. Vol. 28 (1). P. 7–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.03.020>
15. Jing S., Wang R., Zhao Y. A hybrid inexact optimization approach for solid waste management in the city of Foshan, China. *Journal of Environmental Management*. 2009. Vol. 90 (1). P. 219–227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.09.009>
16. Louis G.E., Shih J.C.H. A flexible inventory model for municipal solid waste recycling. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2007. Vol. 41 (2). P. 127–147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2004.10.008>
17. Lee C.K.M., Lam J.S.L., Lin C. A mathematical model for municipal solid waste management – A case study in Hong Kong. *Waste Management*. 2016. Vol. 58. P. 430–441. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.017>
18. Levis J.W., Barlaz M.A., DeCarolis J.F., Ranjithan R.S. A generalized multistage optimization modeling framework for life cycle assessment-based integrated solid waste management. *Environmental Modelling & Software*. 2013. Vol. 50. P. 51–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.08.007>
19. Mavrotas G., Skoulaxinou S., Gakis N. et al. A multi-objective programming model for assessment the GHG emissions in MSW management. *Waste Management*. 2013. Vol. 33 (9). P. 1934–1949. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.04.012>
20. Hussein Q.A. Sustainable debris management by linear dynamic transportation model. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*. 2024. Vol. 33 (1). P. 17–32.
21. Heydari H., Aghsami A., Rabani M. A mathematical model to optimize debris clearance problem in the disaster response phase: A case study. *Journal of Industrial and Systems Engineering*. 2021. Vol. 14 (1). P. 1–34. DOI: <https://doi.org/10.1001.1.17358272.2021.14.1.1.2>
22. Марцинюк Є.О., Хандогіна О.В. Ключові характеристики відходів від руйнувань та їх врахування в управлінських практиках громад. *Комунальне господарство міст*. 2025. № 2 (190). С. 56–62. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-2-190-56-62>
23. Закон України № 2320-IX «Про управління відходами». 2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text> (дата звернення: 25.06.2025)
24. Bradt D.A. Evidence-based decision-making (Part II): Applications in disaster relief operations. *Prehospital and Disaster Medicine*. 2009. Vol. 24 (6). P. 479–492. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1049023X0000738X>
25. UNDP Ukraine. Strengthening evidence-based recovery in Ukraine. URL: <https://www.undp.org/ukraine/projects/strengthening-evidence-based-recovery-ukraine> (дата звернення: 25.06.2025)

REFERENCES:

- World Bank, European Commission, United Nations, & Government of Ukraine. (2024). *Ukraine: Fourth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4)*. Available at: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099022025114040022/pdf/P180174-ca39eccd-ea67-4bd8-b537-ff73a675a0a8.pdf>
- Gafurova O. V., Novak T. S. (2023). Information on waste generated as a result of war: the issue of legal protection. *Scientific Bulletin of Uzhhorod National University*, no 1 (79), pp. 349–355. DOI: <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2023.79.1.58>
- Purchase C. K., Al Zulayq D. M., O'Brien B. T., Kowalewski M. J., Berenjian A., Tarighaleslami A. H., Seifan M. (2022). Circular economy of construction and demolition waste: A literature review on lessons, challenges, and benefits. *Materials*, no. 15 (1), p. 76. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15010076>
- Kabirifar K., Mojtahedi M., Wang C. C. (2021). A systematic review of construction and demolition waste management in Australia: Current practices and challenges. *Recycling*, no. 6 (2), p. 34. DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling6020034>
- Cudecka-Purina N., Kuzmina J., Butkevics J., Olena A., Ivanov O., Atstaja D. (2024). A comprehensive review on construction and demolition waste management practices and assessment of this waste flow for future valorization via energy recovery and industrial symbiosis. *Energies*, no. 17 (21), 5506. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17215506>
- van den Berg M., Hulsbeek L., Voordijk H. (2023). Decision-support for selecting demolition waste management strategies. *Buildings and Cities*, no. 4 (1), pp. 883–901. DOI: <https://doi.org/10.5334/bc.318>
- Anshassi M., Laux S. J., Townsend T. G. (2019). Approaches to integrate sustainable materials management into waste management planning and policy. *Resources, Conservation and Recycling*, no. 148, pp. 55–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.011>
