

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ





ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ

№8, 2025

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Заснований у 2019 році

Виходить 2 рази на рік

Редакційна колегія:

Головний редактор

Маркіна Людмила Миколаївна

Доктор технічних наук

Науковий редактор

Машков Олег Альбертович

Доктор технічних наук

Редакційна колегія:

Гудков Д. І.

Доктор біологічних наук

Дудар Т. В.

Доктор технічних наук

Єрмаков В. М.

Доктор технічних наук

Ісаєнко В. М.

Доктор біологічних наук

Кватернюк С. М.

Доктор технічних наук

Ліханов А. Ф.

Доктор біологічних наук

Лукашов Д. В.

Доктор біологічних наук

Луньова О. В.

Доктор технічних наук

Мадж С. М.

Доктор технічних наук

Маркіна Л. М.

Доктор технічних наук

Міхеев О. М.

Доктор біологічних наук

Ольховик Ю. О.

Доктор технічних наук

Павличенко А. В.

Доктор технічних наук

Петрук В. Г.

Доктор технічних наук

Петрук Р. В.

Доктор технічних наук

Проскурнін О. А.

Доктор технічних наук

Риженко Н. О.

Доктор біологічних наук

Степова О. В.

Доктор технічних наук

Фролов В. Ф.

Доктор технічних наук

Шматков Г. Г.

Доктор біологічних наук

Літературний редактор (англійська мова)

Іващенко Катерина Тарасівна

Відповідальний редактор, науковий співробітник

Власенко Олег Васильович

ЗАСНОВНИК:

Корпорація «Науково-виробниче об'єднання
«Технології захисту довкілля»»

Науковий парк «ЧОРНОБИЛЬ»

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу
масової інформації КВ № 23757-13597Р від 20.02.2019 р.

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань
України категорії «Б» (Галузь науки біологічні, технічні.
Спеціальність 101, 183) наказ МОН України №894 від
10.10.2022 р.

ISSN: 2707-7993

**Метою видання наукового журналу є висвітлення
питань екологічної безпеки, технологій захисту довкілля,
екологічного менеджменту та аудиту, біологічної безпеки
та охорони навколишнього природного середовища.**

Рекомендовано до друку науково-технічною радою
Корпорації «Науково-виробниче об'єднання «Технології
захисту довкілля»». Підписано до друку 14.06.2025 р.

Адреса редакції:

Вул. Вознесенський узвіз 10а, прим. 602. м. Київ, 04055

Тел: +380980625787

(контактна особа-Печений Володимир)

Електронна скринька: Corporation_office@ukr.net

Веб-сайт: <https://corpecotech.com.ua>

Видавництво ТОВ «Основа»

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи

до Державного реєстру видавців

ДК №1981 від 21.10.2004 р.

01032, м. Київ-32, вул. Жилянська, 87/30.

Тел.: (044) 584-38-97, 584-38-95(96).

Формат 60x84/8

Наклад 100 прим.

Відповідальність за достовірність фактів, цитат, власних імен, географічних назв, назв підприємств, організацій, установ та іншої інформації
несуть автори статей.

Висловлені в статтях думки можуть не збігатися з точкою зору редакційної колегії і не покладають на неї жодних зобов'язань.

Відповідальність за добір і викладення фактів несуть автори.

У разі передрукування матеріалів письмовий дозвіл автора та редакції є обов'язковим.

© Екологічна безпека

та технології захисту довкілля, 2025

ЗМІСТ

ГЕТЬМАН Б.А., ВОЛОШИНА Н.О	ВПРОВАДЖЕННЯ АСПРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ СТАНЦІЇ РОЗВАНТАЖЕННЯ АВТОМОБІЛІВ НА ЕЛЕВАТОРІ	4
ІЗМОДЕНОВА Т.І., ГУРЕЦЬ Л.Л.	УТИЛІЗАЦІЯ ЗОЛИ РЕШТОК СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ РОСЛИН ШЛЯХОМ ЗАЛУЧЕННЯ ЇЇ У ВИРОБНИЦТВО ДОБРІВ	13
ПАВЛЮХ Л.І., МИХАЛЬЧУК І.В., АВРАМЕНКО О.Ю.	РЕЗИЛЬЄНТНІСТЬ ТЕРИТОРІЙ ПІВДНЯ УКРАЇНИ ПІСЛЯ РУЙНУВАННЯ КАХОВСЬКОЇ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ	21
МУДРАК О., МАЛЯР О., МУДРАК Г., МОРОЗОВА Т.	НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ КУЛЬТУРИ МОЛОДІ В КОНТЕКСТІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ	30
FROLOV V., STEPONA O., ILLIASH O. <i>Стаття англійською мовою</i>	METHODOLOGY FOR DETERMINING THE PHYSICAL PARAMETERS OF WASTEWATER	36
ГРИЦУЛЯК Г.М., КАЧАЛА С.В., ВОЛОШИН Ю.Д., ЛОПУШНЯК В.І., ФОМІЧОВА О.В.	ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЙ УЛОВЛЮВАННЯ ТА УТИЛІЗАЦІЇ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН	42
ПОКШЕВНИЦЬКА Т.В.	МЕТОД БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНИХ АЛЬТЕРНАТИВ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД У ПРОЦЕДУРІ ОЦІНКИ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ	48
СТЕПОВИЙ Є.Б.	РОЗРАХУНОК ГЛИБИНИ КОРОЗІЇ СТАЛЕВОГО ТРУБОПРОВОДУ В УМОВАХ ПЕРІОДИЧНОГО ВПЛИВУ РОЗЧИНІВ ЕЛЕКТРОЛІТІВ	56
ГРИЦУЛЯК Г.М., КОЦЮБИНСЬКИЙ А.О., ЛИННИК Д.О., ГРИЦУЛЯК В.М., ФОМІЧОВА О.В., КАЧАЛА С.В.	РИЗИКИ ДЕГРАДАЦІЇ ҐРУНТІВ У СИСТЕМІ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ІВАНО-ФРАНКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ	63
ЧЕРНЯК Л.М., КОНДАКОВА Т.С., ДМИТРУХА Т.І., МАНЄЦКІ ТОМАШ., ЛАПАНЬ О.В.	РОЛЬ ТРАВЯНИСТИХ ПОКРИТТІВ АЕРОДРОМІВ У ЗБЕРЕЖЕННІ ТА ВІДНОВЛЕННІ ҐРУНТІВ ЗАБРУДНЕНИХ НАФТОПРОДУКТАМИ	72
РЕДЬКО А.І., АДАМЕНКО Я.О	СОНЯЧНІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЕКОЛОГІЧНОЇ РЕВІТАЛІЗАЦІЇ ВІДПРАЦЬОВАНИХ КАР'ЄРІВ	80
ГРИЦУЛЯК Г.М., КАЧАЛА С.В., ШИМАНСЬКИЙ В.Я., ФОМІЧОВА О.В., КАЛИН Т.І.	ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРФОРАЦІЇ ВЕРДЛОВИН: ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ	90
ГРИЦУЛЯК Г.М., КОЦЮБИНСЬКИЙ А.О., ЛИННИК Д.О., КАЧАЛА С.В., ФОМІЧОВА О.В., ЛОПУШНЯК В.І.	ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ВПЛИВУ АВТОТРАНСПОРТУ НА СТАН АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ М. ІВАНО-ФРАНКІВСЬК	97
ПОПОВ О.О., КОЧЕЛАБ Є.В., ПИЛИПЧУК Є.В., СІДЕЛЬОВ А.В., ТОЛСТОЙ І.А.	ОЦІНКА ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ ҐРУНТОВОЇ ТОВЩІ З НЕОДНОРІДНИМ РОЗПОДІЛОМ РАДІОНУКЛІДІВ ЗА ГЛИБИНОЮ	107

ЯЦИШИН А.В., КОВАЧ В.О., КУБРАК Ю.О., ЛЕВЧЕНКО А.Ю., КОВАЛЕНКО О.М.	РОЗВИТОК ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ ХІМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ АЕС ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ВІДПОВІДНОСТІ МІЖНАРОДНИМ СТАНДАРТАМ	116
КОЦЮБИНСЬКИЙ А.О., ЛИННИК Д.О., ГРИЦУЛЯК Г.М., ЗАПУХЛЯК Н.М., КАЧАЛА С.В., ФОМІЧОВА О.В.	ПЕРСПЕКТИВИ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ	125
РЕДЬКА І.М., ВОЛОШИНА Н.О.	МАЛІ МОДУЛЬНІ ЯДЕРНІ РЕАКТОРИ В УКРАЇНІ: ЕКОЛОГІЧНИЙ КОНТЕКСТ	133
ФАРРАХОВ О.В., ХАПКО Ю.Б., КУЦЕНКО В.О., МАРТИНЮК І.Д., ЧИМБАЙ М.В.	ЕКОЛОГІЧНІ ПЕРЕВАГИ ВПРОВАДЖЕННЯ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ У КОНТЕКСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ	139
МАШКОВ О.А., МАРКІНА Л.М., ПРИСЯЖНИЙ В.І., ОВОДЕНКО Т. .	КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ АПАРАТ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ШТУЧНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТІВ	149
КОЦЮБИНСЬКИЙ А.О., ЛИННИК Д.О., ГРИЦУЛЯК Г.М., ЗАПУХЛЯК Н.М., КАЧАЛА С.В., ФОМІЧОВА О.В.	ІНТЕГРОВАНІ СТРАТЕГІЇ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНИМИ РИЗИКАМИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КЛІМАТИЧНОЇ НЕЙТРАЛЬНОСТІ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ	156
ГРИЦУЛЯК Г.М., КОЦЮБИНСЬКИЙ А.О., ЛИННИК Д.О., КАЧАЛА С.В., ЛОПУШНЯК В.І.	ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ЧЕРЕЗ ВПРОВАДЖЕННЯ ШІ СИСТЕМ	164
ЛИННИК Д.О., МАРИЧ В.М., КАЛИН Т.І., КОЦЮБИНСЬКИЙ А.О., ЗАРІЦЬКИЙ В.Б.	ОЦІНКА ВПЛИВУ АНТРОПОГЕННОЇ ДІЯЛЬНОСТІ НА БІОРІЗНОМАНІТТЯ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ	171
ГРИЦУЛЯК Г.М., КАЧАЛА С.В., ЛОПУШНЯК В.І., ФОМІЧОВА О.В., КОЦЮБИНСЬКИЙ А.О.	ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ В УПРАВЛІННІ ЕКОЛОГІЧНИМИ РИЗИКАМИ	178
ЄРМАКОВ В.М., ЯКОВЛЄВ Є.О., ЧУМАЧЕНКО С.М., ГОНЧАРЕНКО І.О., СОКОЛОВ Є.В.	НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ВИКОРИСТАННЯ ШАХТНИХ ВОД ДОНБАСУ ЯК ДЖЕРЕЛА ПИТНО-ГОСПОДАРСЬКОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ ВОЄННИХ ДІЙ	185
МАРКІНА ЛЮДМИЛА, КОВАЛЕНКО ДАНИЇЛ, ВЛАСЕНКО ОЛЕГ	ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ГАЗИФІКАЦІЇ В МАЛОГАБАРИТНИХ ГАЗОГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВКАХ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ	202
ЛАТУША Д.Р., МАКСИМЕНКО М.П., КВАТЕРНЮК С.М., ПЕТРУК В.Г.	КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ АГРАРНОГО ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ В СИСТЕМІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ	208
МАРКІНА Л.М. РИЖОВ Г.О.	ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ УТИЛІЗАЦІЇ НАФТОШЛАМІВ І БУРОВИХ ШЛАМІВ У НАФТОГАЗОВІЙ ГАЛУЗІ	218

ВПРОВАДЖЕННЯ АСПІРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ СТАНЦІЇ РОЗВАНТАЖЕННЯ АВТОМОБІЛІВ НА ЕЛЕВАТОРІ IMPLEMENTATION OF DUST COLLECTION SYSTEM FOR AN ELEVATOR UNLOADING STATION

Гетьман Б. А., Волошина Н. О.
Український державний університет
імені Михайла Драгоманова
n.o.voloshyna@udu.edu.ua

Анотація

Стаття присвячена впровадженню аспіраційної системи на лінійному зерновому елеваторі ємністю 80 000 т (продуктивність 100 т/год) для видалення пилу під час розвантаження зерна з автомобілів у два приймальних бункери станції розвантаження автомобілів (СРА). Встановлена система (загальний об'єм повітря 84 000 м³/год, потужність 66 кВт) складається з дванадцяти аспіраційних рукавних фільтрів типу «аспіраційна шафа» (по шість комплектів на кожен приймальний бункер) з імпульсною регенерацією (ефективність 99,99 % для частинок ≥ 2 мкм). Вимірювання показали зниження концентрації пилу з 11 г/м³ до 0,2 г/м³ в зоні розвантаження та 1-4 мг/м³ в робочих зонах приміщення СРА, при цьому викид після фільтрів не перевищує 10 мг/м³. Це рішення суттєво зменшило втрати зернового пилу (повернення продукту в технологічний процес) та знизило вибухонебезпечну концентрацію пилу (класифікація АТЕХ змінена з Зони 20+21 до Зони 21+22). Проектування виконано за методикою Industrial Ventilation (30-е вид.), відповідно до вимог стандартів ДСТУ EN 1127-1, ДСТУ ІЕС 60079-10-2 та законодавства ТР №1055,

НПАОП 0.00-7.23-23. Отримані результати продемонстрували підвищення екологічної безпеки, покращення умов праці, зниження ризику вибуху та економічні переваги від реалізації системи.

Ключові слова: аспірація, пил, зерновий елеватор, приймальний бункер, вибухонебезпечна зона, фільтрація, охорона праці.

Hetman B.A., Voloshyna N.O. Mykhailo Dragomanov Ukrainian State University Postgraduate Student, Department of Ecology and Tourism

Abstract

The article is devoted to the implementation of an dust collection system on a linear grain elevator with a capacity of 80,000 tons (capacity 100 tons/hour) for dust removal during the unloading of grain from cars into two receiving hoppers of the car unloading station (CRA). The installed system (total air volume 84,000 m³/hour, power 66 kW) consists of twelve aspiration bag filters of the «dust collection wall» type (six sets for each receiving hopper) with pulse regeneration (efficiency 99.99% for particles ≥ 2 microns). Measurements showed a decrease in dust concentration from 11 g/m³ to 1 g/m³ in the unloading

zone and 1-4 mg/m³ in the working areas of the CRA premises, while the emission after the filters does not exceed 10 mg/m³. This solution significantly reduced grain dust losses (product return to the technological process) and reduced explosive dust concentrations (ATEX classification changed from Zone20+21 to Zone21+22). The design was performed using the Industrial Ventilation (30th edition) methodology and in accordance with the requirements of DSTU EN 1127-1 [1], DSTU IEC 60079-10-2 and legislation TR No. 1055, NPAOP 0.00-7.23-23. The results obtained demonstrated increased environmental safety, improved working conditions, reduced explosion risk and economic benefits from the implementation of the system.

Keywords: dust collection system, dust, grain elevator, receiving pit, hazardous area, filtration, occupational safety.

Постановка проблеми

Розвантаження зерна з автомобілів на елеваторі призводить до викиду значної кількості зернового пилу, що негативно впливає на довкілля та створює вибухонебезпечну атмосферу. Актуальним завданням є зниження запиленості до безпечних рівнів, що стало основою для наукових досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У профільній літературі та стандартах [1] підкреслюється важливість локальної аспірації на зернових підприємствах. Використання точкових рукавних фільтрів [14] є одним із найефективніших рішень для уловлювання пилу під час прийому зерна. Інженерні довідники Industrial Ventilation [9] та Handbook of Environmental Engineering [12] описують методики визначення швидкості уловлювання пилу та розрахунку необхідної витрати повітря. Зокрема, введено поняття «повітряно-тканинне відношення» (Air-to-Cloth Ratio) – відношення об'ємної витрати повітря до площі фільтрувальних елементів, яке використовують для розрахунку необхідної площі фільтрації в аспіраційних фільтрах.

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є процес приймання

зерна на лінійному зерновому елеваторі ємністю 80 тис. тонн і роботою транспортного обладнання з продуктивністю 100 т/год, який супроводжується інтенсивним пиловиділенням. Без аспірації концентрація пилу у приміщенні СРА при послідовному прийманні зернових може накопичуватись та сягати 35 г/м³, що значно перевищує гранично допустимі значення. Предметом дослідження є аспіраційна система приймального бункера, зокрема її конструкція, розрахункові параметри та вплив на рівень запиленості і вибухонебезпечності в робочій зоні.

Методи дослідження

У роботі використано розрахунково-аналітичні методи проектування аспіраційних систем та експериментальні вимірювання запиленості повітря. Проектні розрахунки виконано за рекомендаціями довідників з промислової вентиляції та контролю забруднень повітря [9], з урахуванням стандартів вибухозахисту [1]. Вимірювання концентрації пилу проводились вже з застосуванням Flap-системи [17], до та після запуску системи аспірації з використанням сертифікованих приладів.

Опис об'єкта

Розглядається лінійний зерновий елеватор (склад зерна), що включає приміщення станції розвантаження автотранспорту (СРА) із двома приймальними бункерами довжиною 20 м кожен та шириною 4,5 м. Падіння зерна з кузова автомобіля у бункер з висоти 2 м є основним джерелом утворення пилу. Отримані значення підтвердили, що без систем аспірації концентрація пилу в цьому приміщенні може досягати 35 г/м³, що створює небезпеку вибуху та перевищує норми щодо пилу у повітрі робочої зони.

Проектування аспіраційної системи. Методика розрахунку

Задачею було забезпечити ефективне видалення пилу з приміщення СРА яке містить два приймальні бункери довжиною 20 м кожний. Встановити аспірацію уздовж усього бункера довжиною 20 м було б дуже затратно з точки зо-

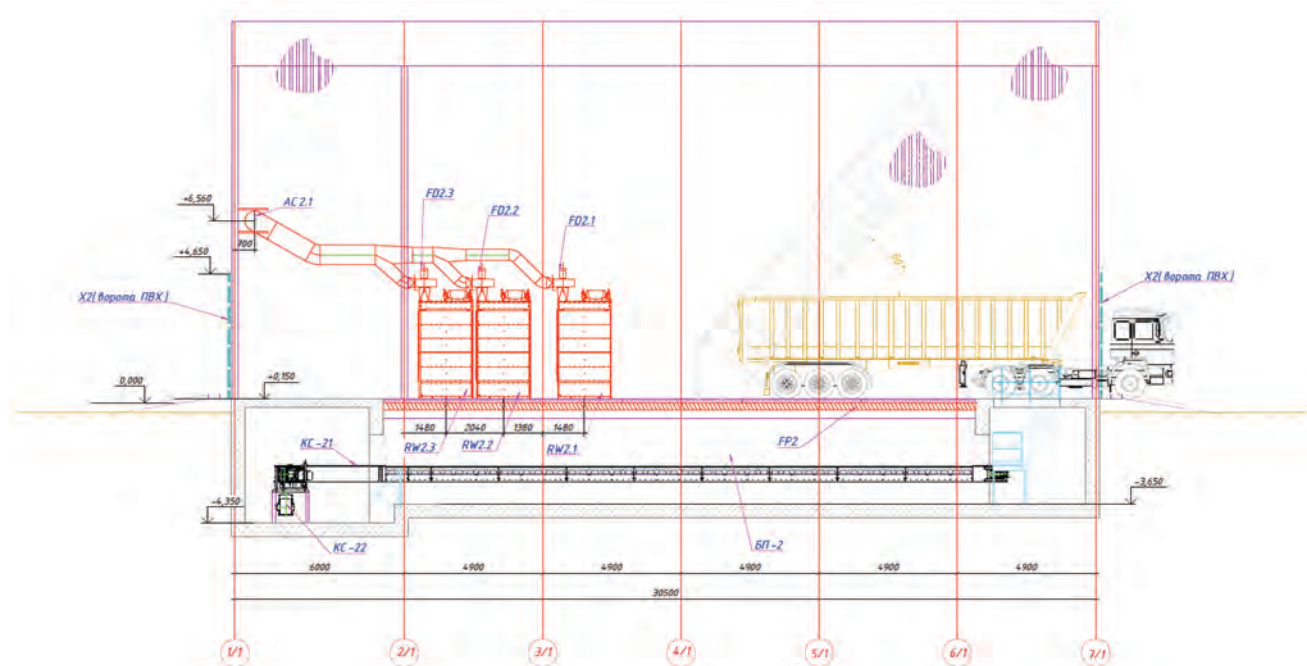


Рисунок 1. Приймальний бункер зі встановленою Flap-системою (герметизація верхньої частини бункера для локалізації пилу); розробка автора

ру інвестицій та вартості експлуатації. Для зменшення зони пиловиділення, верхня частина бункерів була обладнана Flap-системою (FP1, FP2) [рис. 2], які герметизують бункер і локалізують зону виділення пилу з зони всього бункеру до зони падіння зерна. Це рішення дозволило зменшити зону аспірації з 20 м до локальної ділянки 4 м (зона падіння матеріалу).

Для отриманої локальної зони пиловиділення розмірами 4×4×2 м було проведено розрахунок необхідного об'єму повітря. Через відсутність прямих рекомендацій саме для такого процесу, використано комбінацію емпіричних формул з посібників з промислової вентиляції [9] та галузевих стандартів [1]. Зокрема, об'єм відсмоктуваного повітря визначено за формулою:

$$Q = V_t \times D \times W \left(\frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right)$$

Де: Q ($\text{м}^3/\text{с}$) – необхідний об'єм повітря для видалення пилу; W (м) – ефективна довжина зони видалення пилу; V_t ($\text{м}/\text{с}$) – швидкість повітряного потоку в зоні уловлювання пилу; D_{tank} (м) – ширина приймального бункера.

Довжину зони уловлювання пилу W визначили як $\sim 1,5$ довжини зони пиловиділення, тобто:

$$W \approx 1,5W_{\text{dr}}$$

Де: W_{dr} (м) – зона виділення пилу = 4.

Швидкість уловлювання пилу V_t прийнята згідно з рекомендованими значеннями для пилових викидів з низькою швидкістю виділення (0,48 м/с) [9]. Підставивши значення, отримуємо необхідну витрату повітря на один бункер

$$Q = V_t \times D \times W = 0,48 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right) \times 4 (\text{м}) \times 6 (\text{м}) = 11,52 \left(\frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right) \times 60 = 691,1 \left(\frac{\text{м}^3}{\text{хв}} \right)$$

Приймаємо $Q = 700$ ($\text{м}^3/\text{хв}$) = 42 000 ($\text{м}^3/\text{год}$) для одного бункеру і 84 000 $\text{м}^3/\text{год}$ для двох бункерів відповідно.

Наступним кроком був розрахунок мінімальної необхідної площі фільтрації для забезпечення ефективної фільтрації цього об'єму повітря. Розрахунок виконано за формулою з довідника Environmental Engineering [12]:

$$S = \frac{Q}{ACR} \times F (\text{м}^2)$$

Де: S (м^2) – необхідна мінімальна площа фільтраційної поверхні; ACR ($\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{хв}$) – рекомендоване повітряно-тканинне навантаження (Air-to-Cloth Ratio); F – поправковий коефіцієнт, що враховує специфіку процесу.

Значення ACR обрано 5 $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{хв}$ для зернового пилу (згідно з типу фільтру «аспіраційна

шафа» [14]. Поправковий коефіцієнт визначено як добуток факторів, що враховують особливості пилу та режиму роботи:

$$F = F_S \times F_L \times F_T \times F_A$$

Де: F_S – коефіцієнт за розміром часток пилу ($=1,2$); F_L – за пиловим навантаженням ($=0,9$); F_T – за температурою ($=1$); F_A – за характером технологічного процесу ($=1$) [14].

Підставивши коефіцієнти, отримуємо $F = 1,08$. Таким чином, мінімально необхідна площа фільтрації для одного приймального бункеру складає

$$S = \frac{700 \text{ (м}^3/\text{хв)}}{5 \text{ (м}^3/\text{м}^2/\text{хв)} \times 1,08} = 129 \text{ (м}^2\text{)}$$

Отримане значення визначає мінімальну необхідну площу фільтрації аспіраційної системи для одного приймального бункеру СРА.

Вибір обладнання. Аспіраційні фільтри

На основі виконаних розрахунків було обрано конфігурацію аспіраційної системи. Фільтри повинні охоплювати ефективну довжину зони уловлювання пилу $W = 6$ м. Проаналізувавши модельний ряд рукавних фільтрів типу «аспіра-

ційна шафа» PULCO AIR NSFS, зупинилися на шести фільтрах моделі NSFS 02×1225 [14]. Кожен фільтр має площу фільтрації 23 м². Фільтри встановлено по 3 штуки з кожного боку приймального бункеру в зоні падіння матеріалу [рис. 1], сумарно 6 фільтрів із загальною площею фільтрації 138 м².

Вибір обладнання. Вентилятори

Для відводу повітря від кожного фільтра підібрано окремий радіальний вентилятор. Виходячи з необхідної продуктивності 7000 м³/год на фільтр (42 000 м³/год / 6) та враховуючи аеродинамічний опір фільтра, повітроводів і вентиляційних решіток (1800 Па), обрано вентилятори моделі RH 400/2 потужністю 5,5 кВт кожен [11].

Вибір обладнання

Вентиляційні решітки притоку. Оскільки очищене фільтрами повітря викидається назовні будівлі, а відбирання відбувається з майже герметичного приміщення, необхідно компенсувати приплив повітря. Було передбачено 20 решіток розміром 1000×1000 мм, сумарною пропускною здатністю 84 000 м³/год [Рис. 2].

