

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО РЕАБІЛІТАЦІЇ ТЕРИТОРІЙ ПІСЛЯ РУЙНУВАННЯ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

*Ган О. В., ст. викл. (каф. ГІ НН ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського,
Н-ДЛПСБТВ ІГМ НАН України);*

Брижко М. В., студ. (гр. ГТ-341мп, НН ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського);

Могильницький Д. О., студ. (гр. ГТ-341мп, НН ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського);

Могильницька К. О., студ. (гр. ГТ-341мп, НН ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського)

Анотація. Проаналізовано екологічні, соціально-економічні та інженерні наслідки руйнування Каховської ГЕС. Розраховано обсяги будівельних відходів, зазначено види забруднення довкілля та запропоновано поетапний інженерно-екологічний план сталого відновлення постраждалої території.

Ключові слова: екологічна катастрофа, будівельні відходи, сталий розвиток, просторове планування, ревайлдизація, гідроенергетика, критична інфраструктура, рекультивація, біорізноманіття, техногенне забруднення, відновлення території.

Abstract. The ecological, socio-economic, and engineering consequences of the destruction of the Kakhovka Hydroelectric Power Plant have been analyzed. The volumes of construction waste were estimated, types of environmental pollution were identified, and a step-by-step engineering and environmental plan for the sustainable restoration of the affected area was proposed.

Keywords: ecological disaster, construction waste, sustainable development, spatial planning, rewilding, hydropower, critical infrastructure, reclamation, biodiversity, technogenic pollution, territory restoration.

Вступ. На початку 2022 року південні регіони України активно розвивали сектор відновлюваної енергетики, зокрема за рахунок використання потенціалу гідроелектростанцій. Однією з ключових ланок енергетичної інфраструктури була Каховська ГЕС – стратегічний об'єкт, що відігравав важливу роль у забезпеченні електроенергією, регулюванні водних ресурсів та підтриманні екосистеми Нижнього Дніпра. Каховська ГЕС відігравала важливу роль у реалізації Україною завдань Європейського Зеленого курсу, прийнятого у 2019 році. Як партнер Європейського Союзу, Україна прагне досягти кліматичної нейтральності до 2060 року та поступово інтегрує положення цього стратегічного документа [1]. Каховська ГЕС була тісно пов'язана з ключовими завданнями Зеленого курсу, такими як:

- розвиток відновлюваних джерел енергії;
- скорочення вуглецевого сліду продукції за допомогою механізму СВАМ (Carbon Border Adjustment Mechanism);
- раціональне управління водними ресурсами відповідно до Водної рамкової директиви ЄС.

Водночас її раптове руйнування внаслідок підриву 6 червня 2023 року спричинило одну з наймасштабніших техногенних і екологічних катастроф в

України. Руйнування греблі спричинило катастрофічні наслідки для довкілля, зокрема знищення водно-болотних угідь, зникнення нерестовищ та місць існування багатьох видів флори і фауни, а також забруднення значних територій токсичними речовинами. Соціально-економічний вплив: тисячі людей втратили житло, зруйновано елементи критичної інфраструктури, зросла загроза епідеміологічної небезпеки, погіршилася якість життя населення. Понад 15 тисяч дворів колгоспників, робітників та службовців, а також більше 3 тисяч будівель різних організацій було переміщено з зони затоплення [2].

В умовах повоєнної відбудови регіону постає необхідність розробки екологічно обґрунтованого плану відновлення.

Аналіз стану питання. Руйнування гідротехнічних споруд, таких як Каховська ГЕС, може відбутись як внаслідок природних чинників, так і під впливом цілеспрямованих дій, зокрема під час воєнних конфліктів. Подібні катастрофи завжди мають комплексні наслідки – екологічні, соціальні, економічні. Подібні ситуації складно передбачити, але важливо заздалегідь визначити алгоритми дій, спрямовані на мінімізацію шкоди, швидке реагування та планування відновлення.

Мета роботи: проаналізувати наслідки руйнування Каховської ГЕС та визначити оптимальний план відновлення території із врахуванням екологічних, соціально-економічних та енергетичних аспектів.

Методики, матеріали і результати досліджень. Нічний підрив греблі Каховської ГЕС російськими окупантами 6 червня призвів до масштабної екологічної катастрофи з непередбачуваними наслідками. Унікальні заповідні території, де мешкали численні види тварин і птахів, в тому числі занесені до Червоної книги, були знищені. У Чорне море хлинув токсичний потік, що містить: не здетоновані міни, тисячі тон хімікатів, забруднений ґрунт, каналізаційні відходи, трупи тварин, вирвані з корінням дерева, отруйні мулові відкладення.