- Ali A., Ezeah C. (2017). Framework for management of post-conflict waste in Libya. *European Scientific Journal*, no. 13 (5), pp. 32–49. DOI: <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n5p32>
- Karunasena G., Amaratunga D. (2016). Capacity building for post disaster construction and demolition waste management: A case of Sri Lanka. *Disaster Prevention and Management*, no. 25 (2), pp. 137–153. DOI: <https://doi.org/10.1108/DPM-09-2014-0172>
- Singh A. (2019). Solid waste management through the applications of mathematical models. *Resources, Conservation and Recycling*, no. 151, 104503. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104503>
- Barma M., Modibbo U. M. (2022). Multiobjective mathematical optimization model for municipal solid waste management with economic analysis of reuse/recycling recovered waste materials. *Journal of Computational and Cognitive Engineering*, no. 1 (3), pp. 122–137. DOI: <https://doi.org/10.47852/bonviewJCCE149145>
- Rosecký M., Šomplák R., Slavík J., Kalina J., Bulková G., Bednář J. (2021). Predictive modelling as a tool for effective municipal waste management policy at different territorial levels. *Journal of Environmental Management*, no. 286, 112584. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112584>
- Dai C., Li W., Xu L. (2011). A two-stage support-vector-regression optimization model for municipal solid waste management – a case study of Beijing, China. *Journal of Environmental Management*, no. 92 (3), pp. 302–310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.038>
- Benítez S. O., Armijo de Vega C., Montoya M. G. (2008). Mathematical modeling to predict residential solid waste generation. *Waste Management*, no. 28 (1), pp. 7–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.03.020>
- Jing S., Wang R., Zhao Y. (2009). A hybrid inexact optimization approach for solid waste management in the city of Foshan, China. *Journal of Environmental Management*, no. 90 (1), pp. 219–227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.09.009>
- Louis G. E., Shih J. C. H. (2007). A flexible inventory model for municipal solid waste recycling. *Socio-Economic Planning Sciences*, no. 41 (2), pp. 127–147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2004.10.008>
- Lee C. K. M., Lam J. S. L., Lin C. (2016). A mathematical model for municipal solid waste management – A case study in Hong Kong. *Waste Management*, no. 58, pp. 430–441. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.017>
- Levis J. W., Barlaz M. A., DeCarolis J. F., Ranjithan R. S. (2013). A generalized multistage optimization modeling framework for life cycle assessment-based integrated solid waste management. *Environmental Modelling & Software*, no. 50, pp. 51–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.08.007>
- Mavrotas G., Skoulaxinou S., Gakis N., Katsouras V., Georgopoulou E. (2013). A multi-objective programming model for assessment the GHG emissions in MSW management. *Waste management*, no. 33 (9), pp. 1934–1949. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.04.012>
- Hussein Q.A. (2024). Sustainable debris management by linear dynamic transportation model. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, no. 33 (1), pp. 17–32. DOI: <https://doi.org/10.22630/srees.5247>
- Heydari H., Aghsami A., Rabani M. (2021). A mathematical model to optimize debris clearance problem in the disaster response phase: A case study. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, no. 14 (1), pp. 1–34. DOI: <https://doi.org/10.1001.1.17358272.2021.14.1.1.2>
- Martsynyuk Ye., Khandogina O. (2025). Kliuchovi kharakterystyky vidkhodiv vid ruinuva ta yikh vrakhuvannia v upravlinnykh praktykakh hromad [Key characteristics of war-related debris and their implications for local waste management]. *Komunalne hospodarstvo mist*, no. 2 (190), pp. 56–62. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-2-190-56-62> [in Ukrainian].
- Zakon Ukrainy "Pro upravlinnia vidkhodamy" vid 20.06.2022 № 2320-IX [Law of Ukraine "On Waste Management" from 20.06.2022 No. 2320-IX.] (2022). Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text> (accessed June 20, 2025)
- Bradt D. A. (2009). Evidence-based decision-making (Part II): Applications in disaster relief operations. *Prehospital and Disaster Medicine*, no. 24 (6), pp. 479–492. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1049023X0000738X>
- UNDP Ukraine. (n.d.). *Strengthening evidence-based recovery in Ukraine*. Available at: <https://www.undp.org/ukraine/projects/strengthening-evidence-based-recovery-ukraine> (accessed June 25, 2025)