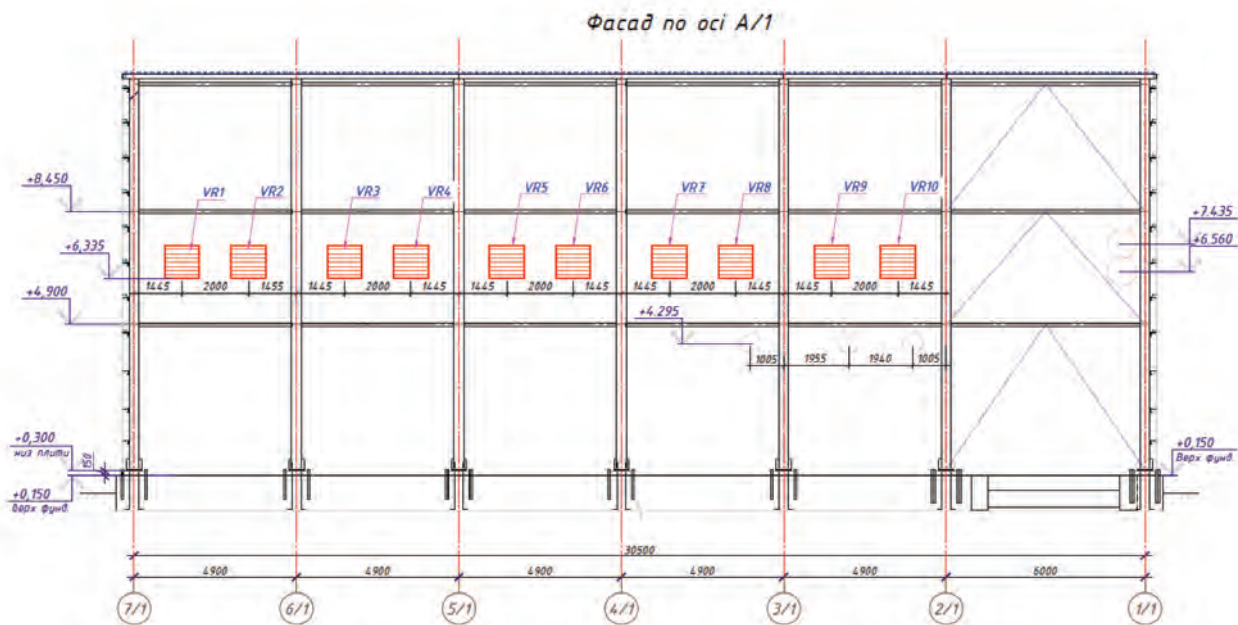


Рисунок 2. Розташування припливних вентиляційних решіток (VR1–VR10) на фасаді будівлі; розробка автора

Таблиця 1

Основні елементи аспіраційної системи СРА; розробка автора.

№	Позначення	Обладнання (характеристики)	К-ть	Виробник
1	RW1.1–RW1.6, RW2.1–RW2.6	Рукавний фільтр NSFS 02×1225 Типу аспіраційна шафа, 24 рукави L=2500 мм, площа фільтрації 23 м², ACR 5 м³/м²·хв, ефективність 99,99 % (≥ 2 мкм), Ex II 3D	12	TAMAAERNOVA (Італія) [11]
2	FD1.1–FD1.6, FD2.1–FD2.6	Вентилятор RH 400/2 Q=7000 м³/год, P=1850 Па, двигун 5,5 кВт, 3000 об/хв, Ex II 3D	12	MZ Aspiratori (Італія) [9]
3	FP1, FP2	Flap-система Розмір 20×4,5 × 0,4 м, сталь оцинк., мембрана ПУ антистат.	2	ТОВ «ЗЕО» (Україна) [14]
4	VR1–VR20	Вентиляційна решітка EPD-U Розмір 1000×1000 мм, сталь – приплив повітря	20	ТОВ «ТЕКО» (Україна) [6]

Реалізація проєкту. Комплектація системи

Реалізована система аспірації включає наступні основні компоненти (табл. 1). Фільтри та вентилятори сертифіковані для використання у пилових вибухонебезпечних середовищах. Flap-система виготовлена з оцинкованої сталі з антистатичними поліуретановими мембранами, призначена для утримання пилу в бункерах та уникненню накопичення статичних зарядів. Вентиляційні решітки забезпечують необхідний притік повітря.

Реалізація проєкту. Схема аспірації

Аспірація двох приймальних бункерів розділена на 8 автономних аспіраційних підсистем, відповідно до кількості точок викиду повітря. На рисунку 3 показано розташування кожної підсистеми (позначення AC – аспіраційна система, FD – вентилятор, RW – рукавний фільтр, номери 1.x та 2.x для першого і другого бункера). На рисунку 3 наведено план розташування аспірації, видно, що вздовж кожного з двох бункерів роз-

ташовані по три фільтри (RW) з вентиляторами (FD) і повітропроводами. Фільтри встановлені на фундаменті з обох боків бункерів, щоб не заважати проїзду транспорту.

Результати. Зменшення запиленості повітря

Запуск системи аспірації СРА показав досягнення значного зниження пилових концентрацій. До запуску аспірації концентрація пилу безпосередньо перед фільтрами становила 4-11 г/м³, тоді як після запуску лише 0,2 г/м³. Це означає зниження концентрації в зоні виділення пилу в 55 разів, тобто ефективність аспірації на рівні 98 %. А концентрація пилу за межами зони виділення пилу 1-4 мг/м³, що відповідає вимогам ГДК в робочій зоні. Викид пилу з фільтрів не перевищує 10 мг/м³.

Результати. Зниження небезпеки вибуху

Важливим результатом є зміна класифікації вибухонебезпечної зони приміщення СРА. Використання Flap-системи та аспірації знизило

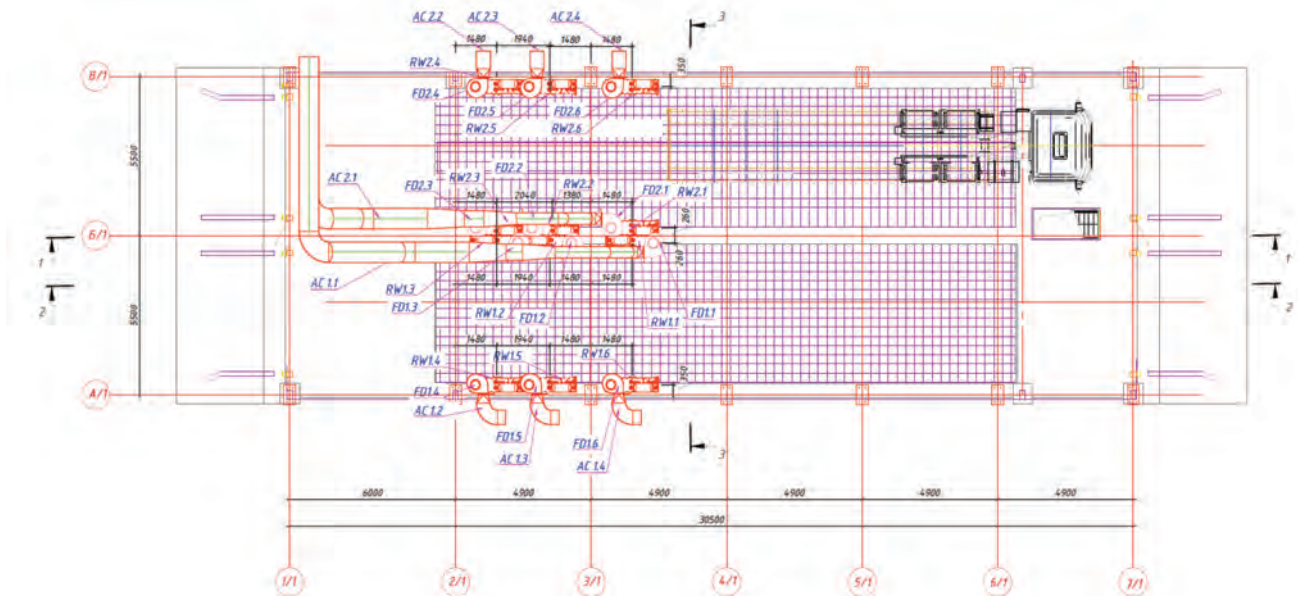


Рисунок 3. Встановлення аспіраційних систем – план CPA на відм. +0,150 м; розробка автора

рівень вибухонебезпечної з Зони 20 + 21 (рис. 4) до локальної Зони 21 + зона 22 (рис. 5). Це значно зменшує ризик вибуху пилу та вартість електричних приладів в приміщенні CPA в 1,5-2,5 рази.

Результати. Економічний ефект

Слід зазначити і економічні наслідки, установка системи аспірації дозволяє повертати в технологічний процес весь уловлений пил а не втра-

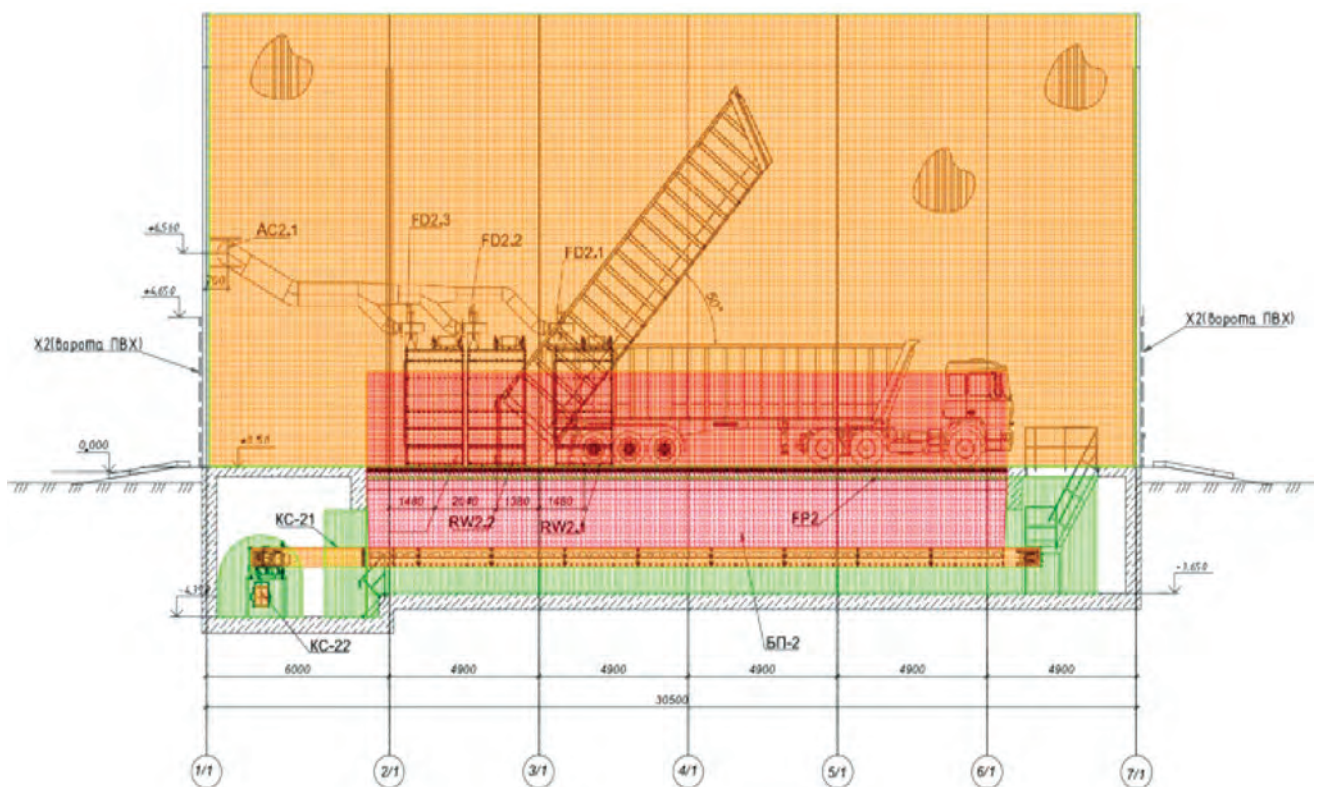


Рисунок 4. Класифікація вибухонебезпечних зон без аспірації та Flap-системи (червоний – Зона 20, помаранчевий – Зону 21, зелений – Зона 22); розробка автора

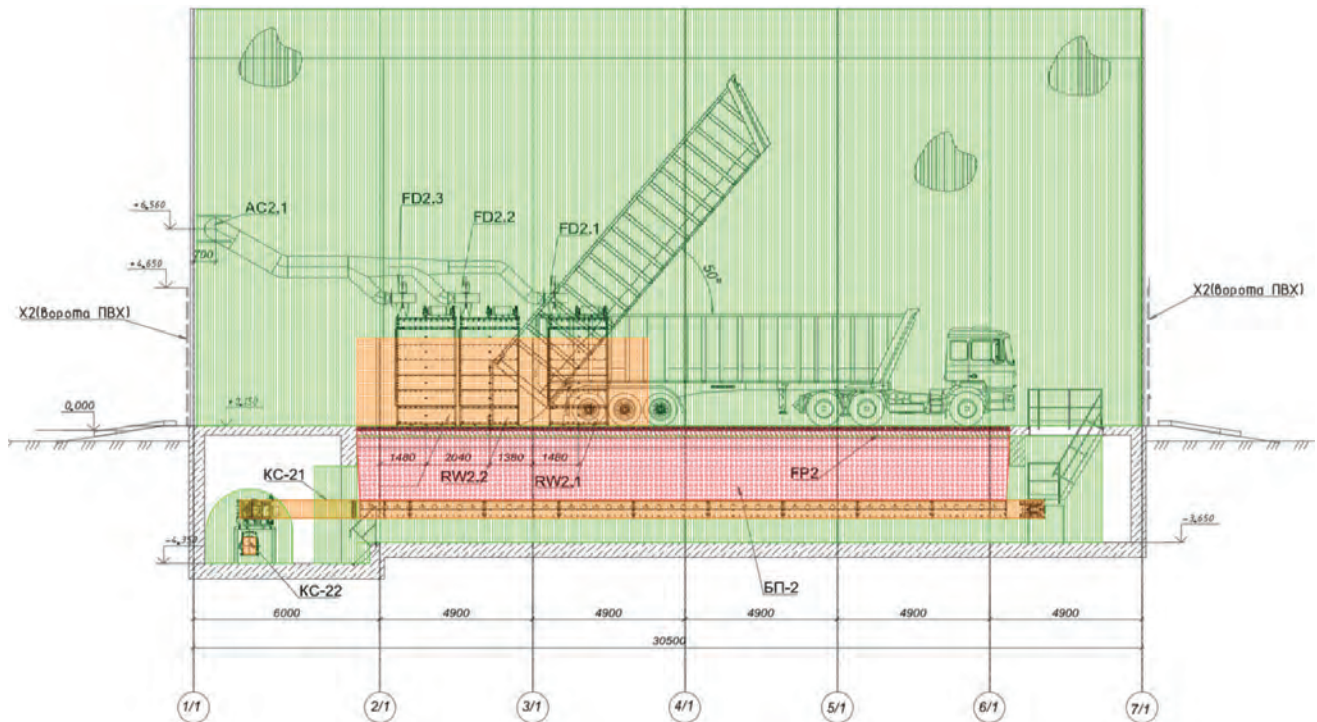


Рисунок 5. Класифікація вибухонебезпечних зон з аспірацією та Flap-системою (червоний – Зона 20, помаранчевий – Зону 21, зелений – Зона 22)

чати його у вигляді забруднення підприємства. Це дозволяє на наступних етапах технологічного процесу сепарувати пил від зерна та використати його у виробництві комбікормів, а також виключити затрати на прибирання.

Перспективи подальших досліджень

Надалі планується проведення довготривалої оцінки роботи встановленої аспіраційної системи (моніторинг протягом повного виробничого сезону). Цікавим напрямком є дослідження ефективності систем аспірації на інших вузлах елеватора – наприклад, на норіях (елеваторах) чи транспортерних галереях, де також виникають пилові викиди. Перспективним є поєднання аспірації з іншими технологіями герметизації, такими як Flap-система. Подальші дослідження можуть бути спрямовані і на автоматизацію контролю запиленості (встановлення датчиків пилу, систем онлайн-моніторингу) для забезпечення автоматичного регулювання роботи аспіраційної системи для економії електроенергії.

Список використаної літератури

1. ДСТУ EN 1127-1:2020 Вибухонебезпечне середовище. Запобігання вибухам та захист від вибухів. Частина 1. Основні концепції та методологія (EN 1127-1:2019, IDT). [Чинний від 01.04.2021]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 86 с.
2. ДСТУ EN 60079-10-2:2022 Вибухонебезпечні атмосфери. Частина 10-2. Класифікація зон. Вибухонебезпечні пилові середовища (EN 60079-10-2:2015, IDT; IEC 60079-10-2:2015, IDT). [Чинний від 01.07.2020]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 54 с.
3. ДСТУ EN ISO 80079-36:2017. Середовища вибухонебезпечні. Частина 36. Неелектричне устаткування для вибухонебезпечних атмосфер. Основний метод і вимоги (EN ISO 80079-36:2016, IDT; ISO 80079-36:2016, IDT). [Чинний від 01.07.2018]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 84 с.
4. ДСТУ EN ISO 80079-37:2017 Середовища вибухонебезпечні. Частина 37. Неелектричне устаткування для вибухонебезпечних атмосфер. Неелектричний ступінь захисту за допомогою конструкційної безпеки с, керування джерелом

займання b, занурення в рідину k (EN ISO 80079-37:2016, IDT; ISO 80079-37:2016, IDT). [Чинний від 01.07.2018]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 56 с.

5. ДСТУ EN ISO/IEC 80079-20-2:2019 Вибухонебезпечні середовища. Частина 20-2. Характеристики речовин. Методи випробування горючого пилу (EN ISO/IEC 80079-20-2:2016; AC:2017, IDT; ISO/IEC 80079-20-2:2016; Cor 1:2017, IDT). [Чинний від 01.07.2020]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 64 с.

6. ТЕКО Україна. Зовнішня вентиляційна решітка EPD-U. [Електронний ресурс]. URL: <https://teko-ua.com/ua/naruzhnaya-ventilyacziionnaya-reshetka-epd-u.html> (дата звернення: 01.11.2025).

7. МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ. Наказ « Про затвердження Мінімальних вимог щодо безпеки та здоров'я працівників, які потенційно зазнають ризику у вибухонебезпечних середовищах» від 09.04.2023 № 2259. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0967-23#Text> (дата звернення: 01.11.2025).

8. Постанова Кабінету Міністрів України № 1055 від 28.12.2016 « Про затвердження Технічного регламенту обладнання та захисних систем, призначених для використання в потенційно вибухонебезпечних середовищах» (ТР №1055). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1055-2016-p#Text> (дата звернення: 01.11.2025).

9. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Design. 30th ed. Cincinnati : ACGIH, 2019. 624 p.

10. GESTIS – IFA DGUV. Grain (2035). [Електронний ресурс]. URL: <https://staubex.ifa.dguv.de/explokomp.aspx?nr=2035&lang=e> (дата звернення: 01.11.2025).

11. MZ Aspiratori. RH Series – Medium Pressure Centrifugal Fans. URL: <https://www.mzaspiratori.eu/centrifugal-fans/medium-pressure/rh-series> (дата звернення: 01.11.2025).

12. Pereira N. C., Wang L. K. Handbook of Environmental Engineering. Vol. 1. Boca Raton : CRC Press, 2009. 712 p.

13. Tama Aernova. Industrial Filtration Systems. URL: <https://www.tamaaernova.com/en/> (дата звернення: 01.11.2025).

14. TBS INDUSTRY. Аспіраційна шафа NS-FS. URL: <https://tbs-industry.com/obladnannya/aspiracijna-shafa-ns-fs/> (дата звернення: 01.11.2025).

15. Wikipedia. Air-to-cloth ratio. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Air-to-cloth_ratio (дата звернення: 01.11.2025).

16. ZEO-UA. Flap-система ZEO-VAB. [Електронний ресурс]. URL: <https://zeo.ua/ru/equipment/flap-sistema-zeo-vab> (дата звернення: 01.11.2025).

References

1. DSTU EN 1127-1:2020 Explosive atmospheres. Explosion prevention and protection. Part 1. Basic concepts and methodology (EN 1127-1:2019, IDT). [Valid from 01.04.2021]. Kyiv: DP «UkrNDNTS», 2021. 86 p.

2. DSTU EN 60079-10-2:2022 Explosive atmospheres. Part 10-2. Zone classification. Explosive dust atmospheres (EN 60079-10-2:2015, IDT; IEC 60079-10-2:2015, IDT). [Valid from 01.07.2020]. Kyiv: DP «UkrNDNTS», 2020. 54 p.

3. DSTU EN ISO 80079-36:2017. Explosive atmospheres. Part 36. Non-electrical equipment for explosive atmospheres. Basic method and requirements (EN ISO 80079-36:2016, IDT; ISO 80079-36:2016, IDT). [Valid from 01.07.2018]. Kyiv: DP «UkrNDNTS», 2018. 84 p.

4. DSTU EN ISO 80079-37:2017 Explosive atmospheres. Part 37. Non-electrical equipment for explosive atmospheres. Non-electrical degree of protection by structural safety c, ignition source control b, liquid immersion k (EN ISO 80079-37:2016, IDT; ISO 80079-37:2016, IDT). [Valid from 01.07.2018]. Kyiv: DP «UkrNDNTS», 2018. 56 p.

5. DSTU EN ISO/IEC 80079-20-2:2019 Explosive atmospheres. Part 20-2. Characteristics of substances. Test methods for combustible dust (EN ISO/IEC 80079-20-2:2016; AC:2017, IDT; ISO/IEC 80079-20-2:2016; Cor 1:2017, IDT). [Valid from 01.07.2020]. Kyiv: State Enterprise «UkrNDNTs», 2020. 64 p.

6. ТЕКО Ukraine. External ventilation grille EPD-U. [Electronic resource]. URL: <https://teko-ua.com/ua/naruzhnaya-ventilyacziionnaya-reshetka-epd-u.html> (access date: 01.11.2025).

7. MINISTRY OF ECONOMY OF UKRAINE. Order «On approval of minimum requirements for the safety and health of workers potentially at risk in explosive environments» dated 09.04.2023 No. 2259. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0967-23#Text> (access date: 01.11.2025).

8. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1055 of 28.12.2016 «On approval of the Technical Regulations for equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres» (TR No. 1055). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1055-2016-п#Text> (access date: 01.11.2025).
 9. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Design. 30th ed. Cincinnati : ACGIH, 2019. 624 p.
 10. GESTIS – IFA DGUV. Grain (2035). [Electronic resource]. URL: <https://staubex.ifa.dguv.de/explokomp.aspx?nr=2035&lang=e> (access date: 01.11.2025).
 11. MZ Aspiratori. RH Series – Medium Pressure Centrifugal Fans. URL: <https://www.mzaspiratori.eu/centrifugal-fans/medium-pressure/rh-series> (accessed: 01.11.2025).
 12. Pereira N. C., Wang L. K. Handbook of Environmental Engineering. Vol. 1. Boca Raton : CRC Press, 2009. 712 p.
 13. Tama Aernova. Industrial Filtration Systems. URL: <https://www.tamaaernova.com/en/> (accessed: 01.11.2025).
 14. TBS INDUSTRY.NS-FS Aspirator Cabinet. URL: <https://tbs-industry.com/obladnannya/aspiracijna-shafa-ns-fs/> (accessed: 01.11.2025).
 15. Wikipedia. Air-to-cloth ratio. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Air-to-cloth_ratio (access date: 01.11.2025).
 17. ZEO-UA.Flap-system ZEO-VAB. [Electronic resource]. URL: <https://zeo.ua/ru/equipment/flap-sistema-zeo-vab> (access date: 01.11.2025).
-
-

УДК 504:661

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202508-02>

УТИЛІЗАЦІЯ ЗОЛИ РЕШТОК СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ РОСЛИН ШЛЯХОМ ЗАЛУЧЕННЯ ЇЇ У ВИРОБНИЦТВО ДОБРИВ

Ізмоденова Тетяна Іванівна¹, Гурець Лариса Леонідівна²¹Лабораторія ТОВ «КРОП-ІНКРІС»

1-ий провулок Свободи, буд. 8, м. Ромни, 42000

²Сумський державний університет

вул. Харківська, 116, м. Суми, 40000

*izmodenova.tati@gmail.com**l.gurets@ecolog.sumdu.edu.ua*

Прагнення країнами світу до використання технологій відновлюваних джерел енергії, як засіб реалізації низьковуглецевих рішень, обумовлено кількома глобальними факторами, включаючи зміну клімату, зростання населення та майбутню енергетичну безпеку. До джерел відновлювальної енергетики традиційно відноситься біопаливо з багаторічної деревини та пожнивних решток сільськогосподарських рослин. Біомаса є невичерпним джерелом вуглецю. Спалювання біомаси супроводжується утворенням техногенного відходу - золи. Складування золошлаків без їх утилізації несе наслідки для довкілля: залуження потенційно придатних для сільськогосподарських потреб ґрунтів, забруднення ґрунту та ґрунтових вод токсичними елементами, забруднення повітря дрібними летючими фракціями золошлакових відходів. Використання золи решток сільськогосподарських рослин та зольного добрива в якості меліоранту підвищує родючість ґрунтів через покращення їх фізико-хімічних показників та збільшення рівня забезпеченості ґрунту елементами живлення рослин.

Використання золи решток сільськогосподарських рослин, як відходу, для виробництва комплексних органо-мінеральних добрив з екологічної точки зору є дуже перспективним завданням і дозволяє вирішити різні проблеми техногенного

походження. Зола решток сільськогосподарських рослин складається з широкого спектру елементів, а вміст важких металів в ній як правило не перевищує ГДК, що дає змогу розглядати її як сировину для виробництва органо-мінеральних добрив. Збагачення такої золи фосфором та азотом, і виробництво комплексних добрив, дозволить знизити техногенне навантаження золівідвалів на довкілля, ґрунт та рослини. Авторами досліджувалися: вміст поживних елементів та важких металів у складі золи решток сільськогосподарських рослин, кількість органічного вуглецю, здібність золи до гранулювання та цементування, технології збагачення золи решток сільськогосподарських рослин фосфоровмісною сировиною.