Катастрофа на Каховській ГЕС призвела до осушення близько 80% території, яка раніше була дном водосховища. Це спричинило масову загибель живих організмів, зокрема молюсків, переважно *Dreissena polymorpha*. За деякими оцінками, загальна кількість загиблих молюсків може перевищувати трильйон особин, враховуючи їхню високу щільність (до 10 000 особин на квадратний метр).

Водно-болотні угіддя, які відігравали ключову роль міжнародного значення у підтриманні екосистемного балансу в нижній течії Дніпра, були повністю зруйновані: Архіпелаг Великі і Малі Кучугури (7740,0 га); Заплава Сім Маяків (2140,0 га). Ці угіддя надважливі для збереження водоплавних птахів та інших видів. Національний природний парк «Великий Луг» (площа 16755,00 га) та території Смарагдової мережі (218119,00 га) втратили значну частину своєї природної цінності. У воді й донних відкладах зафіксовано перевищення гранично допустимих концентрацій нафтопродуктів, миш'яку, цинку, міді, кадмію та інших небезпечних сполук.

Внаслідок події була затоплена насосна станція Херсонської теплоелектроцентралі (ТЕЦ) та 162 трансформаторні підстанції. На Миколаївщині постраждали та було підтоплено 2 сонячні електростанції. Постраждало понад 1 000 багатоквартирних будинків та понад 35 000 приватних будинків: внаслідок затоплення вони були пошкоджені або повністю зруйновані. До 290,3 кілометрів доріг у Херсонській області зазнали серйозних пошкоджень [3].

Для оцінки техногенних наслідків, пов'язаних з руйнуванням будівельної конструкції Каховської ГЕС, авторами проведено розрахунок питомої ваги будівельних відходів за формулою:

$$\gamma = \frac{m \cdot g}{V}, \quad (1)$$

де: m – маса будівельних відходів, кг; g – прискорення вільного падіння, 9.8 м/с^2 ; V – об'єм будівельних відходів, м^3 .

Використовуючи середні показники густини залізобетону ($2\,500 \text{ кг/м}^3$) та орієнтовний об'єм зруйнованих конструкцій ($1\,420\,000 \text{ м}^3$), було встановлено, що загальна маса відходів становить близько $3\,550\,000$ тон. Застосувавши класичну формулу розрахунку питомої ваги отримано значення $24\,500 \text{ Н/м}^3$.

Крім власних розрахунків, для перевірки гіпотез і уточнення результатів використано дві зовнішні моделі оцінки: модель ЮНЕП та модель ПРООН [4]. Перша враховує фактор повторного використання матеріалів місцевим населенням у зоні затоплення і дає результат у $1\,077\,000 \text{ м}^3$ відходів. Модель ПРООН, що базується на картографічному аналізі, морфотипах забудови та глибині затоплення, оцінює обсяг будівельного сміття в $2\,894\,000 \text{ м}^3$.

Які ж можливі сценарії відновлення? У липні 2023 року урядом України було затверджено експериментальний проєкт реконструкції Каховського гідровузла. Запропоновано двоетапний підхід: спершу – будівництво тимчасових гребель для стабілізації водного режиму та підтримки роботи Дніпровської ГЕС, далі – демонтаж зруйнованих елементів і проектування нової гідропоруди. Вартість відновлення оцінюється у $0,8\text{--}1,0$ мільярда доларів США, з очікуваним економічним ефектом у межах $1,3\text{--}1,7$ мільярда доларів ВВП.

У довгостроковій перспективі розглядається також альтернативний сценарій – перепрофілювання колишньої території водосховища з відновленням природного русла Дніпра, ревайлдизацією та створенням природоохоронних територій. Такий підхід дозволить уникнути повторного впливу на екосистему, але потребує значних зусиль із рекультивації, збереження підземних вод і створення нової інфраструктури водозабезпечення для сільського господарства.

Авторами запропоновано інженерно-екологічний план відновлення території Каховської ГЕС.