Ключові слова: біопаливо, зола решток сільськогосподарських рослин, техногенне навантаження, утилізація, виробництво органо-мінеральних добрив.

Utilization of ash from agricultural plant residues by using it in the production of fertilizers.

Izmodenova T. I., Hurets L. L.

The global drive to embrace renewable energy as a means of implementing low-carbon solutions is driven by several global factors, including climate change, population growth, and future energy

security. Renewable energy sources traditionally include biofuels made from perennial wood and agricultural residues. Biomass is an inexhaustible source of carbon. Biomass combustion produces ash, a man-made waste. Unrecycled ash accumulation has environmental consequences: it depletes potentially suitable soils for agricultural use, contaminates soil and groundwater with toxic elements, and pollutes the air with fine volatile fractions of ash waste. Using ash from agricultural residues and ash fertilizer as an ameliorant increases soil fertility by improving its physicochemical properties and increasing the availability of plant nutrients.

The appropriate use of agricultural residue ash as a substrate for the production of complex organomineral fertilizers is a very promising approach from an environmental perspective and offers the potential to address various man-made problems. Crop residue ash contains a wide range of elements, and its heavy metal content does not exceed the maximum permissible concentration, making it suitable as a raw material for the production of organomineral fertilizers. Enriching this ash with phosphorus and nitrogen and producing complex fertilizers will reduce the impact of ash disposal sites on the environment, soil, and plants. The authors studied the content of nutrients and heavy metals in agricultural residue ash, the amount of organic carbon, the granulation and cementation properties of the ash, and technologies for enriching agricultural residue ash with phosphorus-containing raw materials.

Key words: biofuels, agricultural residue ash, man-made impacts, recycling, production of organomineral fertilizers.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Інтенсивне використання природних ресурсів в Україні, необхідних для розвитку промисловості та сільського господарства, впродовж багатьох років супроводжувалось зростанням техногенного навантаження на довкілля. Це призвело до виникнення низки екологічних проблем з руйнуванням природних екосистем в багатьох регіонах. Вплив енергетичного сектора на стале економічне зростання з точки зору довкілля, клімату та безпеки зумовили необхідність продовження програм розвитку відновлюваних джерел енергії та підтримки проектів з енергоефективності, збережен-

ня ресурсів та впровадження більш чистих технологій виробництва [1].

До джерел відновлювальної енергетики традиційно відноситься біопаливо з багаторічної деревини та пожнивних решток сільськогосподарських рослин. Біомаса є невичерпним джерелом вуглецю, оскільки її органічні компоненти походять від тварин і рослин, які надалі можна розділити на первинну біомасу та відходи біомаси. Зокрема, відходи біомаси включають відходи лісового господарства та сільського господарства (наприклад, деревину, листя, стовбури, листя, шкірку, лушпиння та горіхи). Завдяки своїй відновлюваності відходи біомаси є багатообіцяючим заміником викопного палива для відновлення енергії. За останні роки було проведено значну кількість досліджень з вивчення та оптимізації потенціалу відходів біомаси, як сировини для рекуперації та виробництва енергії [2]. Сільськогосподарське виробництво є потужним джерелом утворення відходів. До перших належать відходи, що залишаються після збору врожаю сільськогосподарських культур: солома злакових культур, стебла соняшнику і кукурудзи, бадилля овочевих культур тощо. До других – залишки переробної промисловості: лушпиння, полова, шкірка та інші. Близько 20-40% соломи можна щорічно використовувати для подальшої переробки, а саме, використання в якості сировини для виробництва біопалива [3, 4, 5].

Спалювання біомаси супроводжується утворенням техногенного відходу – золи. В зв'язку з тим, що для теплогенеруючих установок підприємства все більше переходять на біопаливо, то виникає проблема її утилізації. В основному зола вивозиться на полігони твердих побутових відходів, що спричиняє додаткові витрати підприємств та збільшує антропогенне навантаження на екосистему [6]. В 2019 році потребувало утилізації чи розміщення на звалищах близько 131,8 тис. тон, або 80 % всього обсягу золи від спалювання біомаси, включаючи ту, що утворюється в індивідуальному секторі опалення у населення. На даний час українське законодавство не містить обов'язкових вимог утилізації золи від теплогенеруючих установок, в тому числі золи решток сільськогосподарських рослин [7, 8, 9]. За даними Державної служби статистики України істотно збільшилося використання біопалива з пожнивних решток сільськогосподарських рослин. По мірі зміни співвідношень

використання біомаси рослинних решток та вугілля, змінюватиметься і співвідношення утворення її золи та вугілля. Якщо враховувати перспективи розвитку біоенергетики в Україні до 2035 року, споживання твердого біопалива має зрости в 3,5 разів, а кількість утвореної рослинної золи може зрости в 5-8 разів, і в 2035 році в промисловості та енергетиці утвориться і потребуватиме утилізації до 550 тис. тон цієї золи [7, 10].

В продовж останніх років, для зберігання й сушіння великих об'ємів зерна, в аграрних і зернопереробних господарствах України активно проведено модернізацію та інвестування в будівництво елеваторів для зберігання і досушування зерна [11]. До 2020 року зернові сушарні в господарствах комплектували переважно газовими котлами. По мірі зростання ціни на газ, а потім і зменшення цін на продукцію рослинництва, а потім і через війну в країні, активними темпами розпочалися та тривають роботи з реконструкції сушарок. Для генерації тепла встановлюються котли на твердому паливі. Згідно з даними, одержаними компанією ТОВ «Кроп-Інкріс», в 2020 році до 65,4 % клієнтів компанії сушили продукцію рослинництва з використанням газу для генерації тепла, 23,6 % клієнтів комбінували газ і тверде паливо (деревина і солома), до 5,4 % – тільки тверде і мазут. Після 2023 року ситуація кардинально змінилася. Сьогодні для сушіння зерна використовують тільки газ 34,1 % клієнтів, комбінують газ з твердим паливом 30,7 %, деревину і соломі 29,5 %, мазут 5,7 % (Результати аналітичних досліджень компанії ТОВ «Кроп-Інкріс» з цього питання були використані при підготовці кваліфікаційної роботи бакалавра в Сумському державному університеті [12]). Отже, кількість господарств, які використовують деревину й соломі для генерації тепла при сушінні зерна зросла з 29,0 % до 60,2 %. Це призводить до збільшення об'ємів золоматеріалів [10].

Золовідвали, на яких накопичується і зберігається зола, незважаючи на огорожену територію, є відкритими системами. В зонах впливу золовідвалів формуються несприятливі екологічні ситуації: відчуження територій (орної землі), запилення з поверхні золовідвалів, забруднення атмосферного повітря (випаровування лугу, тощо), осідання пилу на поверхню, міграція забруднюючих речовин крізь профіль ґрунту (ґрунтові та підземні води), вплив на організм людини [13]. Поряд з

мінеральними мікро- і макрокомпонентами, золошлакові відходи містять органічні речовини, що пов'язані з «недопалом» вуглецю. При порушенні режиму спалювання палива (а це часто трапляється на практиці) його вміст може значно збільшуватись. І через це не можна обійти увагою ймовірну пожежну небезпеку на золовідвалах. Шкідливі речовини, які входять до складу золошлаків, можуть мігрувати з поверхні золовідвалу через повітряне середовище, шляхом пилоутворення внаслідок високої дисперсності золошлакового пилу, та забруднювати приземний шар атмосфери, ґрунт, підземні і поверхневі води районів, що розташовані на відстані до декількох кілометрів від накопичувача золовідходів. Також вимивання рухливих компонентів золи та попадання їх у воду, збільшує мінералізацію ґрунтових вод та негативно впливає на навколишнє середовище [14]. Накопичення забруднюючих речовин в ґрунтово-рослинному покриві на золовідвалах зумовлює їх можливе засвоєння ґрунтами і рослинами. При цьому, існує загроза їх міграції у горизонтальному і вертикальному напрямках. Поширюючись в подальшому за різними трофічними ланцюгами, токсичні речовини, що містяться в золошлакових відходах, можуть викликати деградацію біосистеми та негативно впливати на здоров'я людини [15]. Складування золошлаків без їх утилізації несе такі наслідки для довкілля: залуження потенційно придатних для сільськогосподарських потреб ґрунтів, забруднення ґрунту та ґрунтових вод токсичними елементами, забруднення повітря дрібними летючими фракціями золошлакових відходів.

Сьогодні накопичення золи решток сільськогосподарських рослин в підприємствах переробної промисловості та в аграрних господарствах збільшилося. Утилізація цієї золи проводиться переважно вивозом її на поля, в якості добрива. В цьому звичайно є раціональне зерно, так як вона має підвищений вміст фосфору, калію і сірки. Також через високий вміст в ній лужних структуруючих елементів, таких як кальцій і магній, внесення золи в ґрунт є ефективним заходом для відтворення її родючості, особливо для нейтралізації кислих ґрунтів. Закордонний досвід використання рослинної золи свідчить про різні напрямки її застосування (сільське господарство, будівельна та металургійна промисловість). Відомим напрямком утилізації відходів у світовій та укра-

їнській практиці є будівельна галузь – отримання сировини для будівельних матеріалів (цементів, заповнювачів) та будівництво доріг різного призначення. В країнах ЄС важливого значення надають питанню сталого використання біомаси, що передбачає повернення мінеральних речовин, що містяться в золі, в їх природний цикл. З іншого боку, першочергове значення надається питанням безпеки використання золи біомаси для людини та навколишнього середовища, тому встановлюються відповідні обмеження, зокрема, щодо вмісту важких металів. При цьому спосіб утилізації такої золи має бути економічно вигідний або найменш витратний [7, 16 - 19].

Властивості золи решток сільськогосподарських рослин, її кількісний та елементний склад залежать від основних факторів: видів спалюваних решток сільськогосподарських рослин (види, частини спалюваних рослин, форми і технології зберігання біомаси для спалювання); їх походження (грунтово-кліматичні умови вирощування рослин, внесення добрив); умов підготовки для спалювання і зберігання; технології спалювання (спалювання на решітці або в киплячому шарі, конструкції камери згоряння і котлів, параметри процесу спалювання, температура горіння, витрата повітря та інші параметри); технології уловлювання золи з димових газів (циклони, різні фільтри); використання додаткових технологій щодо запобігання наднормативних викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря, що використовуються при спалюванні решток сільськогосподарських рослин [7, 20-22].

За даними різних досліджень, які проводилися в Україні і світі, рослинна зола належить до відходів з лужними властивостями. Сольовий рН в 1% розчині KCl варіює 12,7-13,2, водний рН 9,5-11,3. Основні золоутворюючі елементи в біомасі включають Ca, Si, Al, Ti, Fe, Mg, Na, K, S та P. При цьому, вміст основних хімічних елементів в золі різних видів сільськогосподарських рослин може варіювати в широких діапазонах значень. Так, питома вага Ca може змінюватися від 3,7 до 38 %, Si від 4,0 до 30,0 %, Mg від 1,1 до 5,6 %, K від 4,9 до 28,8 %, P від 0,3 до 6,7%. Середня щільність частинок і насипна щільність золи решток сільськогосподарських рослин залежить від фракції та варіює відповідно від 2300 до 3000 та від 230 до 1050 кг/м³. Щільність частинок зменшується від подової золи до фільтраційної. Загалом, розмі-

ри частинок залежать від виду біопалива, вмісту та хімічного складу біомаси, обсягу мінеральних домішок в паливі [7]. Розміри частинок подової золи залежать від її спікання, а розміри частинок золи виносу залежать від використаної технології поділу золи виносу і хімічного складу біопалива [13, 16, 23].

Однією з основних фізичних характеристик золи є температура плавлення. Саме вона впливає на остаточний склад та агрегатний стан золи після спалювання біомаси. Також склад золи залежить від технології спалювання рослинних решток. При спалюванні їх при високих температурах відбуваються процеси забруднення реакторів газифікації. Ці проблеми можуть включати засмічення видалення золи, спричинене її шлаком, спікання, осадження, ерозія, корозія та викиди забруднюючих речовин, які в основному створюються наявністю у золі решток сільськогосподарських рослин лужних металів, лужноземельних металів, кремнію, хлору та сірки [3].

Загальний масовий вихід золи при спалюванні рослинних решток залежить від її зольності, вона може становити 5-10 % у листях рослин і до 30-40% у лушпинні [7, 24]. Наявність важких металів у рухомій формі, що містяться в зольних залишках, також може мати негативні наслідки на навколишнє середовище при нераціональному управлінні та утилізації через можливе вимивання в підземні та поверхневі води. Відомо, що вміст важких металів в золі різноманітних рослин може варіювати в широких діапазонах, наприклад, виявляли As в кількості від 0,0 до 10 мг/кг, Cd від 0,0 до 5 мг/кг, Pb від 0,0 до 100 мг/кг, Cr від 0,0 до 50 мг/кг [25]. Наприклад, зола деревини зазвичай має вищу концентрацію As, Cd, Pb і Hg, ніж зола соломи пшениці, ріпака, кукурудзи та інших сільськогосподарських культур. При цьому, як правило, вміст цих важких металів в золі решток сільськогосподарських рослин не перевищує ГДК.

Деякі мінеральні поживні речовини золи решток сільськогосподарських рослин можуть надавати оздоровчий ефект при її застосуванні на кислих ґрунтах. Olanders та інші [26], у своїй роботі повідомили, що зола решток сільськогосподарських рослин містить лише незначну кількість важких металів, що робить її досить вигідною для утилізації шляхом виробництва добрив. Використання золи решток сільськогоспо-

дарських рослин в якості меліоранту та зольного добрива підвищує родючість ґрунтів через покращення їх фізико-хімічних показників (збільшення показників ємності катіонного обміну, кількості органічної речовини, нейтралізації кислотності, оструктуреності та інші) та збільшення рівня забезпеченості ґрунту елементами живлення рослин. Це знижує деградацію ґрунтів, хімічне забруднення та накопичення забруднюючих речовин в ґрунтово-рослинному покриві. Через високий вміст калію та інших елементів в біомасі сільськогосподарських рослин, їх зола – є альтернативною сировиною для виробництва добрив. При цьому, використання золи решток сільськогосподарських рослин у виробництві простих добрив знижує техногенне навантаження на довкілля (від видобутку сировини до технології виробництва) та сприяє ефективному її застосуванню в сільському господарстві.

В Україні працює низка підприємств з реалізації фасованої золи, як меліоранту для кислих ґрунтів. Також є підприємства (ТОВ «ОРІЙ» та ТОВ «Алмаз-М»), які використовують золу лушпиння соняшника для виробництва калійного добрива. На цих підприємствах виробляються прості гранульовані зольні добрива з високим вмістом калію. При цьому, рівень фосфору (в перерахунку на P_2O_5) в них незначний і не перевищує 8 % [27]. В технології виробництва простих зольних добрив застосовується метод окатування на тарілчастому грануляторі при зволоженні золи від 40 до 60%, з наступним сушінням гранул в печах при температурі 60-70 °C, їх калібруванням та фасуванням. Це єдиний метод технологічного виробництва простих зольних добрив. Він затратний і має низку недоліків. Для гранулювання золи лушпиння соняшника використовується велика кількість води, а отримані гранули володіють високим показником вологості і потребують тривалого часу для їх сушіння, що призводить до підвищення енергоємності виробництва. В процесі окатування отримуються гранули різного розміру, що потребує додаткового їх калібрування [28].

Через непропорційне зростання ціни на основні добрива, переважно фосфорного компоненту, відносно продукції рослинництва впродовж тривалого часу кількість внесених добрив в Україні скоротилася. З приводу чого з року в рік триває зменшення вмісту доступного фосфору в ґрун-

ті [27]. Через воєнні дії в Україні сталися значні зміни на ринку фосфорних і калійних добрив (змінився їх асортимент та значно зросла ціна). Основним джерелом фосфору для виробництва складних добрив є фосфоритне борошно, експортоване з Близького сходу, північної Африки та Казахстану [27]. Існуючі на ринку України добрива на основі золи лушпиння соняшника мають вкрай обмежені можливості застосування, через відсутність в цих добривах азоту та доступного фосфору. В зв'язку з цим, актуальним є пошук альтернативних джерел калію й фосфору та створення збалансованих, впершу чергу за фосфором і калієм, водорозчинних комплексних органо-мінеральних добрив [27].

Збагачення золи решток сільськогосподарських рослин фосфором і азотом, дає можливість отримувати комплексні органо-мінеральні азотно-фосфорно-калійні добрива та одночасно знизити техногенне навантаження золівідвалів на довкілля, ґрунт та рослини [25]. Також повторне використання золи решток сільськогосподарських рослин у сільському господарстві може сприяти реалізації замкнених циклів поживних речовин, обмежити кількість застосування тільки мінеральних добрив, що дасть можливість зменшити техногенне навантаження на ґрунти. Утилізація золи решток сільськогосподарських рослин, шляхом виробництва органо-мінеральних добрив, дозволить вирішити екологічну проблему, а також зменшити витрати на зберігання, звільняючи зайняті землі під господарські потреби, які з кожним роком потребують дедалі більше територій, що негативно впливає на навколишнє середовище.

Викладання основного матеріалу

При проведенні нами експериментальних досліджень золи решток різних сільськогосподарських рослин з теплогенеруючих установок встановлено, що за вмістом калію найбільш придатною для виробництва добрив була зола з лушпиння і соломи соняшнику. Так, питома вага зразків цієї золи за вмістом калію (в перерахунку на K_2O) більше 20% становила відповідно 95,6 та 28,6%. Кількість зразків з високим вмістом калію в золі соломи озимої пшениці, ріпака, кукурудзи та деревени не перевищувала 23,8% [27]. Отже, в якості джерела калію зола лушпиння соняшника має першочергове зна-

чення [20]. Дослідження зразків золи решток сільськогосподарських рослин на вміст фосфору, високий його вміст частіше виявляли в золі лушпиння соняшника, кукурудзи і озимої пшениці. Так, питома вага зразків золи цих культур, за вмістом фосфору, в перерахунку на P_2O_5 більше 6%, становила відповідно 73,9, 38,1 і 36,8%. Кількість зразків золи інших культур (соломи озимого ріпаку і соняшника) з високим вмістом фосфору не перевищувала 28,6%. За допомогою методу рентгенівської енергодисперсійної спектроскопії виявлено, що в склад золи решток сільськогосподарських рослин також входять агрохімічно цінні хімічні елементи такі як, Ca – 3,61-27,13%, Mg – 1,52-3,04%, S – 0,65-4,49% та інші елементи (Cu, Zn, Mn, Fe), вміст яких не перевищував 1% [13]. Екологічну безпечність цієї золи встановлювали за допомогою аналізів на наявність важких металів (Pb, Cd, As) в ній. Результати аналізів з промислових котелень показали, що вміст важких металів не перевищував ГДК.

Нами встановлено, що зола решток сільськогосподарських рослин належить до органо-мінеральної сировини, яка через присутність в ній недопалених органічних речовин з сорбційними властивостями може відігравати знану роль в обмеженні засвоюваності важких металів та покращенні поглинання обмежено рухомого фосфору з ґрунту рослинами [6]. Кількість органічного вуглецю в золі решток сільськогосподарських рослин була не високою та знаходилася в межах від 0,15 до 2,98%. Найбільше органічного вуглецю виявляли в золі соломи кукурудзи від 1,56 до 2,98, озимої пшениці – від 0,55 до 2,58, соняшнику – від 1,67 до 2,45, озимого ріпаку – від 1,53 до 2,15%. Кількість органічного вуглецю в золі лушпиння соняшника була значно менша та знаходилася в межах від 0,15 до 0,55%. Основним технологічним показником у виробництві гранульованих добрив є здатність сировини до цементування (утворення гранул з певними показниками міцності). Проведені нами дослідження виявили, що зола решток сільськогосподарських рослин гранулюється та має здатність до цементування. Саме цю особливість використовують при виробництві простих добрив із золи лушпиння соняшника. При проведенні нами лабораторних досліджень встановлено, що якість гранулювання і цементування золи решток сільськогосподарських рослин менше залежить від виду спаленої рослинної біомаси, а

більше від вмісту кальциту та кількості вільних карбонатів в ній. При гранулюванні зразків золи соломи озимої пшениці, кукурудзи, соняшника, озимого ріпаку та сої з різним вмістом цих компонентів виявлено, що найбільшою міцністю (1,45-3,10 МПа) володіли зольні гранули діаметром 4 мм при кількості CaO в межах 10,76-29,77% та CO_3^{2-} в межах 11,35-23,21%. У випадку зменшення вмісту кальцію (<10% як CaO) або вільних карбонатів (<10% CO_3^{2-}), статична міцність значно зменшувалася та не перевищувала 1 МПа [13]. Методом множинної кореляції нами був проведений аналіз, який підтвердив висновки, щодо впливу окремих компонентів в золі решток сільськогосподарських рослин на її здібності щодо цементування. Так, коефіцієнт множинної кореляції між статичної міцністю зольних гранул та вмістом кальцію і вільних карбонатів, в порівнянні з іншими складовими, був найбільшим $r_{x(yz)} = 0,901$. Вплив інших компонентів в золі решток сільськогосподарських рослин на твердіння встановлено не було [13].

З метою підвищення агрохімічних цінностей зольних добрив є доцільним збагачувати золу решток всіх сільськогосподарських рослин на фосфор та азот. Але, через невисокий рівень контамінації літосферним компонентом та майже відсутністю вилугування у лушпиння соняшника, його зола володіє високими показниками на вміст калію і фосфору, та, як було доведено дослідженнями в лабораторії ТОВ «Кроп-Інкріс» і частково представлено в бакалаврській роботі університету, є більш придатною для виробництва модифікованих зольних NPK-добрив [13]. Результати проведених досліджень свідчать про те, що саме золу лушпиння соняшника можна розглядати, як екологічно-чисту калійну сировину для виробництва добрив, яка може гранулюватися та цементуватися і володіє сорбційними властивостями. Тому в усіх експериментальних дослідженнях по збагаченню фосфоровмісною сировиною нами була використана саме зола лушпиння соняшника.

Для отримання комплексних органо-мінеральних добрив, нами були проведені експериментальні дослідження по збагаченню золи лушпиння соняшника носієм загального і водорозчинного фосфору, у вигляді фосфоритного борошна, ортофосфорної кислоти та моноамонійфосфату (МАФ). При збагаченні золи лушпиння соняшника фосфоритним борошном, вдалось отримати органо-мі-

неральні добрива з підвищеним вмістом фосфору. Проте, фосфор був цитраторозчинним і важкодоступним для рослин. Також при його використанні існують ризики забруднення добрив важкими металами, які присутні в фосфоритному борошні. При використанні ортофосфорної кислоти вдалось збагатити золу лушпиння соняшника на фосфор (водорозчинний та цитратний). Отримані модифікації зольних добрив мають перспективу для виробництва і подальшого вивчення. Але, при використанні агресивної ортофосфорної кислоти для збагачення золи лушпиння соняшника, з наступним гранулюванням і сушінням добрив, робить процес виробництва небезпечним, який тягне за собою шкідливі наслідки для навколишнього середовища та вимагає впровадження певних еколого-технологічних рішень в процесі виробництва.

Перспективним, з огляду отримання високоякісного орґано-мінерального добрива та екологічної безпеки для навколишнього середовища, є збагачення золи лушпиння соняшника моноамонійфосфатом. Використання МАФ для збагачення золи лушпиння соняшника, дозволило отримувати модифіковані зольні NPK-добрива не тільки з цитрато- та водорозчинним фосфором, але й з азотом. Процес грануляції при поєднанні золи лушпиння соняшника з МАФ відбувався в 1,5-2 рази швидше, ніж тільки золи та її сумішей з ортофосфорною кислотою. Також вдавалось провести якісне гранулювання з отриманням гранул більше 1 мм не менше 98,5%. При цьому, цінні фракції модифікованих зольних NPK-добрив розміром від 2 до 4 мм складала до 75% від маси. Статична міцність гранульованої золи лушпиння соняшника становила 2,86 МПа, а сумішей її з МАФ від 2,35 до 2,56 МПа [27]. Відпрацьована технологія отримання орґано-мінеральних добрив методом окатування на тарілчастом грануляторі відповідає всім характеристикам, необхідним для безпечного та енергоощадного виробництва.

Головні висновки

Спалювання біомаси супроводжується утворенням техногенного відходу - золи. В зв'язку з цим, виникає проблема її утилізації. Збільшення використання біопалива з поживних решток призведе до збільшення об'ємів золи, що обумовлює раціональну її утилізацію. Зола решток

сільськогосподарських рослин складається з широкого спектру елементів, а вміст важких металів в ній не перевищує ГДК, що дає змогу розглядати її як сировину для виробництва орґано-мінеральних добрив. Збагачення такої золи фосфором та азотом, і виробництво комплексних орґано-мінеральних добрив, дозволить знизити техногенне навантаження золівідвалів на довкілля, ґрунт та рослини. Виявлена можливість збагачення рослинної золи носієм загального і водорозчинного фосфору, у вигляді фосфоритного борошна, ортофосфорної кислоти та моноамонійфосфату. Дана оцінка екологічності отриманих добрив та безпеки для навколишнього середовища в процесі виробництва.