1. Інженерна діагностика та оцінка стану території
 - Проведення топографо-геодезичних і гідрогеологічних обстежень осушеного дна Каховського водосховища.
 - Геохімічне картування забруднення (метали, пестициди, мулові відкладення, та інші забруднюючі речовини).
 - Моніторинг стану інфраструктурних залишків (гребля, шлюзи, насосні станції, зруйновані будівлі та споруди).
 - Оцінка ризиків підтоплень, зсувів, просідань, засолення.
2. Очищення та рекультивація території
 - Збір, сортування, переробка або утилізація будівельних і побутових відходів).
 - Знешкодження небезпечних речовин у ґрунтах і воді (нафтопродукти, важкі метали, хлорорганіка).
 - Формування техногенного ґрунтового покриву на забруднених ділянках.
 - Біоремедіація та фіторемедіація (використання рослин для очищення ґрунтів).
3. Відновлення гідрологічного режиму
 - Будівництво тимчасових гідроспоруд для контролю рівня води у Дніпрі та запобігання ерозії.
 - Створення екологічних шлюзів для підтримки біорізноманіття в заплавах.
 - Проектування регульованої системи водозбору та дренажу з урахуванням кліматичних змін.
4. Інженерні рішення для водозабезпечення
 - Вивчення гідродинаміки підземних вод Причорноморського басейну.
 - Модернізація свердловинного видобутку та створення локальних водоочисних споруд.
 - Інженерне зонування регіону для оптимального використання ресурсів: господарсько-питні, аграрні, технічні.
5. Екологічна інфраструктура та зонування
 - Створення буферних захисних зон між техногенними і природними ділянками.
 - Інженерне проектування екокоридорів для міграції видів.
 - Інтеграція природоохоронних територій до просторового плану регіону (Смарагдова мережа, нацпарки).
 - Впровадження систем утилізації та повторного використання дощових, дренажних і очищених стічних вод.
6. Відновлення агроландшафтів
 - Рекультивація сільськогосподарських угідь із деградованим ґрунтом (глибоке рихлення, внесення гіпсу, мікроелементів).
 - Впровадження крапельного зрошення з контролем сольового балансу.
 - Зонування за придатністю: рослинництво, випас, енергокультури (наприклад, для біомаси).

7. Системи моніторингу та управління

- Встановлення автоматизованих станцій моніторингу якості повітря, ґрунтів і вод.
- Геоінформаційна система (ГІС) для контролю змін землекористування.
- Розробка та реалізація Плану управління ризиками (Risk Management Plan) у разі надзвичайних екологічних ситуацій.
- Проведення екологічного аудиту кожного етапу відновлення.

Руйнування Каховської ГЕС змушує переглянути підходи до просторового планування регіону. Відбудова має ґрунтуватися на принципах сталого розвитку, враховуючи екологічні, соціальні та економічні аспекти, і забезпечувати гармонійне співіснування природних та урбанізованих територій.

Для відновлення балансу між природою та людською діяльністю необхідно створювати природоохоронні зони; розвивати рекреаційні простори; формувати еко-кластери. Важливу роль у цьому процесі має відігравати міжнародне співробітництво. Необхідно залучати іноземні інвестиції, брати участь у міжнародних екологічних програмах та використовувати передовий світовий досвід у сфері відновлення територій, постраждалих від техногенних катастроф. Це допоможе розробити та впровадити інноваційні рішення для збереження довкілля [2].

Висновки. Для зменшення наслідків руйнування Каховської ГЕС необхідно передбачити заходи, спрямовані на:

- екологічну реабілітацію території, включаючи очищення ґрунтів і вод;
- технічне відновлення гідротехнічних споруд із урахуванням принципів сталого розвитку;
- забезпечення водозабезпечення та відновлення сільського господарства.

У роботі проаналізовано екологічні та соціально-економічні наслідки катастрофи, розраховано обсяги будівельних відходів та запропоновано план відновлення. Запропоновано інженерно-екологічний план відновлення території з адаптацією до сучасних викликів і довгостроковою стійкістю території.

Література

1. Філь А. (2021) Україна планує стати кліматично нейтральною до 2060 року. *У форуці*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dw.com/uk/ukraine-planuie-dosiahty-klimatychnoi-neitralnosti-do-2060-roku-zelenskyi/a-59689062> (дата звернення: 12.04.2025).

2. Truth Hounds. Дослідження руйнування Каховської греблі та його наслідки для екосистеми, аграріїв, цивільного життя та міжнародного правосуддя [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://truth-hounds.org/cases/voyennyj-zlochyn-proty-dovkilliya-prychyny-ta-naslidky-znyshhennya-кахovskoyi-ges/> (дата звернення: 12.04.2025).

3. Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на початок 2024 року. (2024) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.unep.org> (дата звернення: 14.04.2025).

4. ЮНЕП (Програма ООН з навколишнього середовища). Оцінка відходів після руйнування Каховської ГЕС [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.unep.org> (дата звернення: 14.04.2025).