Список використаної літератури

1. Економіка довкілля і природних ресурсів: монографія. / Дзядикевич Ю. В. та інш. Тернопіль: Астон, 2016. 392 с.
2. Valorization of biomass waste to engineered activated biochar by microwave pyrolysis: progress, challenges, and future directions. / Foong S. Y., et al. Chemical Engineering Journal. 2020. 389. P. 124401.
3. Vamvuka, D. Comparative fixed fluidized bed experiments for the thermal behaviour and environmental impact of olive kernel ash renew. Energy. 2009. 34. P. 158–164.
4. Гелету́ха Г. Г., Желєзна Т. А., Жовмір М. М., Матвєєв Ю. Б., Дроздова О. І. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Частина 1. Відходи сільського господарства та деревна біомаса. Промислова теплотехніка. 2010. Т. 32. № 6. С. 58-65.
5. Кухарець С. М. Голуб Г. А. Забезпечення енергетичної автономності агроєкосистем на основі виробництва біопалива. Вісник Житомир. нац. агроєколог. ун-ту. 2012. № 1. Т. 1. С. 345-352.
6. Vakall V., Izmodenova T., Vakal S., Shepeta K., Malovanyu M. Obtaining and studying promising types of natural sorbents for modifying mineral fertilizers. Chemistry & Chemical Technology. Poland, 2024, Vol. 18, No. 4, P. 652–662.
7. Крамар В.Г. Обґрунтування напрямів утилізації золи від спалювання біомаси. Зола біомаси як добриво в сільському господарстві. Аналітична записка UABIO 2020, № 27, с. 75.
8. Крамар В. Г. Проблеми утилізації золи від котельних на біомасі в Україні. Теплофізика та

теплоенергетика. 2021. Т. 43, № 3. С. 71-77.

9. The Study of Ecological State of Waste Disposal Areas of Energy and Mining Companies / A. Gorova, A. Pavlychenko, O. Borysovska. Mining of Mineral Deposits. Leiden, The Netherlands: CRC Press. Balkema, 2013. P.169-171.

10. Вакал С. В., Шепета К. О., Вакал В. С., Измоденова Т. І. Формування хімічної структури золи з соломи озимої пшениці в залежності від родючості ґрунту та внесених добрив. Екологічна безпека та технології захисту довкілля. Київ. 2014. № 6, 2024. С. 60-74.

11. Ельке Лакемеєр. Виробництво біоенергії в Україні: за матеріалами консультативної роботи Інституту економічних досліджень та політичних консультацій. Пропозиція. 2007. № 11. С. 30.

12. Птащенко Р. Ю. КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА на здобуття освітнього ступеня бакалавр. Технології використання відходів рослинництва в якості енергетичних ресурсів. Сумський державний університет, Суми – 2024, с. 40.

13. Измоденова Т. І., Гурець Л. Л. Зола решток сільськогосподарських рослин, як сировина для виробництва органо-мінеральних добрив. XII Міжнародна науково-практична конференція «Modern problems of ensuring the quality of life in the world: present and future». (March 24-26, 2025), Lyon, France. 2025. P. 188-191.

14. Березняк О. О., Борисовська О. О. Оцінка питомого пиловиносу із золосховища Придніпровської ТЕС. «Наукова весна 2024»: матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро: НТУ «ДП», 2023. – С. 85-86.

15. Ходаківська О. В., Корчинська С. Г., Матвієнко А. П. Економічні проблеми відтворення родючості ґрунтів. Вісник аграрної науки. 2017. № 12. С. 71-75.

16. Колесник В. Є., Борисовська О. О., Монюк І. В. Аналіз визначальних чинників екологічної небезпеки та заходів по її зниженню в системі «котельня – споживачі тепла – довкілля». Збірник наукових праць НГУ. 2023. №73. С. 218-228.

17. Петряєв М. В., Полякова Ю. П., Топоров А. А., Трет'яков П. В. Порівняльно-оглядова характеристика екструдерних та грануляційних установок. Наукові праці ДонНТУ. 2019. № 1(16). С. 36-44.

18. Lèbre, É., Corder, G.D., Golev, A. Sustainable

practices in the management of mining waste: a focus on the mineral resource. Minerals Engineering. 2017. Vol 107. P. 34-42. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.12.004> (дата звернення: 20.04.2023).

19. Perkov Ye., Perkova T. Recycling of Prydniprovsk thermal power plant fly ash. Mining of Mineral Deposits, 2017. 11(1), P. 106-112.

20. Hurets L., Izmodenova T., Vakal V., Vakal S., Malovanyy M. Utilization of Renewable Energy Waste (Wood Ash and Straw) in the Production of Mineral Fertilizers. Journal of Ecological Engineering Poland, 2024. 25 (4). P. 332–339.

21. Измоденова Т. І., Вакал В. С., Гурець Л. Л., Вакал С. В. Утилізація золи від спалювання біопалива з поживних решток. XIV International Scientific and Practical Conference «World trends, realities and accompanying problems of development» Copenhagen, Denmark. International Science Group. 2023. P. 19-22.

22. Звіт про дослідження якості соломи як твердого біопалива. Завдання 2. Київ.: 2014. 13 с. URL: <https://myrgorod.pl.ua/files/images/Madem/7.pdf> (дата звернення: 10.07.2023).

23. Stankowski S., Chajduk E., Osńska B., Gibczyńska M. Biomass ash as a potential raw material for the production of mineral fertilisers. Agronomy Research. 2021. No 19(4). P. 1999–2012.

24. Ковальський В. П., Тимошенко В. О. Дослідження перспективи використання золи виносу в будівництві. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2023. С. 36-42.

25. Вакал С. В. Науково-теоретичні основи створення нових екологічно безпечних технологічних процесів виробництв фосфоровмісних добрив: дис. д-ра техн. наук: 21.06.01 / Сумський держ. ун-т. Суми, 2018. 422 с.

26. Olanders, B., Steenari, B. Characterization of ashes from wood and straw. Biomass Bioenergy. 1994. No 8. P. 105–115.

27. Гурець Л.Л., Измоденова Т. І., Вакал В. С., Вакал С. В., Клименко О. Г. Застосування золи від спалювання сільськогосподарських залишків у виробництві добрив. Збірник наукових праць національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова. Наукове видання №1, 2024, Гельветика, Миколаїв, С. 139-150.

28. Колісниченко О. М. Спосіб отримання мінерального добрива: кор. модель UA50392. № u200911926; заявл. 20.11.2009; опубл. 10.06.2010, Бюл. № 11.

УДК 504.062:001.891(477.7)

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202508-03>

РЕЗИЛЬЄНТНІСТЬ ТЕРИТОРІЙ ПІВДНЯ УКРАЇНИ ПІСЛЯ РУЙНУВАННЯ КАХОВСЬКОЇ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Павлюх Л. І., Михальчук І. В., Авраменко О. Ю
Державний університет «Київський авіаційний інститут»,
пр. Любомира Гузара, 1, 03058, м. Київ, Україна
lenyo@ukr.net

Анотація

Стаття присвячена одній із наймасштабніших техногенно-екологічних катастроф сьогодення: підриву Каховської гідроелектростанції (ГЕС). Проаналізовано наслідки, заподіяні лихом, та визначено, що південь України постав перед низкою екологічних, економічних та соціальних проблем.

Мета статті полягає у визначенні ключових викликів і наслідків руйнування Каховської ГЕС для південних регіонів України, розробленні адаптаційної моделі постраждалих територій та пропозицій щодо підвищення стійкості екосистем до подібних екологічних катастроф у майбутньому.

Методологія дослідження базується на аналізі наслідків підриву Каховської ГЕС та вразливості природних і соціально-економічних систем, а також визначенні ключових індикаторів стійкості, що дало змогу розробити адаптаційну модель підвищення резильєнтності територій Півдня України після руйнування Каховської ГЕС.

Ключові слова: Каховська гідроелектростанція, екосистема, резильєнтність, території, адаптаційна модель, управління, екологічна безпека.

Resiliene of southern Ukraine after the destruction of the kakhovka hydroelectric power plant.
L. Pavliukh, I. Mikhalchuk, O. Avramenko.

Abstract

The article is devoted to one of the most massive man-made ecological disasters of our time: the destruction of the Kakhovka Hydroelectric Power Plant (HPP). The consequences of the disaster are analysed, and it is determined that southern Ukraine faces a number of environmental, economic and social problems. The purpose of the article is to identify the key challenges and consequences of the destruction of the Kakhovka HPP for the southern regions of Ukraine, to develop an adaptation model for the affected areas, and to make proposals for improving the resilience of ecosystems to similar environmental disasters in the future. The research methodology is based on an analysis of the consequences of the destruction of the Kakhovka HPP and the vulnerability of natural and socio-economic systems, as well as the identification of key indicators of resilience, which made it possible to develop an adaptation model to increase the resilience of the territories of southern Ukraine after the destruction of the Kakhovka HPP.

Keywords: Kakhovka Hydroelectric Power Plant, Ecosystem, Resilience, Territories, Adaptation Model, Management, Environmental Safety.

Постановка проблеми

Руйнування Каховської гідроелектростанції (ГЕС) у червні 2023 року стало одним із масш-

табніших техногенно-екологічних лих в сучасній історії України. Наслідки вибуху призвели до різкої зміни гідрологічного режиму Дніпра, масштабного затоплення населених пунктів, знищення екосистем, руйнування інфраструктури та загострення соціально-економічних проблем на значній частині Півдня України. Катастрофа спричинила непрогнозовані втрати для аграрного сектору, порушення системи зрошення, зниження доступності питної води, деградацію природних ресурсів та зростання небезпек для здоров'я населення. Попри наявні дослідження щодо відновлення екосистем та управління надзвичайними ситуаціями, **комплексна оцінка резильєнтності територій Півдня України після руйнування Каховської ГЕС залишається недостатньо вивченою**. Особливої уваги потребує визначення ключових індикаторів стійкості, аналіз вразливості природних і соціально-економічних систем та розроблення моделей адаптивного управління. Це створює потребу у науковому обґрунтуванні підходів до формування стійких стратегій відновлення регіону, здатних забезпечити його довгостроковий розвиток та екологічну безпеку.

Актуальність дослідження

З огляду на комплексність наслідків, регіон постає перед викликом забезпечення резильєнтності – здатності територій, екосистем, економіки та громад швидко адаптуватися до шоків, відновлюватися після кризи та зменшувати вразливість до майбутніх ризиків. У ситуації, коли екологічні, соціальні та економічні втрати накладаються на умови воєнного стану, питання підвищення стійкості регіону потребує системного аналізу та розроблення адаптаційних стратегій.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями

Авторське дослідження відповідає практичним потребам органів державної влади та місцевого самоврядування у формуванні стратегій відновлення Півдня України. Результати роботи можуть бути використані при розробленні планів інтегрованого управління водними ресурсами, програмах відновлення екосистем, реконструкції

системи зрошення та адаптації інфраструктури до нових гідрологічних умов. Авторський доробок сприяє вирішенню важливих завдань національного рівня – формуванню стійкої системи екологічної безпеки та адаптаційної політики у контексті зміни клімату та воєнних загроз. Запропоновані підходи можуть бути інтегровані у державні програми екологічної та регіональної політики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Каховське водосховище утворене 1955-1958 роках, довжина водосховища сягала 230 км, площа складала 2155 км², довжина берегової лінії 896 км. Водосховище містило 30-40% запасів України прісної води. Також водосховище слугувало для системи охолодження Запорізької АЕС. Шостого червня 2023 року, окупанти здійснили підлив греблі Каховської ГЕС, що призвело до стрімкої втрати води та затоплення населених пунктів нижче за течією Дніпра [1]. Підлив Каховської ГЕС і, як наслідок, спустошення Каховського водосховища, є однією з найбільших техногенних та екологічних лих останніх десятиліть, що має довготривалі та багатоаспектні наслідки. Вода з водосховища була потрібна для підживлення ставків-охолоджувачів та систем безпеки Запорізької АЕС. Різне зниження рівня води унеможливило нормальне функціонування систем, хоча станція використовує альтернативні джерела. Зруйнування Каховської ГЕС призвело до безповоротної втрати значного об'єкту енергетичної інфраструктури.

Втрата величезного об'єму прісної води завдала нищівного удару по південному краю України. Сотні тисяч мешканців південних областей (Херсонської, Запорізької, Дніпропетровської) втратили доступ до централізованого водопостачання для питних та побутових потреб. Затоплення та подальше обміління водосховища спричинило масове забруднення води хімічними, органічними та мінеральними речовинами, підвищуючи ризик спалахів інфекційних хвороб. Масова загибель риби, птахів, наземних тварин, знищення нерестовищ, водно-болотних та прибережних екосистем.

На місці водосховища формується новий ландшафт – так зване Велике Лугове поле, яке було затоплене у 1950-х роках. Цей процес відновлен-

ня є неконтрольованим і несе загрозу поширення інвазійних видів та змін клімату в регіоні. Потік води виніс мінні загородження, встановлені окупантами, на великі території, включно з узбережжям Чорного моря.

Проблема підриву Каховської ГЕС охоплює не лише прямі руйнування, а й довготривалі екологічні, соціально-економічні та гуманітарні наслідки, які відчуватимуться протягом десятиліть, а також є кричущим порушенням міжнародного гуманітарного права, розслідуваним як екоцид [2].

Мета статті полягає у визначенні ключових викликів і наслідків руйнування Каховської ГЕС для південних регіонів України та у розробленні адаптаційної моделі постраждалих територій та пропозицій щодо підвищення стійкості екосистем до подібних екологічних катастроф у майбутньому.

Результати досліджень

Відповідно до звіту ЮНЕП (UNEP) про підриз Каховської ГЕС – «Rapid Environmental Assessment of Kakhovka Dam Breach, Ukraine, 2023» багато з наслідків прориву дамби можуть бути частково незворотними й мати вплив на екосистеми, гідрологію та здоров'я людей на десятиліття [3].

Одним з основних наслідків підризу Каховського водосховища є вплив на рибні ресурси. Україна втратила величезні рибні запаси. Каховське водосховище, як і нижні течії річки Дніпро, має одну з найбільших концентрацій прісноводних рибних запасів, що мають комерційне значення в Україні. Для відновлення рибних ресурсів знадобиться щонайменше 7-10 років.

У результаті майже повного зникнення Каховського водосховища в прибережній місцевості зникла низка видів птахів, які гніздилися в місцях поблизу водосховища (зокрема ластівки, крички, чапля жовта, чепура мала, копиця, ремез звичайний, кулик-сорока тощо).

Велика кількість організмів, що населяють водойму, живуть в бентосному мулі прибережної зони частини русла річки, де є рослинність та достатня кількість сонячного світла. За кілька годин ця зона була оголена, що неминуче призвело до загибелі більшості бентосних організмів у колишньому водосховищі.

У результаті катастрофічного зниження рівня води в водосховищі зникли водні та прибережні види рослин Каховського водосховища. Осушене дно водосховища стало одним з найбільших осередків поширення автохтонних видів рослин, притаманних для річкових заплавл (тополя чорна (*Populus nigra*), верба біла (*Salix alba*), аморфа кушова (*Amorpha fruticosa*), в'яз, клен та багато інших).

Усі живі організми співіснують у природі та утворюють біотопи (природні середовища існування) – унікальні «різноманіття природи», які також є рідкісними та охороняються на загальноєвропейському рівні. На території, що зазнала екологічної катастрофи, було виявлено 38 рідкісних типів середовищ існування, які охороняються Бернською конвенцією. Спеціально для їх охорони в Україні було створено території «Смарагдової мережі». Найбільше від висихання постраждають водні середовища існування та заболочені середовища.

Вище греблі Каховської ГЕС від висихання постраждали щонайменше 11 природоохоронних територій, зокрема національні природні парки «Камінська Січ» (12261,14 га), «Велика Лука» (16756 га) та регіональний ландшафтний парк «Панай» [4].

Наслідки для затоплених територій нижче зруйнованої греблі

Масштаби цієї катастрофи важко порівняти з будь-якими попередніми подіями в Україні. Протягом останніх 90 років заплава річки Дніпро в Україні була регульована (було побудовано шість гребель). Швидко підвищення рівня води в низинних районах, а особливо на островах, не залишило шансів на виживання для більшості наземних тварин (ссавців, рептилій, комах тощо) та колоній більшості видів птахів. Шостого червня за один день популяції деяких видів зазнали значного впливу, можливо навіть більшого, ніж за останні 100 років. Майже всі відомі ареали рідкісного виду мурах *Liometopum microcephalum* і, можливо, всі місця, де були знайдені *Tarpania kinburni*, розташовані в затоплених районах. Крім того, катастрофічний вплив зазнали популяції ссавців, що знаходяться під загрозою зникнення в усьому світі. Наприклад, 70% світової популяції березо-

вої миші Нордмана (*Sicista loriger*) було затоплено, що може призвести до її вимирання в майбутньому. Популяція піщаної сліпої кротової щури (*Spalax arenarius*) скоротилася на 50%, так само як і популяція товстохвостої джербої Фальц-Файна (*Stylodipus telum falzfeini*) [5].

Рептилії є однією з найбільш вразливих груп тварин до повеней та руйнування біотопів. Серед них є види, занесені до Червоної книги України: степова гадюка (*Vipera renardi*), каспійська змія (*Dolichophis caspius*), сарматська змія (*Elaphe sauromates*), гладенька змія (*Coronella austriaca*), а також види, занесені до конвенції – піщана ящірка (*Lacerta agilis*) та степовий бігун (*Eremias arguta*). Забруднювачі, що потрапили у воду, можуть негативно вплинути не тільки на рептилій, а й на популяції амфібій, які дуже чутливі до якості води. Особливо постраждають такі амфібії (деякі з них занесені до Червоної книги України, як-от гребінчастий тритон – *Triturus cristatus*) та звичайний тритон *Lissotriton vulgaris*. Останній є перспективним видом для включення до Червоної книги України в найближчому майбутньому.

У зоні затоплення знищені важливі місця гніздування водоплавних та берегових птахів, включаючи десятки тисяч особин. Нижні заплави Дніпра є місцем проживання найбільших колоній чапель та інших колоніальних птахів у регіоні. Слід зазначити, що катастрофічний вплив торкнувся птахів під час періоду гніздування, включаючи наявність пташенят. Часу для створення нових колоній і подальшого розмноження вже не залишилося. Деякі види птахів, такі як чаплі (*Ardeola ralloides*, *Casmerodius albus*, *Ardea purpurea*), ібіси (*Plegadis falcinellus*), крячки (*Chlidonias niger*, *Ch. leucopterus*, *Ch. hybridus*), качки (*Anas clypeata*, *A. querquedula*, *A. platyrhynchos*), пастушки (*Porzana*), лиски (*Fulica atra*), курочки (*Gallinula chloropus*) та лебеді-шипуні (*Cygnus olor*) втрачають свої гніздові колонії, але зможуть відновити свою популяцію протягом 3-7 років. Відновлення популяцій хижаків, таких як болотяний лунь (*Circus aeruginosus*), потребуватиме більше часу (5-10 років).

Затоплена територія є біотопом специфічної флори, включаючи багато видів, поширених виключно в цьому регіоні. Серед них – ендеміки Нижньодніпровських пісків, такі як *Centaurea brevipes*, *Jurinea laxa*, *Thymus borysthenticus*, а

також ендемічні для Буга-Дніпра види *Alyssum savranicum*, *Crataegus alutacea*, *Agropyron dasyanthum* та *Goniolimon graminifolium*.

Може здатися, що вода не може зашкодити рослинам. Однак це стосується насамперед рослин, що мешкають у піщаних екосистемах, для яких навіть підвищення рівня ґрунтових вод може бути згубним. Піщані біотопи, як прибережні, так і континентальні, з їх унікальною флорою і фауною, найбільше постраждали від затоплення. Водні місця існування також сильно постраждали через забруднення води.

Більша частина території, що постраждала від вибуху Каховської ГЕС у зоні затоплення, має статус природоохоронної території на національному та міжнародному рівнях. За оцінками Державної екологічної інспекції, під водою опинилося 333 тис. га природоохоронних територій. Майже вся територія затоплення (близько 100 тисяч гектарів) нижче греблі була природно-заповідним фондом. Експерти зазначають, що постраждало понад 50 об'єктів природно-заповідного фонду. Слід зазначити, що територія Чорноморського біосферного заповідника перебуває під охороною з 1927 року і входить до Всесвітньої мережі біосферних заповідників ЮНЕСКО [6]. Затоплена територія повністю або частково охоплює 9 об'єктів мережі «Емеральд», створених рішеннями Ради Європи у 2009-2020 роках. Втрата природних особливостей цих територій ставить під загрозу зобов'язання України щодо збереження цих територій для всієї Європи.

Дельта Дніпра, що займає площу 33630 га, внесена до списку водно-болотних угідь міжнародного значення відповідно до Рамсарської конвенції. Знищені угіддя: Два Рамсарські угіддя, розташовані безпосередньо в акваторії Каховського водосховища, були повністю знищені внаслідок його осушення («Архіпелаг Великі і Малі Кучугури» і «Заплава Сім Маяків»). Відбулось значне хімічне та мікробіологічне забруднення морської акваторії. Це, у свою чергу, може негативно вплинути на екосистеми морських і приморських Рамсарських угідь, розташованих уздовж чорноморського узбережжя (наприклад, лимани), які залежать від певного балансу солоності та чистоти води [7-9].

В результаті катастрофічної повені постраждала не тільки річка Дніпро, а й її притоки, такі як

Інгулець і Віріовчина. Нижні течії цих річок на багато кілометрів затоплені водою, що випущена з Каховського водосховища. Станом на ранок 7 червня 2023 року в цих річках спостерігається зворотний потік. Як наслідок, постраждали природні екосистеми вздовж берегів цих річок. Оскільки русла річок були сильно регульовані, вздовж їх берегів сформувалися наземні екосистеми неводного типу. До того ж, забруднювачі, підняті з дна водосховища зворотним потоком, потрапляють у ці річки.

Наслідки для Чорного моря

Скидання приблизно 18 км³ прісної води, мулу та забруднюючих речовин із Каховського водосховища спричинило короточасні, але нищівні наслідки для північно-західної частини Чорного моря та Дніпро-Бузького гирла. У перші дні після теракту солоність води на узбережжі Одеси (наприклад, пляж «Ланжерон») зменшилася майже в 3 рази від норми. Різке опріснення, що співпало з періодом нересту, спричинило масову загибель донних організмів (бентосу), зокрема мідій та ікри, що призвело до скорочення прибережної популяції цих видів. Найбільш руйнівні та довготривалі наслідки були пов'язані не з опрісненням,

а із забрудненням, яке несла ця вода. Дніпро-Бузький лиман виступив як головний буфер, прийнявши основну масу мулу, сміття та домішок. З дна Каховського водосховища та затоплених територій у ПЗЧМ потрапили: Нафтопродукти та важкі метали (залізо, мідь, цинк). Органічні забруднювачі (пестициди та промислові хімікати). Вміст заліза на деяких ділянках біля Одеси перевищував норму у 9 разів [10]. Епідеміологічна загроза: Забруднення фекальними масами та вмістом затоплених скотомогильників і кладовищ створило високий ризик спалаху кишкових інфекцій (сальмонельоз, холера). Велика кількість біогенних елементів (органіки та добрив), винесена у море, спричинила інтенсивне цвітіння водоростей, що охопило до 45,8% площі ПЗЧМ і призвело до формування зон гіпоксії (браку кисню).

Чорне море, завдяки своєму об'єму, поступово поглинуло та розсіяло прісну воду і, за даними 2024 року, почало відновлюватися від первинного шоку, вплив не можна назвати некатастрофічним. Знищення значної частини популяцій, хімічне забруднення величезних акваторій (понад 32000 км²) та втрата буферних екосистем у лимані є екоцидом, наслідки якого будуть відчутні ще десятиліттями [10]. Руйнування греблі Каховської ГЕС спричинило не лише потоп, але й масовий викид



Рисунок 1. Наслідки підриву Каховської ГЕС

отруйних речовин, що формує найбільший екологічний вплив на морську екосистему за останні десятиліття [11, 12].

Підтоплення АЗС, промислових споруд та складів спричинило потрапляння у воду нафтопродуктів (пального та мастил), а також 106 органічних забруднювачів, зокрема пестицидів. Ці субстанції є шкідливими для водних істот, утворюють плівку на поверхні та спричиняють загибель фауни, що засвідчено спостереженнями мертвої риби та креветок на узбережжі Одещини.

Затоплення стічних ям, скотомогильників та сміттєзвалищ спричинило надходження хвороботворних мікроорганізмів [13]. Це збільшило загрозу спалаху кишкових недуг (зокрема, холери та сальмонельозу), що було зареєстровано у вигляді критичного перевищення мікробіологічних показників у морській воді. На рис. 1 вказана загальна схема наслідків підриву Каховської ГЕС.

Оцінка вартості екосистемних послуг (на прикладі втраченого врожаю зерна та рибних втрачених ресурсів через підлив Каховського водосховища)

Оцінка вартості екосистемних послуг, зокрема втрачених врожаю зерна та рибних ресурсів після підливу Каховського водосховища, є надзвичайно важливою з наукового, управлінського, економічного та міжнародно-правового погляду.

$$\text{Середня вартість врожаю (СВВ)/га} = \frac{\text{Загальна вартість врожаю}}{\text{Загальна площа зрошення}}$$

$$\text{СВВ} = \frac{1,5 \text{ млрд}}{584 \text{ 000 га}} = 2 \text{ 568 49 \$ / га}$$

Збитки за втрачений врожай зерна.

$$\text{ВЗ} = \frac{\text{Об'єм зерна}}{\text{т}} \times \text{Середня вартість зерна}$$

$$\text{ВЗ} = 100 \text{ 000 (т)} \times 254,75 (\text{ \$ / т}) = 25 \text{ 475 000 \$}$$

Збитки для рибного господарства.

$$\text{ЗРГ} = \frac{\text{Збитки від загибелі дорослих особин риби (грн)}}{\text{Обсяг загиблих дорослих особин риби (т)}}$$

$$\text{ЗРГ} = \frac{4 \text{ млрд (грн)}}{95 \text{ 000 (т)}} = 42 \text{ 105 26 (грн / т)}$$

Відновлювані заходи

Відновлювальні заходи після руйнування Каховської ГЕС ґрунтуються на комплексі дій короткотривалого, середньотривалого та довготривалого характеру, які формують цілісну адаптаційну траєкторію регіону (табл. 1). Кожна група заходів виконує свою функцію [14-16]:

- короткотривалі спрямовані на оперативну стабілізацію ситуації та мінімізацію негайних ризиків;
- середньотривалі забезпечують відновлення ключових екосистемних функцій, інфраструктури та місцевих соціально-економічних процесів;
- довготривалі пов'язані з формуванням стійких природних, економічних та управлінських систем, здатних запобігати подібним катастрофам у майбутньому.

На рис. 2 зображена адаптаційна модель. Адаптаційна модель розроблена з метою забезпечення стійкого відновлення територій, мінімізації екологічних і соціально-економічних ризиків та формування методологічної основи для управлінських рішень у надзвичайних умовах. Модель базується на принципах превентивності, інтегрованого управління водними ресурсами, екосистемного підходу та багаторівневого планування.

До гідрологічного аналізу відносяться оцінка змін рівнів води, течій, втрати водосховища та прогноз формування нового гідрологічного режиму. Екологічна оцінка включає стан біорізноманіття, деградацію екосистем, засолення ґрунтів, зміна русла; забруднення води, ґрунтів та донних відкладів. Соціально-економічний аналіз базується на наслідках для сільського господарства та зрошення; впливу на інфраструктуру, житловий фонд, зайнятість. Оцінка ризиків та вразливості передбачає визначення найуразливіших об'єктів: водопостачання, екосистеми, агросектор, інфраструктура. Сценарії гідрологічних змін та екосистемної динаміки складаються з варіантів формування нових водних систем та прогнозу підтоплень або деградації територій, а також відновлення водно-болотних угідь та можливості ревайлдингу, природного регенераційного розвитку. Сценарії соціально-економічного розвитку передбачають перспективи аграрного виробництва та адаптацію інфраструктури до нових умов.

Таблиця 1

Відновлення та підвищення стійкості території після руйнування Каховської ГЕС

Дії, спрямовані на відновлення та підвищення стійкості території		Результат
короткострокові	Rapid assessment (0–3 міс.) – картування зон пошкодження.	Дозволить фіксувати площі підтоплених, осушених або зруйнованих територій; виявляти ділянки з найвищим рівнем забруднення; вчасно реагувати на погіршення якісних показників питної води; оперативно моніторити уразливі групи населення.
середньострокові	Comprehensive assessment (3–18 міс.) – детальна інвентаризація.	Дозволить отримати повну деталізовану інвентаризацію екосистем і природних ресурсів; кількісно оцінити втрати екосистемних послуг; провести розгорнутий хімічний та біологічний аналіз; виконати економічну оцінку збитків та витрат на відновлення.
довгострокові	Моніторинг – тривале спостереження.	Дозволить моніторити донні відкладення, спостерігати за водою, ґрунтами, біотою; контролювати проникнення важких металів у харчовий ланцюг; забезпечить соціальний моніторинг повернення населення.



Рисунок 2. Адаптаційна модель підвищення резильєнтності територій Півдня України після руйнування Каховської ГЕС

До планувально-управлінського блоку входить: зонування ризиків; нові межі землекористування; визначення територій, що потребують рекультивції; модернізація систем зрошення; створення альтернативних водних резервів; запровадження водоощадних технологій; підтримка громад, що втратили засоби існування; розвиток альтернативної економічної діяльності; відновлення критичної інфраструктури. Система постійного екологічного моніторингу включає моніторинг води, ґрунтів, якості повітря, ландшафтних змін. Соціально-економічний моніторинг включає оцінку відновленої інфраструктури, зайнятості, безпеки.

Висновки

Розроблена адаптаційна модель підвищення резильєнтності територій Півдня України після руйнування Каховської ГЕС демонструє, що відновлення регіону потребує комплексного, багаторівневого та циклічного підходу. Модель охоплює весь спектр процесів – від оперативної діагностики до довгострокового стратегічного планування – і дозволяє системно оцінювати наслідки катастрофи, формувати обґрунтовані управлінські рішення та зменшувати вразливість природних і соціально-економічних систем. Імплементация запропонованої адаптаційної моделі сприятиме підвищенню стійкості територій Півдня України до екологічних катастроф, забезпечить довготривалу екологічну безпеку, створить умови для сталого просторового розвитку та підвищення добробуту населення. Модель може бути використана як методологічна основа для стратегічного планування відновлення в умовах воєнних та техногенних ризиків, а також як приклад адаптивного управління у надзвичайних ситуаціях.

Список використаної літератури

1. Підлив Каховської ГЕС завдав Україні щонайменше \$2 млрд прямих збитків – перші обрахунки KSE Institute - Kyiv School of Economics. Kyiv School of Economics. URL: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/pidriv-kahovskoyi-ges-zavdav-ukrayini-shhonaymenshe-2-mlrd-pryamih-zbitkiv-pershi-obrahunki-kse-institute/> (дата звернення: 21.11.2025).

2. Пендюр Н. Відновитись після екоци-

ду: минуле й майбутнє Каховського водосховища. UAnimals. URL: https://uanimals.org/media/statti/vidnovytypisliakotsydu/?gad_source=1&gad_campaignid=22819563040&gbraid=0AAAAApMfbVDcx7qpjrWXmtNH8Ex22LcBn&gclid=CjwKCAiAuIDJBhBoEiwAxhgyFuGbZnqIE6PlfyfK5G2VVeTtgMOWaez6HH5LfxVRjCdHkxrGg9ugERoCylQQAvD_BwE (дата звернення: 13.11.2025).

3. Підлив Каховської ГЕС: попередні висновки і можливі наслідки - Екодія. Екодія. URL: https://ecoaction.org.ua/pidryv-kakhovskoi-hes-poperedni-vysnovky.html?gad_source=1&gad_campaignid=16718043480&gbraid=0AAAAACVR_NQ8_gXfFzy38wx7wJmn3ZOsq&gclid=CjwKCAiAuIDJBhBoEiwAxhgyFgvhRmav6LWnqgQk8bIavd1SWWha7PIptLVPXnH2YTbkxv v1NcM_XhoCcKcQAvD_BwE (дата звернення: 17.11.2025).

4. Катастрофа Каховського водосховища: рік «післязавтра» і перспектива майбутнього: Збірник тез доповідей за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції, 06-07 червня 2024 р / за ред. Д. С. Мальчикової, О. Є. Ходосовцева, І. О. Пилипенка. Херсон: Херсонський державний університет/ 2024. 53 с. Доступно: <https://ekhsuir.kspu.edu/handle/123456789/19943>

5. Василюк О.В Колодежна В.В Бузевич І.Ю Демченко В.О Куземко А.А Максименко М.Л Мойсієнко І.І Пархоменко В.В Романов П.В Сон М.О Темченко Є.А Філюта К.О. Великий Луг чи Каховське водосховище: сучасне бачення. 2-ге вид. Чернівці : Друк Арт, 2025. 128 с.

6. Верховна Рада України. Про запобігання нецільовому використанню земель, які займало Каховське водосховище, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 12 березня 2024 р. № 286 [Internet]. Верховна Рада України; 2024 Mar 12 [cited 2024 Dec 22]. Available from: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zapobihannia-netsilovomu-vykorystanniu-zemel-iaki-zaimalo-kakhovske-t120324>

7. Романь А. М. Підлив Каховської ГЕС: техногенна катастрофа чи шанс на екологічне майбутнє України. Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки. 2024. №2. С. 98-104. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-2-15>

8. Sanina, I. V., & Lyuta, N. G.. Екологічні наслідки підливу греблі Каховської ГЕС і шля-

хи вдосконалення водопостачання населення. Mineral resources of Ukraine. 2023. №2. С. 50-55.

9. А. В. Мартюхін, Н. О. Волошина. Екологічні наслідки руйнування каховського водосховища, протидія терористичним актам у міському середовищі: збірник матеріалів Наукового форуму. Навчально-науковий інститут права та політології УДУ імені Михайла Драгоманова (м. Київ, 21 червня 2023 р.). Київ : Вид-во УДУ імені Михайла Драгоманова, 2023. С. 271- 272. 4.

10. Беліцький О. С., Полукаров Ю. О. Екологічні наслідки підриву греблі Каховської ГЕС. Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки: Збірник матеріалів Двадцять дев'ятої Всеукраїнської науково-методичної конференції (з участю студентів), [м. Київ], 16 листопада 2023 р. / КПП ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2023. С. 29-32.

11. Екологія-Право-Людина. Відбудова Каховської ГЕС: передчасне рішення КМУ [Internet]. Екологія-Право-Людина; 2024 [cited 2025 січ 13]. Available from: <https://epl.org.ua/announces/vidbudova-kahovskoyi-ges-peredchasne-rishennya-kmu/>

12. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Оцінка впливу на довкілля проекту будівництва Каховської ГЕС-2 [Internet]. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України; [cited 2024 Jan 9]. Available from: <http://eia.menr.gov.ua/uk/case/id-6106>

13. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Повідомлення про оприлюднення проекту розпорядження Кабінету Міністрів України про затвердження плану заходів,

спрямованих на притягнення держави-агресора до відповідальності за екологічні збитки [Internet]. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України; 2024 May 7 [cited 2024 May 13]. Available from: <https://mepr.gov.ua/povidomlennya-pro-oprylyudnennya-proyektu-rozporyadzhennya-kabinetu-ministriv-ukrayiny-pro-zatverdzhennya-planu-zahodivspryamovanyh-na-prytyagnennya-derzhavy-agresora-do-vidpovidalnosti-za-ekologichn/>

14. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Рік після теракту рф на греблі Каховської ГЕС: Екокомітет провів виїзне засідання на Херсонщині [Internet]. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України; 2024 січень 3 [цитовано 2024 грудень 18]. Available from: <https://mepr.gov.ua/rik-pislya-teraktu-rf-na-greblu-kahovskoyi-ges-ekokomitetproviv-vyyizne-zasidannya-na-hersonshhyni/>

15. Національна академія наук України. Каховська катастрофа: наслідки для біорізноманіття і його охорони. [Internet]. Національна академія наук України; 2024 Mar 5 [cited 2024 Mar 5]. Available from: <https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=11102>

16. Національна академія наук України. Каховське водосховище – рік після підриву греблі [Internet]. Національна академія наук України; [cited 2025 січ 14]. Available from: <https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=11414>

НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ КУЛЬТУРИ МОЛОДІ В КОНТЕКСТІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Олександр МУДРАК¹, Олена МАЛЯР¹, Галина МУДРАК², Тетяна МОРОЗОВА³

¹КЗВО «Вінницька академія безперервної освіти»

²Вінницький національний аграрний університет

³Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»

ov_mudrak@ukr.net,

malyar.o@academia.vn.ua,

galina170971@ukr.net,

tetiana.morozova@ukr.net

Анотація

Мета статті полягає в обґрунтуванні науково-методичних підходів до розвитку екологічної культури молоді в контексті сталого розвитку як пріоритетного чинника успішного розв'язання сучасних екологічних проблем. **Методологія** дослідження ґрунтується на формуванні екологічної культури особистості на основі еколого-педагогічних концепцій взаємозв'язку природи, людини і суспільства, а також на психологічних теоріях, що акцентують значення діяльності у становленні особистості. Вони охоплюють теоретичні засади екологічної освіти і виховання, концепції проблемно-розвивального підходу та компетентнісного навчання особистості.

Наукова новизна полягає у комплексному системному аналізі суті розвитку екологічної культури молоді, як багаторівневого феномена, що включає еволюційний і екологічно-поведінковий аспект (культура екологічної діяльності, екологічні ціннісні орієнтири).

Висновки

Розвиток екологічної культури молоді є важливим чинником гармонізації відносин між людиною, суспільством і природою.

Екологічна культура молоді формується під впливом природного середовища, соціальних норм, традицій і освітніх процесів, відіграючи важливу роль у становленні екологічної свідомості, відповідальності та компетентності особистості.

Формування екологічної культури у молоді можливе лише за умови комплексної взаємодії освітніх, правових, економічних і культурних механізмів, що сприятимуть вихованню екологічно свідомого, соціально відповідального та компетентного покоління.

Ключові слова: екологічна культура, молодь, бехівіористична екологія, екологічна освіта, природа.

SCIENTIFIC AND OBJECTIVE BASES OF FORMING YOUTH'S ECOLOGICAL CULTURE IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Oleksandr MUDRAK¹, Olena MALIAR¹,
Galina MUDRAK², Tetyana MOROZOVA³

¹Public Higher Educational Establishment
«Vinnytsia Academy of Continuing Education»

²Vinnytsia National Agrarian University

³State Scientific Institution «Institute of Ecological
Restoration and Development of Ukraine»

Abstract

The purpose of the article is to determine and substantiate theoretical and methodological approaches to the development of environmental culture of youth in the context of sustainable development as a factor in the successful solution of modern environmental problems. The research **methodology** for the development and formation of an individual's environmental culture is based on eco-pedagogical concepts of the interconnection between nature, humans, and society, as well as on psychological theories that emphasize the role of activity in personality development. They cover the theoretical foundations of environmental education and upbringing, the concepts of a problem-developmental approach and competence training of the individual. **The scientific novelty** lies in a comprehensive systematic analysis of the essence of the development of the ecological culture of young people, as a multi-level phenomenon that includes evolutionary and ecological-behavioral aspects (culture of environmental activity, environmental value guidelines).

Conclusions

The development of ecological culture of young people is an important factor in harmonizing relations between man, society and nature. The environmental culture of young people is shaped by the influence of the natural environment, social norms,

traditions, and educational processes, playing a crucial role in the formation of environmental awareness, responsibility, and personal competence. The formation of environmental culture in young people is possible only under the condition of comprehensive interaction between educational, legal, economic, and cultural mechanisms that contribute to fostering an environmentally conscious, socially responsible, and competent generation.

Key words: environmental culture, young people, behavioral ecology, environmental education, nature.

Актуальність теми

В Україні, як і в інших країнах, екологічні проблеми, такі як забруднення повітря і води, нерациональне використання природних ресурсів, деградація ґрунтів і зміни клімату, загрожують економічному та соціальному добробуту. Одним із важливих чинників подолання цих викликів є формування екологічної культури особистості, зокрема молоді, яка є рушійною силою майбутніх трансформацій. Молодь є ключовою соціальною групою, оскільки саме вона формує майбутній інтелектуальний та професійний потенціал держави. У юнацькому віці закладаються життєві цінності, звички та поведінкові моделі, які визначатимуть ставлення до екологічних проблем у майбутньому. Водночас, українська молодь часто стикається з браком системної екологічної осві-

ти, низькою поінформованістю про принципи сталого розвитку та недостатньою мотивацією до екологічно відповідальної поведінки.

Формування екологічної культури у молоді як чинника сталого розвитку є необхідною умовою для інтеграції України до європейських екологічних стандартів, розвитку «зеленої» економіки та досягнення екологічної безпеки.

Це питання особливо актуальне в умовах воєнних та післявоєнних викликів, коли екологічна ситуація в країні погіршується через руйнування інфраструктури, забруднення територій і необхідність відновлення природного середовища.

Таким чином, дослідження процесу розвитку екологічної культури молоді в умовах сучасності є актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору, оскільки сприяє розробці нових освітньо-екологічних стратегій, активізації молодіжного екологічного руху та підвищенню рівня екологічної відповідальності серед осіб юнацького віку.

Аналіз джерел та останніх досліджень

Дослідження розвитку та формування екологічної культури, екологічної освіти і сталого розвитку активно займаються українські та зарубіжні науковці.

У працях В. М. Бойка, М. І. Михальченко, В. В. Пащенко досліджується соціально-філософський аспект екологічної культури та свідомості в контексті екологічної освіти в закладах вищої освіти. Проблемою взаємозв'язку розвитку екологічної культури молоді та суспільного розвитку займалися такі вчені, як Грінченко Т. М., Яковенко Ю. В., Рідей Н. М., Кучеренко Ю. А., Білявський Г. О., Саєнко Т. В., Тарасенко Г. С., Пустовіт Г. П. та інші.

Дослідженням розвитку і формування екологічної культури молоді описано у працях зарубіжних науковців (Мікелетті С., Брандлаб Є., Мейс Р., Барсбай Т., Лукас Д., Пондорфер А., Собчик В.), які розглядають її контексті еволюційної та біхевіористичної екології [].

У дослідженнях зазначених науковців висвітлюються теоретичні і практичні аспекти становлення та розвитку екологічної культури молоді, а також розглядається її зв'язок з екологічним вихованням і освітою.

Мета дослідження є визначення і обґрунтування науково-методичних підходів до розвитку екологічної культури молоді в контексті сталого розвитку як чинника успішного розв'язання сучасних екологічних проблем.

Виклад основного матеріалу

У сучасній науці екологічна культура розглядається в рамках біхевіористичної екології. Цей напрям досліджує, як вплив навколишнього середовища спричиняє зміни в поведінці тварин і дозволяє порівнювати їх із людською поведінкою (Davies, Krebs, & West, 2012), зосереджуючись на концепції адаптивної фенотипової пластичності. Запропонована структура цієї концепції має кілька аспектів. По-перше, вона окреслює екологічні стани, які слід пов'язати з культурними варіаціями і досліджує у процесі їх реалізації. По-друге, цей підхід сприяє інтеграції різних існуючих пояснень, створюючи основу для розуміння поняття екологічної культури. По-третє, біхевіористична екологія дозволяє поєднати психологічні і екологічні підходи, аналізуючи розвиток і формування екологічної культури як у тварин, так і в людському суспільстві. По-четверте, вона охоплює різні теоретичні підходи до вивчення впливу культур на виховання в суспільстві та змін, які відбувалися в цивілізації впродовж історії [7].

Поняття екологічної культури досліджується не лише в екологічній науці, а й у таких галузях, як психологія, зоологія і генетика. У зв'язку з цим ми представляємо модель, запропоновану закордонними науковцями (Alberto J. C. Micheletti, Eva Brandlab і Ruth Mace), яка пояснює процес формування екологічної культури в контексті поведінкової екології людини та еволюційної психології. У ній розглядається взаємодія трьох еволюційних підходів до аналізу людської поведінки, зокрема культурних особливостей на різних етапах розвитку цивілізації [4].

Поведінкова екологія людини, еволюційна психологія та механізми культурної передачі (позначені зеленим, синім і помаранчевим відповідно) висвітлюють різні еволюційні аспекти поведінки та культури людини. Варто зазначити, що деякі з цих підходів розширюють розуміння механізмів культурної передачі, зокрема її способів і процесів, тоді як інші поглиблюють аналіз

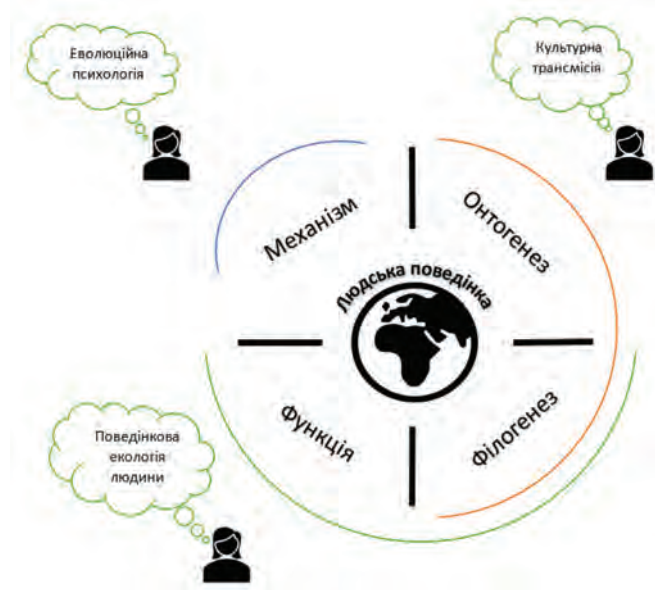


Рисунок 1. Модель розвитку екологічної культури в межах біхевіористичної екології.

еволюційної психології і онтогенезу, залежно від того, як визначається психологічний механізм у контексті екологічної культури [4].

Екологічна культура є широким поняттям, проте в наукових джерелах вона має різну інтерпретації. Загалом її можна визначити як сферу людської діяльності і мислення, що значною мірою впливає на природне існування сучасної цивілізації та її сталий розвиток.

Барсбай Т., Лукас Д. і Пондорфер А. наголошують на взаємозв'язку різних форм екологічної поведінки, що базуються на місцевих традиціях ставлення людини до природи. Вони зазначають, що ці особливості відіграють ключову роль у формуванні екологічної культури. Аналіз учених свідчить про те, що екологічна культура розвивалася під впливом приналежності до певної спільноти та адаптації до її норм і правил [5].

Як зазначає Р. Бойд адаптація людини до місцевої екологічної ситуації є результатом процесу культурної еволюції, в якому культурний відбір сприяв розвитку екологічної культури, оскільки вона була адаптована в конкретному середовищі [6].

Екологічна культура має міждисциплінарний характер і тісно пов'язана з відповідальністю людства за збереження природних ресурсів, що передбачає оцінку наслідків діяльності суспільства. Сучасна наука виокремлює два основні підходи до визначення екологічної культури:

– екологічний підхід (культура екологічної діяльності), який охоплює сукупність досягнень суспільства у сфері збереження і відновлення природного середовища;

– культурологічний підхід (екологічний аспект розвитку культури), що розглядає історично сформовані механізми подолання негативних змін довкілля, спричинених діяльністю людини [3].

Науково-методичну основу дослідження розвитку і формування екологічної культури особистості становлять філософські концепції взаємозв'язку природи, людини і суспільства; психологічні і педагогічні концепції, що підкреслюють роль діяльності у формуванні і розвитку особистості; теорії екологічної освіти і виховання; ідеї особистісно орієнтованого навчання; концепція проблемно-розвивального навчання та компетентнісного підходу в освіті.

Щодо екологічної культури як явища, що формується з народження, І. Алмашій зазначає, що її розвиток можливий лише за умови наявності в індивіда відповідного рівня екологічної культури і свідомості, становлення яких розпочинається в ранньому дитинстві і триває впродовж усього життя [1].

Фундаментальність і універсальність екологічної аксіоматики, а також її антропоцентричний вимір зумовлюють багатоваріантність функцій екологічної культури та розмаїття підходів до

їх класифікації [9]. З огляду на спосіб ціннісного освоєння природи, можна виділити такі функції екологічної культури:

1. Адаптивна функція – відображає здатність людини і суспільства до пристосування в межах екосфери, особливо в умовах порушення структурно-функціональної єдності метасистеми і проявів ірраціональності.

2. Ціннісно-нормативна і регулятивна функція – передбачає переосмислення існуючих систем цінностей, зміну ставлення до природи та формування нормативних засад взаємодії, що відповідають сучасним реаліям і перспективам забезпечення життєдіяльності.

3. Інтегруючо-диференціююча функція – забезпечує виявлення відмінностей і переваг екологічних субкультур, їхню інтеграцію в систему загальновизнаних цінностей із збереженням унікальності та автентичності.

4. Комунікативна функція – сприяє координації, інтеграції і консолідації суб'єктів природокористування на основі спільних цінностей, забезпечує передачу значущої інформації між поколіннями та формує історичну ідентичність етносів.

5. Функція соціалізації – орієнтована на виховання особистості, здатної до активної участі у вирішенні актуальних екологічних проблем і самореалізації в умовах цифрової трансформації.

Формування екологічної культури є багатовимірною соціально-екологічною проблемою, що потребує системного підходу, зокрема залучення політико-правових, фінансових та освітніх механізмів. Інтегральним показником рівня екологічної культури сучасного студента виступає екологічна компетентність, яка формується у процесі екологічної освіти і виховання, що базується на екологічній етиці і проявляється через екологічну свідомість. Формування екологічної культури у молоді включає такі компоненти:

- систему наукових знань про взаємодію в межах триєдиної системи «природа–суспільство–людина», що сприяє розумінню процесів та наслідків цієї взаємодії;
- інтелектуальні і практичні навички, пов'язані з оцінкою стану довкілля, прогнозуванням наслідків антропогенного втручання, а також дотриманням екологічних норм поведінки та діяльності;
- емоційно-ціннісне ставлення до природи та довкілля, що проявляється у природоохорон-

ній діяльності, спрямованій на збереження та покращення екологічного стану та здоров'я населення [8, 9].

Проблематика формування екологічної культури молоді тісно пов'язані з економічними і політичними процесами, які відображають суперечності сучасного суспільства. Глобальні екологічні виклики, спричинені порушенням екосистем на планетарному рівні, обумовили формування міжнародного екологічного права. Тому, одним із актуальних завдань вищої освіти є підготовка майбутніх спеціалістів, обізнаних у питаннях екологічної культури відповідно до вимог їхньої професійної діяльності. Сучасний підхід до формування екологічної культури у студентів спрямований на формування здорового, мобільного, конкурентоспроможного, морально зрілого та професійно культурного фахівця, здатного до активної діяльності в сучасних умовах [2].

Зазначимо, що формування екологічної культури залежить від соціального середовища і сфери діяльності людини, зокрема освітньої, релігійної, мистецької, науково-пізнавальної, технологічної, економічної, політичної тощо. У кожній з них екологічна культура набуває специфічних змістових характеристик.

Висновки

Формування екологічної культури молоді є багатовимірним процесом, що вимагає комплексного підходу та інтеграції різних наукових дисциплін, зокрема біхевіористичної екології, соціології, педагогіки та права. Дослідження підтверджують, що екологічна культура розвивається під впливом природного середовища, соціальних норм, традицій і освітніх практик, формуючи в особистості екологічну свідомість, компетентність і відповідальність. Сучасні екологічні виклики вимагають активного залучення молоді до процесів сталого розвитку та екологічної трансформації суспільства. Інтеграція екологічної освіти у закладах вищої освіти сприяє підготовці фахівців, здатних відповідально ставитися до природокористування, прогнозувати наслідки антропогенного впливу та впроваджувати екологічно раціональні практики.

Таким чином, розвиток і формування екологічної культури молоді є ключовим чинником гар-

монізації відносин між людиною, суспільством і природою. Її розвиток можливий лише за умови ефективної взаємодії освітніх, правових, економічних та культурних механізмів, що сприятимуть формуванню екологічно свідомого, соціально відповідального та професійно компетентного покоління.

Список використаної літератури

1. Алмашій І.І. Особливості формування екологічної культури молоді природоцентричного типу в діяльності громадських організацій. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: «Педагогіка. Соціальна робота»*, 30. 2014. С. 9-12.

2. Биркович Т.І., Паламарчук С.П., & Биркович В.І. Особливості прояву екологічної культури сучасної молоді в контексті екологічних викликів. *Питання культурології* (39). 2022. С. 101–111. <https://doi.org/10.31866/2410-1311.39.2022.256905>

3. Рідей Н.М., Кучеренко Ю.А. Індикатор сталості розвитку взаємин суспільства і природи – екологічна культура. *Таврійський науковий вісник. Екологія, іхтіологія та аквакультура № 91*. 2015. С. 180–200. URL: http://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/91_2015/38.pdf

4. Alberto J.C. Micheletti, Eva Brandl, Ruth Mace. What is cultural evolution anyway? *Behavioral Ecology*, Volume 33, Issue 4, 2022, P. 667–669, DOI: <https://doi.org/10.1093/beheco/arac011>

5. Barsbai T., Lukas D. Pondorfer A. Local convergence of behavior across species. *Science*, Vol 371, Issue 6526, 2021. P. 292-295 DOI: 10.1126/science.abb7481

6. Boyd R. A different kind of animal: how culture transformed our species. Princeton (NJ): Princeton University Press. 2018.

7. Davies N. B., Krebs, J. R., & West, S. A. An introduction to behavioural ecology. Hoboken, NJ: Wiley. 2012

8. Liulenko S. Development of Ecological Culture in Future Teachers of Biology and Ecology. *Pedagogy and Education Management Review*, (1(15)). 2024. P. 44-50 <https://doi.org/10.36690/2733-2039-2024-1-44>

9. Мудрак О., Морозова Т. Біоіндикація компонентів довкілля як важливий чинник природоохоронних технологій екологічної освіти. *Науковий вісник Вінницької академії безперервної*

освіти. Сер. Екологія. Публічне управління та адміністрування. 2024. С. 67–74. DOI <https://doi.org/10.32782/2786-5681-2024-2.08>

References

1. Almashii, I. I. (2014). Osoblyvosti formuvannia ekolohichnoi kultury molodi pryrodotsentrychnoho typu v diialnosti hromadskykh orhanizatsii [Features of Formation of Ecological Culture of Youth of Nature-centric Type in Activity of Public Organisations]. *Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series: «Pedagogy. Social Work»*, 30, 9–12 [in Ukrainian]

2. Byrkovych T., Palamarchuk S., Byrkovych V. (2022). Soblyvosti proiavu ekolohichnoi kultury suchasnoi molodi v konteksti ekolohichnykh vyklykiv. [Features of the Manifestation of the Ecological Culture of Modern Youth in the Context of Environmental Challenges]. *Pytannia kulturolohi*, (39), 101–111. <https://doi.org/10.31866/2410-1311.39.2022.256905> [in Ukrainian]

3. Ridei, N. M., & Kucherenko, Yu. A. (2015). Indykator stalosti rozvytku vzaiemyn suspilstva i pryrody – ekolohichna kultura [Indicator of Sustainability of Development of Society and Nature – Ecological Culture]. *Taurida Scientific Herald. Ecology, Ichthyology and Aquaculture*, 91, 180–200 [in Ukrainian].

4. Alberto J. C. Micheletti, Eva Brandl, Ruth Mace (2022). What is cultural evolution anyway? *Behavioral Ecology*, Volume 33, Issue 4, 667–669, DOI: <https://doi.org/10.1093/beheco/arac011> [in English].

5. Barsbai T., Lukas D. Pondorfer A. (2021). Local convergence of behavior across species. *Science*, Vol 371, Issue 6526, 292-295 DOI: 10.1126/science.abb7481 [in English].

6. Boyd R. (2018). A different kind of animal: how culture transformed our species. Princeton (NJ): Princeton University Press. [in English].

7. Davies N. B., Krebs, J. R., & West, S. A. (2012). An introduction to behavioural ecology. Hoboken, NJ: Wiley. [in English].

8. Liulenko S. (2024). Development of Ecological Culture in Future Teachers of Biology and Ecology. *Pedagogy and Education Management Review*, (1(15)), 44-50, DOI: <https://doi.org/10.36690/2733-2039-2024-1-44> [in English].

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE PHYSICAL PARAMETERS OF WASTEWATER

Valery Frolov, Olena Stepova, Oksana Illiash

Department of Applied Ecology
and Nature Management, National University
«Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»,
Poltava, Ukraine

Abstract

This paper presents a comprehensive methodology for determining the physical parameters of wastewater during its discharge into surface water bodies of various types, including rivers, lakes, and storage reservoirs. The proposed approach enables the assessment of impurity precipitation kinetics in wastewater and the identification of key factors influencing sedimentation and mixing processes in natural hydroecosystems. Particular attention is paid to the role of hydraulic particle size, density, shape, and mass, as well as to hydrological, physicochemical, and temperature conditions of receiving water bodies.

The methodology is based on classical hydromechanical principles, including gravitational and centrifugal force analysis, resistance forces of the aquatic environment, and dilution and mixing models. Mathematical relationships are applied to determine particle deposition rates under laminar and turbulent flow regimes, taking into account deviations from Stokes' law for fine and non-spherical particles. The influence of Brownian motion on ultrafine particles and the effects of turbulence, coagulation, and hydrodynamic complexation on heterogeneous particle mixing are also analyzed.

An algorithm for preliminary wastewater treatment at industrial and municipal enterprises prior to discharge into surface waters is proposed. This algorithm allows for the calculation of maximum

permissible concentrations of pollutants, suspended solids, biochemical oxygen demand, temperature, and acid–alkaline balance in wastewater, in accordance with sanitary and environmental standards. The applicability of the developed methodology is confirmed by comparing experimental data obtained from field measurements at wastewater–surface water mixing zones with calculated values, demonstrating high correlation and predictive reliability.

The implementation of the proposed methodology provides an effective tool for predicting the spatial and temporal distribution of pollutants in the water column and bottom sediments, including toxic metals. Its application contributes to improving environmental safety, protecting surface and groundwater resources, and enhancing the quality of drinking water sources in Ukraine under conditions of increasing anthropogenic pressure.

Keywords: wastewater discharge; surface water bodies; physical parameters; sedimentation kinetics; hydraulic particle size; mixing processes; environmental safety

Introduction

The problem of the aquatic environment quality in the World the long time has been one of the most important problems of human society [1-5]. As for Ukraine, the scale of anthropogenic impact on water bodies has already reached a critical point [6-8]. Today,

there are not surface water bodies left in Ukraine that would not change as a result of anthropogenic impact. The pollution level of rivers and lakes, as a result of harmful substances incoming, has reached critical levels. The results of sanitary and hygienic surface aquatic ecosystems assessment in Ukraine suggest that the main risk factor for human health is the use of surface and groundwater from different types of water sources (wells, pump rooms, etc.).

According to the current legislation of Ukraine, all wastewater must be treated from toxic impurities before being discharged to surface water bodies. Today, to meet these requirements, depending on the chemical composition of wastewater, various methods and ways to restore their quality characteristics are used [3, 9-12].

Industrial and domestic wastewater, before being discharged to surface water bodies, are subjected to purification to the required quality by mechanical, chemical, physically-chemical and biological methods. These methods are divided into recovery and destructive. Recovery methods involve the removal from wastewater and further processing of all valuable substances contained in them. At destructive methods, pollutants are destroyed by oxidation or reduction, and the products of destruction are removed from the water as a gases or sediments [1, 3-5, 11].

1. Description of physical parameters of reverse waters

Depending on the aquatic environment into which the wastewater enters, the processes of pollutants destruction contained in them and their transfer rate into certain distances (or suspended impurities sediment) will depend on many factors, namely: gravity, centrifugal force, gravitational force and centrifugation [3, 13].

The wastewater impurities deposition kinetics in hydroecosystems will be different and will depend on many parameters of a particular surface water body (flow rate, depth, temperature, chemical composition, density, etc.).

The main parameter in the calculation of deposition (hydraulic size) is the particles sedimentation rate to the reservoir bottom. When a particle is deposited on the reservoir bottom under the gravity action, the

driving force of a solid particle with a diameter d_r is described by the difference between its weight:

$$G = m_r q = \pi \frac{d_r^3}{6} p_r q, \quad (1)$$

and an Archimedean repulsive force equals the liquid weight in the volume of the particle:

$$A = m_0 q = \pi \frac{d_r^3}{6} p_0 q, \quad (2)$$

$$G - A = \pi \frac{d_r^3}{6} q (p_r - p_0), \quad (3)$$

where p_r – solid particle density, kg/m^3 , the resistance force of the aqueous environment, in which the particles contained in wastewater fall into, according to Newton will be presented as:

$$R = \int \frac{\pi d_r^3}{4} \cdot \frac{p_0 W_{oc}^2}{2}, \quad (4)$$

where $\int$ – the resistance coefficient of the aquatic environment, which depends on the particles deposition mode in the surface water. The deposition rate can be found from the condition of equality of force driving of the particle and resistance force of the aquatic environment into which the particle enters:

$$W_0 = \sqrt{\frac{4 d_r (p_r - p_0) q}{3 \int p_0}}, \quad (5)$$

In the laminar deposition mode at $\int = 24/R_e$ we obtain the Stokes formula:

$$W_0 = \sqrt{\frac{4 d_r^2 (p_r - p_0) q}{3 \int p_0}}, \quad (6)$$

There is also a minimum particles size, when a deviation from Stokes' law is observed and at $R_{er} \leq 10^{-4}$ very small particles deposition rate begins to be affected by the temperature factor of the aquatic environment molecules. Calculations have shown that at $d_r \approx 0.1 \text{ mcm}$ the particles don't sediment and chaotic Brownian motion is observed.

Non-spherical particles deposition rate is less than spherical particles deposition rate. For non-spherical particles, in the formulas for the equivalent diameter d_e determination, the volume V_r or the mass G_r of particles entering the aqueous medium is used:

$$d_e = \sqrt[3]{6V_r / \pi} = \sqrt[3]{6G_r / \pi p_r}, \quad (7)$$

When the wastewater sedimentation, there is a limitation of deposition, which is accompanied by the collision of particles, friction between them and changes in the velocities of large and small particles. This process occurs when wastewater enters lakes or other surface water bodies where there is no flow. If the wastewater enters rivers at different flow rates, the deposition and dissolution processes of their impurities are described taking into account many physicochemical, temperature and other factors. The turbulence, coagulation and hydrodynamic complexation affect the process of different shapes and masses particles mixing in the total volume of the hydroecosystem [2].

The inhomogeneous particles separation rate in the field of centrifugal forces is higher compared to these particles separation rate in the field of gravity. The mathematical relation of the speed of the centrifugal force to the force of gravity can be carried out by comparing the accelerations acting on the particles of impurities when entering the river with a certain flow velocity in the centrifugal and gravitational fields. In general, the centrifugal force P_c (H) is equal to:

$$P_c = \frac{mU_o^2}{r} = \frac{GU_o^2}{qr}, \quad (8)$$

where m – particle mass (kg); G – particle weight (H); U_o – angular velocity (m/sec); r – radius of rotation (m).

Dilution of wastewater is a process of reducing the concentration of impurities in the reservoirs into which they discharge, caused by mixing the wastewater with the aquatic environment. The intensity of the dilution process is quantitatively characterized by the multiplicity of dilution:

$$n = (C - C_r) / (C - C_o), \quad (9)$$

where C_o – concentration of impurities in wastewater, discharging into reservoirs (mg/m³); C_r and C – concentration of impurities in the reservoir before and after wastewater discharging respectively.

In flowing water bodies with a directed flow, the multiplicity of dilution in the calculated line n is determined by the formula:

$$n = (mQ + q) / q, \quad (10)$$

where m – mixing factor, which indicates what part of the water flow in the reservoir is involved in mixing; q – volume consumption of wastewater, discharging into surface water body with volume consumption of water Q in the reservoir.

With complete mixing of the wastewater, the concentration of impurities in the reservoir at any time is equal to:

$$C = t(C_o q + \sum C_A Q) / V, \quad (11)$$

where $t = V / (\rho + \sum Q - Q_n)$ – period of complete water exchange in the reservoir; V – reservoir volume; Q_n – water consumption in the reservoir without impurities.

Connection between sanitary requirements to the discharge conditions into reservoirs, ie compliance of the water composition and properties of reservoir used for water use with the established standards (Maximum Allowable Concentration) and the required degree of wastewater treatment before discharge into reservoirs in general can be described by the formula [3]:

$$C_c q + C_p m Q \leq (mQ + q) C_{mp}, \quad (12)$$

where C_c – concentration of pollutants (amount of harmful substances) of wastewater at which admissible norms will not be exceeded; q – water consumption discharge into the surface water body; C_p – the concentration of the same type of pollution in the water of the reservoir above the place of discharge of the considered runoff; Q – water consumption in the reservoir; C_{mp} – maximum permissible concentration of pollution (harmful substances) in the water of the reservoir.

The concentration of pollution m depends on many factors: the design of the outlet, the distance to the calculated line of discharge, hydraulic and hydrological parameters of the surface reservoir [4].

Converting formula (12), you can get the value of C_c , ie, the value of the pollutants concentration (harmful substances) in wastewater, which must be achieved as a result of their treatment and disposal by previous methods at enterprises:

$$C_c \leq mQ(C_{mp} - C_p)q + C_{mp}, \quad (13)$$

It should be noted that the conditions of wastewater mixing with the lakes and storage reservoirs are significantly different from the conditions of their mixing in rivers. The impurities concentration decreases significantly in the initial mixing zone, but complete mixing occurs at much greater distances from the place of discharge than in rivers. In addition, the mixing in time, direction and value of air velocity over lakes and storage reservoirs, which carry pollution in different directions from the discharge place. The mixing process and the chemical reactions rate that occur in lakes and storage reservoirs are influenced by the season and water temperature. Therefore, enterprises and organizations that discharge waste water into stagnant reservoirs should carry out the necessary and mandatory pre-treatment measures and make calculations of the wastewater treatment required degree according to the following algorithm:

1) to calculate the maximum permissible concentrations (MPC) of pollutants in wastewater:

$$C_c \leq C_B + m(C_{mp} - C_B), \quad (14)$$

2) to determine the concentration of suspended solids in wastewater:

$$C_B = V + mp, \quad (15)$$

3) to determine the allowable value biological oxygen demand (BOD) in wastewater:

$$L_c = \frac{n-1}{10-K_{c_i}}(L_{III} - L_B 10^{-K_{c_i}}) + \frac{L_{mp}}{10-K_{c_i}}, \quad (16)$$

where L_c – BOD in a stagnant reservoir before discharge; K – deposition rate constant O_2 in a stagnant reservoir;

4) to determine the allowable value BOD in wastewater by dissolved O_2 :

$$L_c = \frac{n-1}{K}(C_{O_{2n}} - KL_B - C_{O_{2n-1}}) - \frac{C_{O_{2n-1}}}{K} \quad (17)$$

where $C_{O_{2n}}$ – concentration of dissolved O_2 in a stagnant reservoir before discharge; $C_{O_{2n-1}}$ – MPC of dissolved O_2 , which must be in the settlement line after the discharge;

5) to determine the max allowable T° of wastewater:

$$T_c = nT_a + T_B, \quad (18)$$

where T_a – water temperature of surface watercourse after discharge; T_B – water temperature of surface watercourse before discharge.

6) to determine the permissible content of acid or alkali in wastewater, using a set of water samples with the following chemical analysis according to the formulas:

$$C_{CT_K} = (n-1)C_K \quad (19)$$

$$C_{CT_K} = (n-1)C_K \quad (20)$$

To establish the environmental risk during the discharge of wastewater to surface water bodies [14], to ensure environmental safety of surface water bodies, it is advisable to compare the experimental data with calculated by the formula [15]:

$$S_{\max} = S_n + S_{cm} \cdot B \left[\frac{0.14 \cdot q_{cm} \sqrt{\frac{N}{H}}}{x \cdot (Q_e + q_{cm}) \varphi} \right], \quad (21)$$

where $S_n = \frac{S_e \times Q_e + S_{cm} \times q_{cm}}{Q_e + q_{cm}}$ – the average concentration of impurities, mg/l; S_{cm} – the concentration of impurities in wastewater, mg/l; B – the average width of the riverbed, m; q_{cm} – water runoff, m³/sec; Q_e – river consumption, m³/sec; $\bar{H} = \frac{H}{B}$ – relative depth of the river; H – average depth of the river, m; φ – tortuosity parameter; x – distance from the source of pollution, m; $C = \frac{1}{R^n} \times R^{\frac{1}{6}}$ – Shezi coefficient; n – roughness factor; $R = \frac{\omega^n}{\chi}$ – hydraulic radius, m; $\chi = B + 2H$ $\omega = B \times H$ $N = \frac{M \times C}{g}$ – acceleration of gravity, m/sec²

1.2. Methodology of determination of physical parameters of reverse waters

The results of comparing experimental data (samples taken at the mixing places of wastewater with surface waters of a small river) with the calculated ones are presented in Fig.1.

It follows from the graph that the experimental results are quite accurately corrected with the calculated data. A comparison of experimental studies results and the results obtained by formula (21) gives grounds to apply a mathematical model to predict the

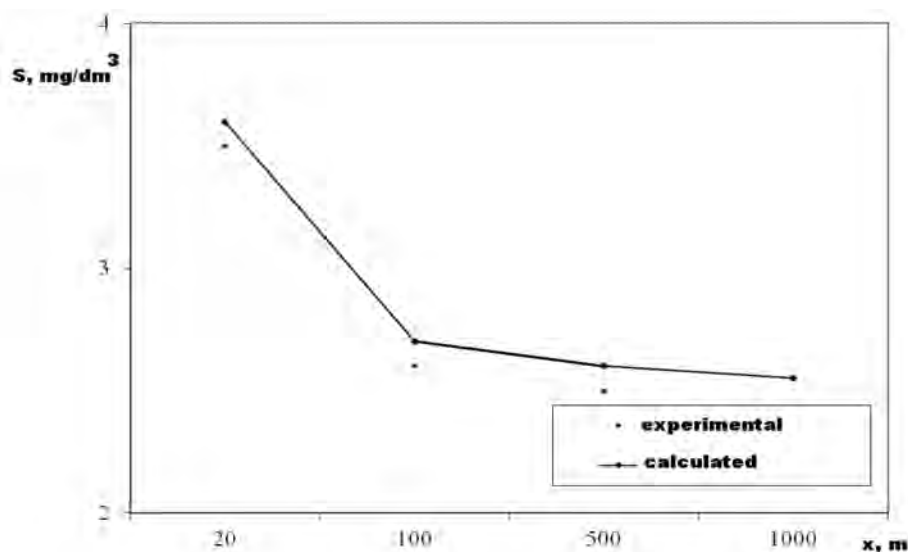


Fig. 1. The results of comparing experimental and calculated data

ecological state of reservoirs in real time to predict the spread in the water column and bottom sediments of toxic metals such as Cu, Zn, Ni, Mn and Cr.

The results of calculations (21) allow us to predict the reduction value of qualitative indicators of the pollutants concentration in surface water bodies (Fig. 2).

According to the predicted results, the maximum pollutants concentration reduction in surface water bodies, after mixing with wastewater, occurs at a distance to 200 m from the mixing point.

Conclusions. The proposed methodology to determine the physical parameters wastewater discharge into surface water bodies of different types allows:

- to determine the precipitation kinetics of im-

purities in wastewater and their dependence on concomitant factors;

- on the basis of hydraulic size to determine the deposition rate of different size and shape particles contained in wastewater;

- to determine the factors that affect the mixing process of different shapes and masses particles, the multiplicity of dilution in flowing and non-flowing reservoirs;

- to determine the characteristics and mixing factors of wastewater in river ecosystems, lakes and storage reservoirs;

- to propose an algorithm of measures of preliminary wastewater treatment by enterprises before discharge into surface water bodies.

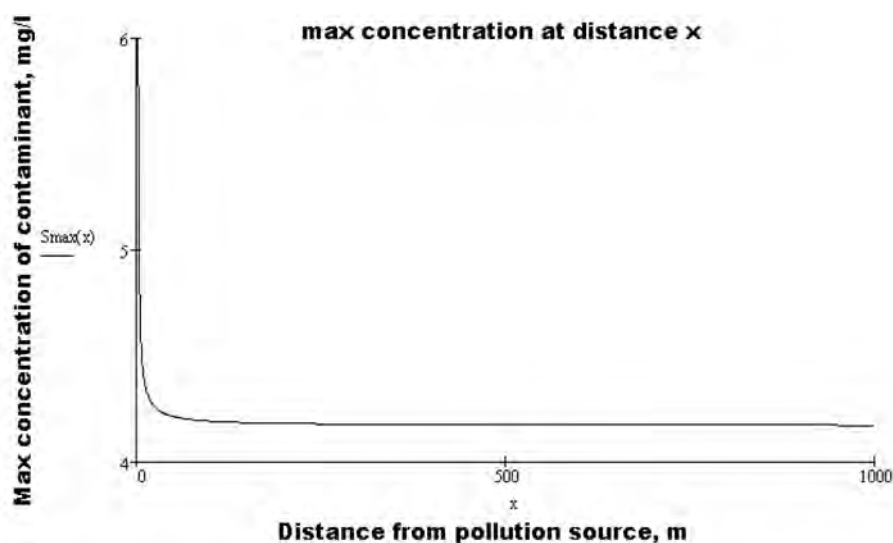


Fig. 2. Dynamics of pollutants concentration reducing in surface water bodies from a distance

Implementation and application of this methodology will determine the impact of wastewater on the quality and chemically-biological composition of surface water bodies of Ukraine, as well as significantly improve the quality of surface and groundwater, which is a water supply source for all residents of cities and towns of Ukraine.

References

1. Stepova O., Shara S. Development of water protection in European countries: relevance for Ukraine // *Environmental Problems*. – 2024. – Vol. 9, No. 4. – P. 249–253. – DOI: <https://doi.org/10.23939/ep2024.04.249>. (ena.lpnu.ua)
2. Proskurnin O., Malovanyy M., Belokon K., Rybalova O., Ivashchenko T., Tsapko N., Stepova O. Establishing Environmental Standardization of Wastewater Composition Based on Environmental Risk Assessment // *Journal of Ecological Engineering*. – 2022. – Vol. 23, Iss. 11. – P. 139–146. – DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/153602>. (jeeng.net)
3. Trus I. V., Prokopenko O. A., Stepova O. V., et al. Technology of the comprehensive desalination of wastewater from mines // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2020. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206192>. (ResearchGate)
4. Голік Ю. С., Ілляш О. Е., Степова О. В. Екологічний стан басейну річки Дніпро в Полтавській області // *Вісник Інженерної академії України*. – 2013. – № 1. – С. 197–200.
5. Голік Ю. С., Ілляш О. Е. Система управління екологічним розвитком регіонів України (на прикладі Полтавської області) // *Екологічна безпека*. – 2014. – 04(12). – С. 20–24. (Полтавська політехніка)
6. Голік Ю. С., Ілляш О. Е. Методологічні основи моніторингу ефективності реалізації регіональної програми «Довкілля-2015» в Полтавській області // *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. – 2014. – № 3–4. – С. 22–26. (Полтавська політехніка)
7. Fischer H. B., List E. J., Koh R. C. Y., Imberger J., Brooks N. H. *Mixing in Inland and Coastal Waters*. – New York : Academic Press, 1979. – 483 p. – DOI: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-22051-4>.
8. Jirka G. H., Weitbrecht V. *Mixing Models for Water Quality Management in Rivers: Continuous and Instantaneous Pollutant Releases* // *Water Quality Hazards and Dispersion of Pollutants* / ed. W. Czer-nuszenko, P. M. Rowiński. – Boston, MA : Springer, 2005. – P. 1–34. – DOI: https://doi.org/10.1007/0-387-23322-9_1.
9. Skorbiłowicz M., Skorbiłowicz E., Podedworna J., et al. Determination of mixing zones for rivers and reservoirs with conditions and restrictions for municipal wastewater discharged into surface waters // *Journal of Ecological Engineering*. – 2017. – Vol. 18, Iss. 5. – P. 137–144. – DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/76893>. (jeeng.net)
10. Baumgartner D. J., Frick W. E., Roberts P. J. W. *Dilution Models for Effluent Discharges*. – 3rd ed. – Newport, OR : U.S. Environmental Protection Agency, 1994. – 189 p. (Report EPA/600/R-94/086).
11. Альберт Гор. *Земля у рівновазі. Екологія і людський дух*. – К.: Інтелсфера, 2001. – 393 с.
12. Копальчук П. І. *Моделювання і прогнозування стану навколишнього середовища: навч. посіб.* / П. І. Копальчук. – К.: Либідь, 2003. – 207 с.
13. Зацерковний М. М. *Процеси захисту навколишнього середовища: підручник*. / М. М. Зацерковний, Т. Б. Столевич, О. М. Зацерковний. – О.: Фенікс, 2017. – 453 с.
14. *Загальна екологія: навч. посіб.* / Г. М. Франчук, С. М. Маджд, М. М. Радомська, Є. О. Бовсуновський. – К.: НАУ, 2015. – 232 с.
15. Ульям Р. *Конец техноутопия* / Р. Ульям, М. Коттон. – К.: Эко-Право, 2006. – 255 с.
16. *Methodology for determining the physical parameters of wastewater* / V. M. Isaenko, S. M. Madzd, V. F. Frolov, O. A. Mashkov // *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. – 2020. – № 3, вип. 30. – С. 41–49. – DOI: 10.15407/fm-mit2020.30.041.
17. *Comprehensive Assessment of the Degree of Wastewater Pollution of Civil Aviation Enterprises* / Volodymir Isaenko, Svitlana Madhzd, Valeriy Frolov, Oksana Lapan // *International Symposium on Electric Aviation and Autonomous Systems 2020 (ISEAS | ISATECH | ICUAV)*; *International Course on Unmanned Aerial Vehicle 2020*, 22–24 September 2020, Kyiv, Ukraine / Online. – Paper IC-UAV-2020-086.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЙ УЛОВЛЮВАННЯ ТА УТИЛІЗАЦІЇ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН

Грицуляк Г. М., Качала С. В.,
Волошин Ю. Д., Лопушняк В. І.,
Фомічова О. В.

Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу

Стаття присвячена вирішенню актуальної екологічної проблеми нафтогазового комплексу – зменшенню техногенного навантаження на атмосферне повітря, що виникає внаслідок експлуатації газоперекачувального обладнання та спалювання природного газу. Основна увага зосереджена на комплексному очищенні викидів від твердих частинок, діоксиду сірки (SO₂), оксидів азоту (NO_x) та оксиду вуглецю (CO).

У роботі представлено результати експериментальної перевірки ефективності комбінованої системи газоочистки, яка поєднує механічні та фізико-хімічні методи: циклонний пиловловлювач, рукавний фільтр та абсорбційну колону з водно-лужним розчином. Дослідження підтвердили, що запропонована технологічна схема дозволяє досягти синергетичного ефекту та забезпечити високий ступінь очищення: ефективність уловлювання пилу склала 95,2%, діоксиду сірки –

83,3%, оксиду вуглецю – 77,8%. Концентрації зазначених речовин після очищення не перевищують гранично допустимих норм (ГДК).

Водночас встановлено, що для діоксиду азоту (NO₂), попри зниження концентрації на 79,2%, спостерігається залишкове незначне перевищення нормативних значень, що зумовлено низькою розчинністю оксидів азоту. Автори доходять висновку про доцільність впровадження розробленої системи на компресорних станціях та газопереробних підприємствах, а також окреслюють перспективи подальших досліджень, які полягають в інтеграції методів селективного каталітичного або некаталітичного відновлення (SCR/SNCR) для підвищення глибини очищення від NO_x.

Ключові слова: система очищення, екологічна безпека, технології захисту навколишнього середовища, забруднюючі речовини.

EFFICIENCY OF POLLUTANTS CAPTURE AND DISPOSAL TECHNOLOGIES

**Hrytsulyak G. M., Kachala S. V.,
Voloshyn Y. D., Lopushniak V. I.,
Fomichova O. V.**

Ivano-Frankivsk National
Technical University of Oil and Gas

The article is devoted to the solution of the urgent environmental problem of the oil and gas complex – the reduction of man-made load on the atmospheric air, which arises as a result of the operation of gas pumping equipment and the burning of natural gas. The main focus is on the comprehensive purification of emissions from solid particles, sulfur dioxide (SO₂), nitrogen oxides (NO_x) and carbon monoxide (CO).

The paper presents the results of the experimental verification of the efficiency of the combined gas treatment system, which combines mechanical and physico-chemical methods: a cyclone dust collector, a bag filter and an absorption column with a water-alkaline solution. Studies have confirmed that the proposed technological scheme allows achieving a synergistic effect and ensuring a high degree of purification: the efficiency of dust capture was 95.2%, sulfur dioxide – 83.3%, and carbon monoxide – 77.8%. The concentrations of the specified substances after cleaning do not exceed the maximum permissible standards (MPC).

At the same time, it was established that for nitrogen dioxide (NO₂), despite a decrease in concentration by 79.2%, a residual slight excess of the normative values is observed, which is due to the low solubility of nitrogen oxides. The authors conclude on the feasibility of implementing the developed system at compressor stations and gas processing enterprises, as well as outline the prospects for further research, which consists in the integration of selective catalytic or non-catalytic reduction (SCR/SNCR) methods to increase the depth of NO_x purification.

Keywords: cleaning system, environmental safety, environmental protection technologies, pollutants

Постановка проблеми

Питання зменшення техногенного навантаження на атмосферне повітря є критично важливим для підприємств нафтогазового комплексу. Наукові дослідження свідчать, що експлуатація газоперекачувального обладнання та процеси спалювання природного газу супроводжуються утворенням значних обсягів викидів, серед яких домінують тверді частинки, діоксид сірки (SO₂), оксиди азоту (NO_x) та оксид вуглецю (CO).

Незважаючи на значний теоретичний доробок, на практиці часто відсутні універсальні рішення, які б гарантували одночасне зниження концентрацій SO₂, NO_x, CO та пилу до нормативних значень в умовах одного технологічного ланцюга. Комплексний підхід, який би моделював повний цикл очищення викидів компресорної станції – від грубого пилу до газових домішок – у науковій літературі висвітлений недостатньо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання зменшення техногенного навантаження на атмосферне повітря є критично важливим для підприємств нафтогазового комплексу. Наукові дослідження останніх років свідчать, що експлуатація газоперекачувального обладнання та процеси спалювання природного газу супро-

воджуються утворенням значних обсягів викидів, серед яких домінують тверді частинки, діоксид сірки (SO_2), оксиди азоту (NO_x) та оксид вуглецю (CO). Аналіз фахової літератури дозволяє виділити основні напрямки вдосконалення систем газоочистки, які є релевантними для даного дослідження [1, 6]. У сучасних наукових працях широко обговорюється ефективність інерційних методів пиловловлення. Традиційно на компресорних станціях застосовують циклонні апарати, які характеризуються простотою конструкції та надійністю в експлуатації. Однак, дослідники зазначають, що ефективність циклонів різко знижується при вловлюванні дрібнодисперсних фракцій (менше 5–10 мкм). Для досягнення санітарних норм науковці пропонують використовувати двоступеневі схеми, де другим ступенем виступають рукавні фільтри. Вони забезпечують високий ступінь очищення, що корелює з даними про необхідність зниження концентрацій пилу до значень, нижчих за ГДК [3, 5].

Зниження викидів токсичних газів (SO_2 , NO_x , CO) є складнішим завданням, ніж знепилення. В літературі розглядаються каталітичні, термічні та абсорбційні методи.

Більшість авторів сходиться на думці, що хемосорбція з використанням лужних розчинів є найбільш доцільним методом для видалення оксидів сірки. Це підтверджує вибір водно-лужних розчинів в абсорбційних колонах як ефективного засобу боротьби з кислими газами [2, 6].

Проблема очищення від NO_x залишається однією з найактуальніших. Дослідження показують, що абсорбційні методи мають обмежену ефективність щодо оксидів азоту через їх низьку розчинність. Це пояснює, чому в багатьох експериментальних роботах, навіть після очищення, спостерігається залишкове перевищення ГДК по цьому показнику, що вимагає розгляду додаткових технологій, таких як селективне каталітичне відновлення (SCR) [3, 7].

Окремим і найбільш перспективним напрямком є створення інтегрованих (гібридних) установок. Існуючі публікації вказують на те, що поєднанне механічного очищення та фізико-хімічної абсорбції дозволяє досягти синергетичного ефекту. Проте, більшість досліджень фокусується або лише на пиловловлюванні, або лише на нейтралізації газів. Комплексний підхід,

який би моделював повний цикл очищення викидів компресорної станції – від грубого пилу до газових домішок – висвітлений недостатньо [4, 6].

Виділення невирішеної частини загальної проблеми. Незважаючи на значний теоретичний доробок, на практиці часто відсутні універсальні рішення, які б гарантували одночасне зниження концентрацій SO_2 , NO_x , CO та пилу до нормативних значень в умовах одного технологічного ланцюга. Це обумовлює необхідність експериментальної перевірки ефективності саме комбінованої системи (циклонний пиловловлювач, рукавний фільтр, абсорбційна колона), що і є завданням даної роботи.

Визначення цілей статті (постановка завдання)

Метою статті є експериментальна перевірка ефективності комбінованої системи газоочистки, яка включає циклонний пиловловлювач, рукавний фільтр та абсорбційну колону. Постановка такого завдання обумовлена тим, що на практиці часто відсутні універсальні рішення, які б гарантували одночасне зниження концентрацій діоксиду сірки (SO_2), оксидів азоту (NO_x), оксиду вуглецю (CO) та пилу до нормативних значень в умовах одного технологічного ланцюга. Також автори зазначають, що комплексний підхід, який би моделював повний цикл очищення викидів компресорної станції – від грубого пилу до газових домішок – у науковій літературі висвітлений недостатньо.

Виклад основного матеріалу дослідження

Об'єктом дослідження є газоповітряні викиди компресорної станції нафтогазового підприємства, що містять тверді частинки, діоксид сірки (SO_2), оксиди азоту (NO_x) та оксид вуглецю (CO), які утворюються в процесі спалювання природного газу та експлуатації газоперекачувального обладнання.

Експериментальна установка моделює систему очищення викидів компресорної станції та включає: циклонний пиловловлювач; рукавний фільтр; абсорбційну колону з водно-лужним розчином; газоаналізатор для контролю концентрацій SO_2 , NO_x та CO ; систему відбору проб газопо-

Таблиця 1

Забруднюючі речовини до та після очищення викидів компресорної станції

Речовина	До очищення, мг/м ³	Після очищення, мг/м ³	Ефективність, %	ГДК, мг/м ³
Пил	2,5	0,12	95,2	0,15
SO ₂	1,8	0,30	83,3	0,50
NO ₂	1,2	0,25	79,2	0,20
CO	18,0	4,0	77,8	5,00

вітряної суміші. Газоповітряна суміш відбиралася з умовної димової труби компресорного агрегату до та після проходження системи очищення.

Здійснювався відбір проб газоповітряної суміші на виході з газотурбінної установки до очищення. Потік пропускався через систему уловлювання (циклон → фільтр → абсорбер).

- Проводився повторний відбір проб після очищення.
- Визначалися концентрації SO₂, NO_x, CO та твердих частинок.

Результати експериментальних досліджень показали, що застосування комбінованої системи очищення дозволяє істотно знизити концентрації основних забруднюючих речовин, характерних для об'єктів нафтогазової галузі. Після очищення концентрації пилу, SO₂ та CO не перевищують нормативних значень ГДК.

Для оксидів азоту після очищення спостерігається незначне перевищення ГДК, що вказує на необхідність застосування додаткових методів нейтралізації, зокрема селективного каталітичного або некаталітичного відновлення (SCR або SNCR).

Отримані результати підтверджують доцільність упровадження багатоступеневих систем газоочистки на компресорних станціях та газопереробних підприємствах.

Згідно з даними, наведеними на рисунку 1, до впровадження системи очищення викидів спостерігалось значне перевищення гранично допустимих концентрацій для всіх досліджуваних забруднюючих речовин, зокрема для твердих частинок (у 16,7 раза) та оксидів азоту (у 6 разів). Після застосування комбінованої системи уловлювання концентрації пилу, SO₂ та CO були знижені до нормативних значень або наближені до них.

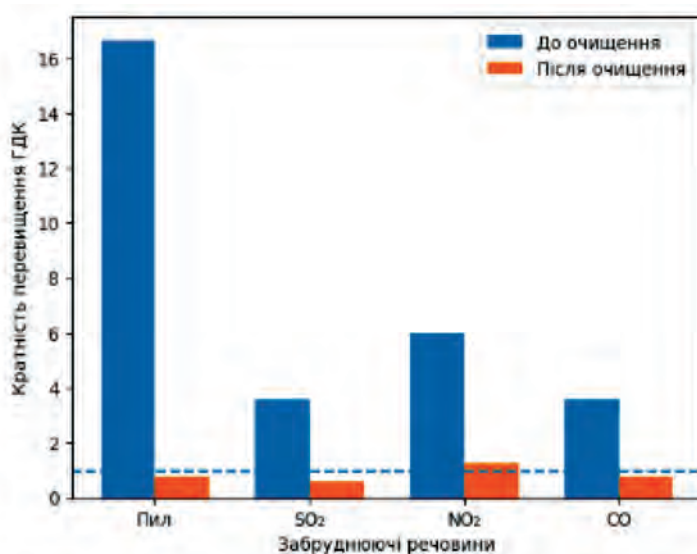


Рисунок 1. (по осі Y – кратність перевищення ГДК; пунктирна лінія відповідає рівню ГДК = 1)

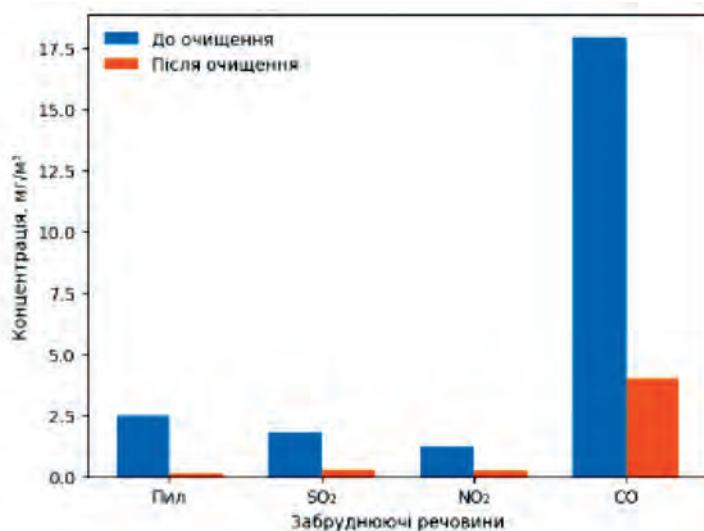


Рисунок 2. (по осі Y – концентрація, мг/м³; по осі X – види забруднюючих речовин)
Концентрації забруднюючих речовин у викидах компресорної станції до та після очищення

Для NO₂ зафіксовано незначне перевищення ГДК, що свідчить про необхідність додаткових заходів очищення.

Рисунок 1 – Перевищення гранично допустимих концентрацій забруднюючих речовин до та після очищення викидів компресорної станції

Як видно з рисунка 2, після впровадження системи очищення викидів спостерігається істотне зниження концентрацій усіх досліджуваних забруднюючих речовин. Найбільше зменшення зафіксовано для твердих частинок (з 2,5 до 0,12 мг/м³) та оксиду вуглецю (з 18,0 до 4,0 мг/м³). Отримані результати свідчать про високу ефективність застосованої комбінованої системи газоочистки на об'єктах нафтогазової галузі.

Запропонована система уловлювання та очищення викидів може бути рекомендована для використання на компресорних станціях магістральних газопроводів та газопереробних підприємствах з метою зниження техногенного навантаження на атмосферне повітря та дотримання екологічних нормативів.

Висновки та перспективи подальших досліджень

На основі проведених експериментальних досліджень встановлено, що застосування комбінованої системи газоочистки, яка включає циклонний пиловловлювач, рукавний фільтр та абсорб-

ційну колону, дозволяє реалізувати комплексний підхід до видалення забруднюючих речовин в одному технологічному ланцюзі.

Впровадження запропонованої схеми забезпечило істотне зниження концентрацій основних полутантів: ефективність вловлювання твердих частинок склала 95,2 %, діоксиду сірки – 83,3 %, а оксиду вуглецю – 77,8 %, що дозволило досягти нормативних значень гранично допустимих концентрацій (ГДК) для цих показників.

Разом з тим, для діоксиду азоту, незважаючи на загальну ефективність очищення 79,2 %, зафіксовано залишкове перевищення ГДК на рівні 0,25 мг/м³, що пояснюється низькою розчинністю оксидів азоту та обмеженими можливостями абсорбційних методів щодо їх повної нейтралізації.

Отримані результати підтверджують доцільність використання розробленої системи на компресорних станціях магістральних газопроводів та газопереробних підприємствах для зменшення техногенного навантаження на атмосферне повітря.

Перспективи подальших досліджень полягають в удосконаленні технологічної схеми шляхом інтеграції методів селективного каталітичного або некаталітичного відновлення (SCR/SNCR) для підвищення глибини очищення від оксидів азоту, оптимізації складу абсорбентів, а також у проведенні промислових випробувань установки в реальних умовах експлуатації.

Список використаної літератури

1. Дослідження технології біохімічної очистки стічних вод ПАТ ЄВРАЗ «Дніпродзержинський КХЗ» / А.В. Іванченко, О.О. Дупенко, М.А. Криворот, М.Д. Волошин // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – 2014. – Вип. 1(24). – С. 264 – 269
2. Chipasa, K.B. Limits of physicochemical treatment of wastewater in the vegetable oil refining industry / K.B. Chipasa // Polish Journal of Environmental Studies. – 2001. – Vol. 10, No. 3. – PP. 141 – 147.
3. Екологічна енциклопедія. – К. : Центр екологічної освіти та інформації, 2006. – Т. 1. – 430 с.
4. Статистичний збірник. «Довкілля України». – К., 2006. – С. 48-138.
5. Статистичні дані обласного управління. – Івано-Франківськ. – 2009. – С. 145.
6. Савчук Л.Я. Еколого-географічний аналіз захворюваності населення Івано-Франківської області / І-й міжнародний конгрес. Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. 28-29 травня 2009 р. Львів : НУ «Львівська політехніка», 2009. – С. 74.
7. Пендерецький О.В. Оцінка екологічної ситуації в зоні впливу Бурштинської ТЕС : дис. ... канд. техн. наук: спец. 21.06.01. Івано-Франківськ, 2005. Т. 1. С. 202.

МЕТОД БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНИХ АЛЬТЕРНАТИВ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД У ПРОЦЕДУРІ ОЦІНКИ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ

Покшевніцька Т. В.

Національний транспортний університет
вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1, Київ, 01010
officenttn@ukr.net

Анотація

У статті розроблено та обґрунтовано метод багатокритеріальної оцінки технічних альтернатив гідротехнічних споруд для застосування у процедурі оцінки впливу на довкілля (ОВД). Актуальність дослідження зумовлена необхідністю формалізації процесу вибору оптимальних технічних рішень гідротехнічних проєктів в умовах наявності різнорідних, часто конфліктуючих екологічних, технічних, економічних та соціальних критеріїв, а також з урахуванням специфічних викликів функціонування критичної інфраструктури в умовах воєнного стану.

Запропонований метод базується на поєднанні методу аналізу ієрархій для визначення вагових коефіцієнтів критеріїв та адитивної моделі агрегування часткових оцінок технічних альтернатив. Розроблено ієрархічну систему критеріїв оцінювання, що включає п'ять груп критеріїв верхнього рівня (екологічні, технічні, економічні, соціальні критерії та критерії воєнної стійкості) та п'ятнадцять критеріїв нижнього рівня, які деталізують основні аспекти впливу гідротехнічних споруд у межах процедури ОВД.

Для параметризації методу проведено експертне опитування 25 фахівців, що мають досвід у розробці звітів з ОВД, проєктуванні гідротехнічних споруд, наукових дослідженнях та діяльності уповноважених органів. За результатами опитування обґрунтовано доцільність застосу-

вання п'ятибальної шкали оцінювання як оптимальної з точки зору зручності використання, достатності деталізації та зниження суб'єктивності експертних суджень. Методом аналізу ієрархій визначено вагові коефіцієнти груп критеріїв, що відображають їх відносну важливість у процедурі ОВД.

Проведений аналіз чутливості результатів підтвердив стійкість запропонованого методу до варіації вагових коефіцієнтів у широкому діапазоні значень та надійність отриманого ранжування технічних альтернатив. Запропонований метод забезпечує формалізований, прозорий та відтворюваний підхід до обґрунтування вибору оптимальних технічних рішень гідротехнічних проєктів з урахуванням екологічних, технічних, економічних, соціальних факторів та факторів воєнної стійкості. Результати дослідження можуть бути використані при підготовці звітів з оцінки впливу на довкілля, проєктуванні гідротехнічних споруд та прийнятті управлінських рішень у сфері водного господарства.

Ключові слова: багатокритеріальна оцінка, технічні альтернативи, гідротехнічні споруди, оцінка впливу на довкілля, метод аналізу ієрархій, система критеріїв, вагові коефіцієнти.

A multicriteria method for evaluating technical alternatives of hydraulic engineering structures in the environmental impact assessment procedure. Pokshevnytska T. The article develops and

substantiates a method for the multicriteria evaluation of technical alternatives of hydraulic engineering structures for application within the environmental impact assessment (EIA) procedure.

The relevance of the study is determined by the need to formalize the process of selecting optimal technical solutions for hydraulic engineering projects under conditions of heterogeneous and often conflicting environmental, technical, economic, and social criteria, as well as by the necessity to account for the specific challenges associated with the functioning of critical infrastructure under martial law. The proposed method is based on a combination of the Analytic Hierarchy Process (AHP) for determining the weighting coefficients of criteria and an additive aggregation model for integrating partial evaluations of technical alternatives. A hierarchical evaluation criteria system has been developed, comprising five upper-level groups of criteria (environmental, technical, economic, social, and military resilience criteria) and fifteen lower-level criteria that detail the key aspects of the impacts of hydraulic engineering structures within the EIA procedure.

To parameterize the method, an expert survey involving 25 specialists with experience in EIA report preparation, hydraulic engineering design, scientific research, and the activities of authorized bodies was conducted. Based on the survey results, the application of a five-point evaluation scale was substantiated as optimal in terms of ease of use, sufficient level of detail, and reduction of subjectivity in expert judgments. The Analytic Hierarchy Process was applied to determine the weighting coefficients of the criteria groups, reflecting their relative importance within the EIA procedure. Sensitivity analysis confirmed the robustness of the proposed method to variations in weighting coefficients across a wide range of values and the reliability of the resulting ranking of technical alternatives.

The developed method provides a formalized, transparent, and reproducible approach to substantiating the selection of optimal technical solutions for hydraulic engineering projects, taking into account environmental, technical, economic, social, and military resilience factors. The research results may be applied in the preparation of environmental impact assessment reports, the design of hydraulic engineering structures, and managerial decision-making in the field of water management.

Keywords: multicriteria evaluation, technical alternatives, hydraulic engineering structures, environmental impact assessment, Analytic Hierarchy Process, criteria system, weighting coefficients.

Постановка проблеми

Процедура оцінки впливу на довкілля (ОВД) є превентивним інструментом екологічно орієнтованого планування та прийняття рішень у сфері водного господарства [1]. Одним із центральних етапів ОВД є порівняння та вибір технічних альтернатив реалізації планованої діяльності, що дозволяє обґрунтувати оптимальне рішення з урахуванням екологічних, технічних, економічних та соціальних факторів [2].

Гідротехнічні споруди характеризуються значним різноманіттям типів, конструктивних рішень та режимів експлуатації, що зумовлює необхідність порівняльного аналізу декількох технічних альтернатив на етапі підготовки проєктної документації та звітів з ОВД. Вибір технічної альтернативи має враховувати не лише традиційні техніко-економічні показники, але й складний комплекс екологічних наслідків, соціальних ефектів та, в умовах воєнного стану, факторів воєнної стійкості критичної інфраструктури [3].

Методичні рекомендації з підготовки звіту з ОВД визначають технічні альтернативи як технічно і технологічно допустимі та економічно доцільні варіанти реалізації планованої діяльності, що можуть відрізнятися за типом інженерних і конструктивних рішень, застосованими технологіями, проєктною потужністю, умовами та режимами експлуатації [4, 5]. Проте існуючі методичні підходи до порівняння технічних альтернатив часто мають описовий характер і не забезпечують формалізованого багатокритеріального оцінювання.

Аналіз сучасних багатокритеріальних підходів у технічних задачах засвідчує, що традиційні однокритеріальні методи прийняття рішень виявляються непридатними при наявності конфліктуючих показників. Це обумовлює потребу у застосуванні методів багатокритеріального аналізу (MCDM), які дозволяють структурувати проблему вибору, формалізувати критерії оцінювання та отримати обґрунтований результат при врахуванні різномірних факторів [6, 7, 8].

Метою дослідження є розроблення методу багатокритеріальної оцінки технічних альтернатив гідротехнічних споруд для застосування у процедурі ОВД, що забезпечує формалізований та відтворюваний підхід до обґрунтування вибору оптимальних технічних рішень.

Актуальність дослідження

Актуальність дослідження зумовлена зростанням складності прийняття рішень у сфері проектування та реалізації гідротехнічних споруд, що супроводжується необхідністю одночасного врахування екологічних, технічних, економічних і соціальних чинників у процедурі оцінки впливу на довкілля (ОВД). У сучасних умовах такі рішення характеризуються багатофакторністю та наявністю конфліктуючих критеріїв, що істотно ускладнює вибір оптимальних технічних альтернатив на основі традиційних однокритеріальних підходів. Додатковим чинником актуальності є необхідність адаптації методів оцінювання до сучасних викликів функціонування критичної інфраструктури, зокрема в умовах воєнного стану, що потребує інтеграції до системи критеріїв показників надійності, безпеки та стійкості гідротехнічних споруд. У цьому контексті застосування методів багатокритеріального аналізу (MCDM) набуває особливого значення, оскільки вони дозволяють структурувати проблему вибору, формалізувати систему критеріїв та забезпечити комплексну оцінку технічних альтернатив з урахуванням різномірних факторів впливу. Таким чином, розроблення та наукове обґрунтування методу багатокритеріальної оцінки технічних альтернатив гідротехнічних споруд у процедурі ОВД є актуальним науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення обґрунтованості, прозорості та ефективності прийняття рішень у сфері водного господарства та екологічної безпеки.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями

Авторський доробок безпосередньо пов'язаний із вирішенням актуальних наукових і практичних завдань у сфері екологічної оцінки, проектування гідротехнічних споруд та прийняття управлінських рішень у водогосподарській галузі. Розроблений метод багатокритеріальної оцін-

ки технічних альтернатив спрямований на подолання існуючих обмежень традиційних підходів до вибору проєктних рішень у процедурі оцінки впливу на довкілля (ОВД), які не забезпечують достатнього рівня формалізації та обґрунтованості результатів.

Наукова значущість дослідження полягає у розвитку методології багатокритеріального аналізу шляхом адаптації методів прийняття рішень до специфіки гідротехнічних проєктів та процедур ОВД. Запропонована ієрархічна система критеріїв, що інтегрує екологічні, технічні, економічні, соціальні та безпекові аспекти, розширює теоретичні засади комплексної оцінки технічних альтернатив і сприяє підвищенню точності та відтворюваності результатів багатокритеріального оцінювання.

Практичне значення авторського доробку полягає у можливості застосування розробленого методу при підготовці звітів з ОВД, проектуванні гідротехнічних споруд та обґрунтуванні вибору оптимальних технічних рішень у процесі планування та реалізації водогосподарських проєктів. Використання запропонованого підходу дозволяє підвищити прозорість процедури порівняння технічних альтернатив, знизити суб'єктивність експертних оцінок та забезпечити комплексне врахування різномірних факторів впливу на довкілля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасній науковій літературі активно розвивається напрям застосування методів багатокритеріальної оцінки (MCDM/MCDA) для розв'язання складних технічних та екологічних задач. Дослідження підтверджують, що традиційні однокритеріальні підходи не забезпечують адекватного врахування множини взаємопов'язаних і часто конфліктуючих факторів, що зумовлює необхідність використання багатокритеріальних моделей прийняття рішень [9-11].

Суттєва частина робіт присвячена розвитку та порівняльному аналізу класичних і гібридних методів MCDM, зокрема АНР, TOPSIS, VIKOR, PROMETHEE та ELECTRE, які застосовуються для вибору оптимальних технічних альтернатив у різних галузях інженерії та управління проєктами [12-14]. Автори зазначають, що поєднання декількох методів дозволяє підвищити надій-

ність результатів оцінювання та зменшити вплив суб'єктивності експертних суджень.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із використанням багатокритеріальних підходів у задачах екологічної оцінки та аналізу сталості технічних рішень. У сучасних роботах MCDM інтегрується з методами оцінки життєвого циклу (LCA), що забезпечує комплексне врахування екологічних, економічних і соціальних аспектів при порівнянні альтернатив [15-17]. Такий підхід є особливо актуальним для інфраструктурних проєктів, у яких необхідно одночасно оцінювати технічні параметри та екологічні наслідки.

У контексті процедур оцінки впливу на довкілля (ОВД/EIA) дослідники наголошують на доцільності застосування багатокритеріальних методів для формалізації процесу вибору альтернатив та підвищення прозорості прийняття рішень [18-20]. Зокрема, MCDM використовується для ранжування проєктних рішень з урахуванням екологічних ризиків, економічної ефективності та соціальної прийнятності, що відповідає сучасним вимогам до комплексної оцінки впливів.

Таким чином, аналіз сучасних публікацій свідчить про зростання ролі багатокритеріальних методів у вирішенні технічних і екологічних задач та підтверджує доцільність їх застосування для оцінки технічних альтернатив у процедурі ОВД.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття

Незважаючи на наявність нормативно-методичної бази ОВД, існуючі підходи до порівняння технічних альтернатив переважно мають описовий характер і не забезпечують формалізованого, кількісно обґрунтованого та відтворюваного механізму прийняття рішень. Це призводить до підвищення рівня суб'єктивності експертних оцінок, ускладнення обґрунтування вибору оптимальних проєктних рішень та зниження прозорості результатів процедури ОВД.

Матеріали та методи дослідження

Методологічною основою дослідження є метод аналізу ієрархій (MAI) Т. Саті для визначення вагових коефіцієнтів критеріїв та адитивна мо-

дель для агрегування часткових оцінок альтернатив. Метод аналізу ієрархій обрано з огляду на його методологічну обґрунтованість, наявність механізму перевірки узгодженості експертних суджень та широке визнання у міжнародній практиці багатокритеріального оцінювання, зокрема у процедурах екологічної оцінки.

Для обґрунтування системи критеріїв та параметрів методу проведено експертне опитування 25 фахівців, що мають досвід у розробці звітів з ОВД, проєктуванні гідротехнічних споруд та прийнятті рішень щодо екологічної прийнятності проєктів. До складу експертної групи увійшли розробники звітів з ОВД (10 осіб, 40%), проєктувальники гідротехнічних споруд (7 осіб, 28%), представники уповноважених органів (5 осіб, 20%) та науковці (3 особи, 12%). Така структура експертної групи забезпечила репрезентативність різних професійних перспектив.

Експертне опитування проводилося у два етапи. На першому етапі експерти оцінювали зручність використання та достатність деталізації чотирьох типів шкал оцінювання (3-бальної, 5-бальної, 7-бальної, 10-бальної) та вказували свій пріоритетний вибір. На другому етапі експерти здійснювали попарні порівняння п'яти груп критеріїв за дев'ятибальною шкалою відносної важливості Саті для визначення вагових коефіцієнтів.

Перевірка узгодженості індивідуальних матриць попарних порівнянь здійснювалася через розрахунок відношення узгодженості. Груповий вектор пріоритетів визначався методом середнього геометричного індивідуальних вагових коефіцієнтів. Для оцінки стійкості результатів проведено аналіз чутливості методом систематичної варіації ваг у межах $\pm 30\%$ від базових значень.

Результати дослідження та їх обговорення

Розроблена система критеріїв має ієрархічну структуру і включає критерії верхнього та нижнього рівнів. Критерії верхнього рівня формують концептуальну основу багатокритеріальної оцінки та відображають ключові виміри впливу гідротехнічних споруд у межах процедури ОВД. Система включає п'ять груп критеріїв верхнього рівня, де екологічні критерії призначені для оцінювання впливу на стан водних об'єктів, технічні критерії характеризують надійність та адаптив-

ність технічних рішень, економічні критерії відображають фінансову доцільність альтернатив, соціальні критерії враховують вплив на населення та рівень суспільної прийнятності, а критерії воєнної стійкості оцінюють здатність споруд функціонувати в умовах підвищених техногенних і воєнних ризиків.

Критерії нижнього рівня деталізують критерії верхнього рівня та відображають окремі аспекти впливу технічних альтернатив. Загалом система включає 15 критеріїв нижнього рівня. Екологічні критерії нижнього рівня включають вплив на якість води, рівень антропогенного забруднення та довготривалість екологічних наслідків. Технічні критерії нижнього рівня охоплюють надійність, довговічність та можливість модернізації споруд. Економічні критерії нижнього рівня деталізують капітальні та експлуатаційні витрати, а також узагальнені показники економічної ефективності. Соціальні критерії нижнього рівня включають вплив на населення, рівень зайнятості та соціальну прийнятність альтернатив. Критерії воєнної стійкості нижнього рівня деталізують захищеність споруд, швидкість відновлення функціонування та автономність у разі порушення зовнішніх інфраструктурних зв'язків (рис. 1).

Результати експертного опитування виявили чітку перевагу п'ятибальної шкали оцінювання. З 25 експертів 18 осіб (72%) віддали перевагу п'ятибальній шкалі, 5 експертів (20%) – семибальній, 2 експерти (8%) – десятибальній, і жодного голосу не отримала трибальна шкала. Середня

оцінка зручності використання п'ятибальної шкали становила 4,6 бала, достатності деталізації – 4,5 бала, що є найвищими показниками серед усіх розглянутих варіантів.

Аналіз обґрунтувань експертів виявив такі аргументи на користь п'ятибальної шкали: інтуїтивна зрозумілість п'яти градацій якості; чіткість критеріїв розмежування балів, що зменшує суб'єктивність оцінок; достатня роздільна здатність для відображення реальних відмінностей між альтернативами; практична зручність для розробників звітів з ОВД в умовах обмеженого часу та ресурсів; зрозумілість для широкої аудиторії, включаючи осіб, що приймають рішення, та громадськість.

П'ятибальна шкала забезпечує оптимальний баланс між точністю оцінки та практичною зручністю застосування. Вона достатньо деталізована для виявлення суттєвих відмінностей між технічними альтернативами, але не створює ілюзії надмірної точності та не ускладнює процедуру оцінки. Психологічна природність п'яти градацій полегшує формування узгоджених експертних суджень та забезпечує зрозумілість результатів для різних груп зацікавлених сторін.

Визначення вагових коефіцієнтів здійснено методом аналізу ієрархій на основі попарних порівнянь п'яти груп критеріїв експертами. Перевірка узгодженості індивідуальних матриць попарних порівнянь виявила високу якість експертних суджень: 21 експерт (84%) мав відношення узгодженості менше 0,10, що свідчить про тран-



Рисунок 1. Система критеріїв верхнього та нижнього рівнів

зитивність та логічну несуперечливість їх оцінок.

Розрахунок групового вектора пріоритетів методом середнього геометричного індивідуальних вагових коефіцієнтів дав наступні результати: екологічні критерії – 0,30 (30%), економічні критерії – 0,25 (25%), технічні критерії – 0,20 (20%), соціальні критерії – 0,15 (15%), критерії воєнної стійкості – 0,10 (10%).

Екологічним критеріям було присвоєно найвищий ваговий коефіцієнт 0,30, що відображає центральну роль екологічних аспектів у процедурі ОВД та узгоджується з її метою – забезпечення екологічно обґрунтованих рішень та мінімізації негативних впливів на довкілля. Економічні критерії отримали ваговий коефіцієнт 0,25, що визнає необхідність врахування фінансової доцільності технічних рішень. Технічним критеріям відповідає ваговий коефіцієнт 0,20, що підкреслює важливість надійності та довговічності гідротехнічних об'єктів. Соціальні критерії мають ваговий коефіцієнт 0,15, визнаючи значення впливу на населення та соціальної прийнятності проєктів. Критеріям воєнної стійкості відповідає ваговий коефіцієнт 0,10, що враховує специфіку функціонування критичної інфраструктури в умовах воєнного стану.

Аналіз чутливості результатів проведено методом систематичної варіації ваг у межах $\pm 30\%$

від базових значень з пропорційною корекцією інших ваг. Особлива увага приділялася впливу варіації ваги екологічних критеріїв (від 0,20 до 0,40) та критеріїв воєнної стійкості (від 0,05 до 0,15) як найбільш дискусійних у контексті процедури ОВД. Результати показали високу стійкість ранжування альтернатив до змін вагових коефіцієнтів: у всіх дев'яти сценаріях варіації ваг найкраща альтернатива зберігала найвищий ранг. Варіація ваги критеріїв воєнної стійкості від 0,05 до 0,15 не призвела до зміни двох найкращих альтернатив, що свідчить про те, що інтеграція цих критеріїв підсилює обґрунтованість вибору, не змінюючи принципово результатів оцінювання.

Методологічна структура Методу багатокритеріальної оцінки технічних альтернатив включає два взаємопов'язані блоки: блок формування множини технічних альтернатив та блок їх багатокритеріальної оцінки (рис. 2).

Перший блок дозволяє сформувати початкову множину технологічно можливих технічних альтернатив та здійснити їх попередній відбір на основі застосування обмежень (природних, нормативних, екологічних, економічних, соціальних, безпекових). Другий блок включає процедури багатокритеріального оцінювання відібраних альтернатив за системою із 15 критеріїв, розрахунок

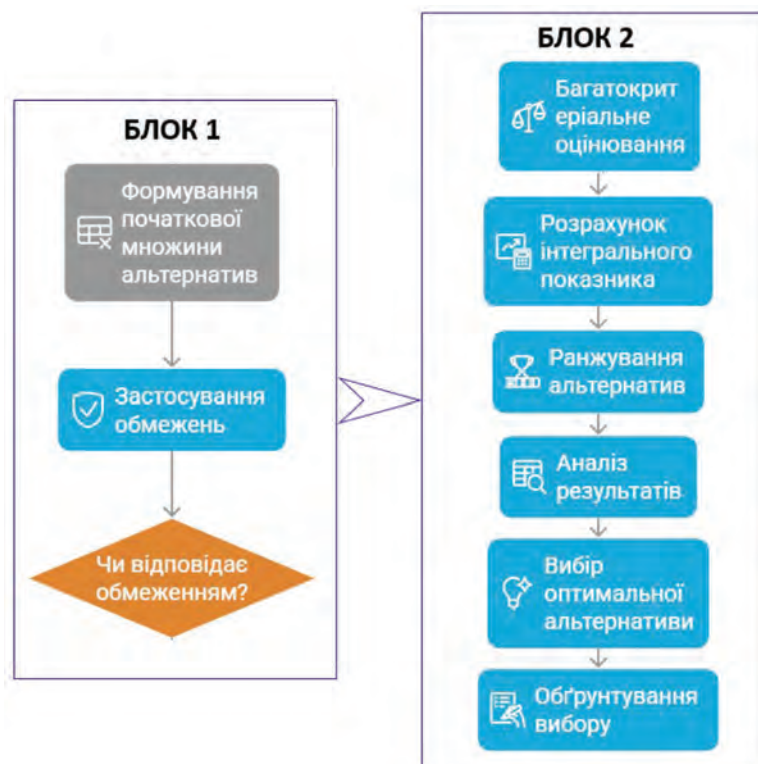


Рисунок 2. Методологічна структура методу багатокритеріальної оцінки технічних альтернатив

інтегрального показника та обґрунтування вибору оптимального технічного рішення.

На початковому етапі формулюється потреба у гідротехнічній споруді, визначаються кількісні параметри проєктної потужності та технічні обмеження. Формується початкова множина технічних альтернатив, яка включає всі технологічно можливі типи гідротехнічних споруд, здатні реалізувати визначену водогосподарську функцію. Для кожної альтернативи збирається базова інформація на основі типових проєктних рішень, технічної літератури та досвіду реалізації аналогічних об'єктів.

До сформованої множини послідовно застосовуються шість груп обмежень: природні (відповідність гідрологічним, геологічним, кліматичним умовам), нормативні (дотримання вимог чинного законодавства), екологічні (неперевищення допустимих рівнів впливу), економічні (відповідність бюджетним можливостям), соціальні (прийнятність для населення), безпекові (забезпечення надійного функціонування в умовах воєнного стану). До подальшого аналізу допускаються лише ті технічні альтернативи, які одночасно відповідають усім встановленим обмеженням.

Для кожної альтернативи зі звуженої множини проводиться експертна оцінка за п'ятнадцятьма критеріями за п'ятибальною шкалою, де 1 бал відповідає найгіршому значенню критерію, а 5 балів – найкращому значенню. До отриманих експертних оцінок застосовуються вагові коефіцієнти груп критеріїв. Розраховується інтегральний показник для кожної технічної альтернативи за формулою зваженої суми, де інтегральний показник відображає комплексну оцінку альтернативи з урахуванням усіх значущих аспектів впливу на довкілля, технічних можливостей, економічної доцільності, соціальної прийнятності та воєнної стійкості.

Технічні альтернативи ранжуються за значенням інтегрального показника від найбільшого до найменшого. Альтернатива з найвищим значенням інтегрального показника розглядається як найбільш оптимальна з точки зору комплексного врахування всіх груп критеріїв. Проводиться аналіз результатів з метою виявлення сильних та слабких сторін кожної альтернативи. На основі результатів ранжування та аналізу здійснюється вибір оптимальної технічної альтернативи, яка фіксується у звіті з оцінки впливу на довкілля з детальним обґрунтуванням.

Висновки

У результаті дослідження розроблено та науково обґрунтовано метод багатокритеріальної оцінки технічних альтернатив гідротехнічних споруд, адаптований до процедури оцінки впливу на довкілля. Запропонований підхід забезпечує формалізацію процесу вибору оптимальних технічних рішень в умовах наявності різномірних і часто конфліктуючих екологічних, технічних, економічних, соціальних та безпекових критеріїв. Сформовано ієрархічну систему критеріїв, що інтегрує екологічні, технічні, економічні, соціальні критерії та критерії воєнної стійкості, а також їх деталізацію на нижньому рівні. Поєднання методу аналізу ієрархій для визначення вагових коефіцієнтів критеріїв і адитивної моделі агрегування часткових оцінок дозволило створити науково обґрунтований, прозорий і відтворюваний механізм ранжування технічних альтернатив.

Науково обґрунтовано доцільність використання п'ятибальної шкали експертного оцінювання, яка забезпечує оптимальний баланс між точністю оцінки, зручністю практичного застосування та зниженням суб'єктивності експертних суджень. Визначені на основі експертного опитування вагові коефіцієнти критеріїв відображають їх відносну значущість у процедурі ОВД та підтверджують домінуючу роль екологічних і економічних факторів у процесі прийняття рішень.

Перспективи подальшого використання результатів дослідження пов'язані з можливістю розширення запропонованого методу на інші типи інфраструктурних проєктів, зокрема об'єкти транспортної, енергетичної та водогосподарської інфраструктури, а також із його інтеграцією в цифрові системи підтримки прийняття рішень та програмні комплекси екологічної оцінки. Доцільним є подальше удосконалення системи критеріїв шляхом включення показників життєвого циклу споруд, кліматичних ризиків та показників сталого розвитку, а також розширення експертної бази й апробація методу на широкому спектрі реальних проєктів. Результати дослідження можуть бути використані при розробленні нормативно-методичних документів у сфері ОВД, удосконаленні процедур екологічної експертизи та формуванні науково обґрунтованих підходів до управління розвитком критичної інфраструктури.

Список використаної літератури

1. Noble B., Pope J. Environmental impact assessment as a decision-making tool for sustainable development. *Environmental Impact Assessment Review*. 2021. Vol. 89. Art. 106658. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106658>.
2. Барабаш О. В., Хрутьба Ю. С., Покшевніцька Т. В. Комплексний підхід до оцінки впливу на довкілля реалізації природоохоронних проєктів. *Екологічна безпека та технології захисту довкілля*. 2024. № 6. С. 93–98. DOI: <https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406-10>.
3. Santos A. R., Silva L. M., Ribeiro J. M., Freitas M. A. Sustainability assessment model for Brazilian hydroelectric projects using multicriteria analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 51. Art. 101851. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101851>.
4. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Загальні методичні рекомендації щодо змісту та порядку складання звіту з оцінки впливу на довкілля : затв. наказом Міндовкілля України від 15.03.2021 № 193. Київ, 2021. URL: <https://mepr.gov.ua>.
5. Науково-методичні рекомендації щодо підготовки звіту з оцінки впливу на довкілля при будівництві малих гідроелектростанцій. Київ, 2019. URL: <https://www.river.org.ua>.
6. Zavadskas E. K., Turskis Z. Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: an overview. *Technological and Economic Development of Economy*. 2011. Vol. 17, № 2. P. 397–427. DOI: <https://doi.org/10.3846/20294913.2011.593291>.
7. Azhar A. N., Radzi A. M. N., Halimatul M. W. A. Multi-criteria decision making: a systematic review. *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering*. 2021. Vol. 14, № 8. DOI: <https://doi.org/10.2174/2352096514666211029112443>.
8. Bayram Zumrut I., Baran H. B., Ozbalta T. G. Multi-criteria decision-making approach for selecting a structural system of an industrial facility. *Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal*. 2022. Vol. 14, № 1. P. 2656–2665. DOI: <https://doi.org/10.2478/otmcj-2022-0010>.
9. Goh M., Tan P. S., et al. Multi-criteria decision-making approaches in engineering applications. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, № 9. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11093841>.
10. Mardani A., Saraji M. K., et al. Multiple criteria decision-making techniques and their applications – a review. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, № 7. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13073720>.
11. Zavadskas E. K., Govindan K., Antucheviciene J. Hybrid multiple criteria decision-making methods. *Technological and Economic Development of Economy*. 2021. Vol. 27, № 2. DOI: <https://doi.org/10.3846/tede.2021.14010>.
12. Pamucar D., Ecer F. Selection of sustainable suppliers using integrated fuzzy MCDM approach. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 346. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131092>.
13. Keshavarz Ghorabae M., Zavadskas E. K., et al. Multi-criteria decision-making methods for engineering problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2021. Vol. 97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.104028>.
14. Rezaei J., Hemmes A., Tavasszy L. Multi-criteria decision-making for complex systems. *Omega*. 2021. Vol. 96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102274>.
15. Šaparauskas J., Turskis Z. Evaluation of construction alternatives using MCDM. *Buildings*. 2022. Vol. 12, № 4. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12040521>.
16. Ibarah E., Cebi S. Risk assessment of engineering systems using MCDM methods. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. Vol. 223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108552>.
17. Kumar A., Singh P., Sharma R. Application of MCDM in environmental project evaluation. *Decision Analytics Journal*. 2022. Vol. 5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2022.100140>.
18. Gbogbo F., Arthur J. K., et al. Multi-criteria decision analysis in environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*. 2021. Vol. 90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106620>.
19. Onat N. C., Kucukvar M., et al. Sustainability assessment of infrastructure alternatives using MCDM and LCA. *Sustainable Cities and Society*. 2022. Vol. 80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103760>.
20. Pereira L., Costa H., Silva R. Applications of multi-criteria decision aid methods. *Electronics*. 2022. Vol. 11, № 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11111720>.

РОЗРАХУНОК ГЛИБИНИ КОРОЗІЇ СТАЛЕВОГО ТРУБОПРОВОДУ В УМОВАХ ПЕРІОДИЧНОГО ВПЛИВУ РОЗЧИНІВ ЕЛЕКТРОЛІТІВ

Степовий Є. Б.

Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
пр. Першотравневий, 24, 36011, м. Полтава
alenastepovaja@gmail.com

На основі детального аналізу процесів електрохімічної корозії сталевих нафтопроводів, що функціонують в умовах агресивного електролітичного середовища, зокрема в зонах із тріщинами в ізоляційному покритті, була побудована математична модель, яка враховує складну природу макрогольованих корозійних пар та особливості й умови експлуатації трубопровідних систем. Ця модель дозволила отримати точну аналітичну залежність, яка описує зміну глибини корозійного ураження стінки сталевого нафтопроводу в часі в умовах періодичного попадання електроліту в тріщини ізоляційного покриття. Це дає змогу відтворити реальну картину руйнування матеріалу внаслідок дії корозійного середовища з високою точністю.

Особливістю розробленої моделі є її здатність враховувати періодичний характер надходження агресивного розчину в зону пошкодження, що відображає динаміку справжніх експлуатаційних умов. Завдяки своїй математичній гнучкості модель застосовна до широкого спектра технічних ситуацій, незалежно від конкретного хімічного складу електроліту. Такий підхід істотно підвищує ефективність технічної діагностики, дозволяючи точно розраховувати залишкову товщину стінки труб, ступінь зносу та критичні зони майбутніх уражень.

Ключовою перевагою є можливість інтеграції цієї моделі в цифрові системи моніторингу стану

об'єктів трубопровідної інфраструктури. Розрахунки на її основі дозволяють не тільки передбачати моменти, коли необхідне обслуговування або ремонт, а й ефективно оптимізувати витрати на технічне обслуговування, планування профілактичних заходів, модернізацію систем катодного захисту. Також вона дає змогу проєктувати нові конструкції з урахуванням потенційних корозійних навантажень.

Розроблена залежність дозволяє ідентифікувати найбільш уразливі зони трубопроводу, здійснювати порівняльну оцінку ефективності існуючих та нових типів захисних покриттів, а також своєчасно впроваджувати інженерні рішення для запобігання аварійним ситуаціям та витокам нафти чи газу. Це особливо актуально в умовах довготривалої експлуатації трубопроводів, прокладених у складних кліматичних або геохімічних умовах, де ризик втрати герметичності зростає.

Отже, впровадження цієї математичної моделі в практику управління технічним станом нафтогазової інфраструктури не лише підвищує технічну надійність об'єктів, але й сприяє зниженню екологічних ризиків, забезпечує відповідність сучасним стандартам промислової безпеки та сталого розвитку. У поєднанні з іншими інноваційними підходами до діагностики та моніторингу, модель відкриває новий рівень у сфері експлуатації трубопровідного транспорту.

Ключові слова: екологічна безпека, нафтопровід, корозія, швидкість корозії, товщина стінки, глибина корозії.

Based on a detailed analysis of the electrochemical corrosion processes of steel oil pipelines operating in aggressive electrolytic environments, in areas with cracks in the insulating coating, a mathematical model was built that considers the complex nature of macrogalvanic corrosion pairs and the features and operating conditions of pipeline systems. This model allowed us to obtain an accurate analytical dependence that describes the change in the depth of corrosion damage to the steel oil pipeline wall over time under conditions of periodic electrolyte ingress into the cracks of the insulating coating. This makes it possible to reproduce the real picture of material destruction due to the action of a corrosive environment with high accuracy.

A feature of the developed model is its ability to consider the periodic nature of the ingress of an aggressive solution into the damage zone, which reflects the dynamics of real operating conditions. Due to its mathematical flexibility, the model is applicable to a wide range of technical situations, regardless of the specific chemical composition of the electrolyte. This approach significantly increases the efficiency of technical diagnostics, allowing us to accurately calculate the residual wall thickness of the pipes, the degree of wear and critical zones of future damage.

The key advantage is the ability to integrate this model into digital systems for monitoring the condition of pipeline infrastructure facilities. Calculations based on it allow not only to predict the moments when maintenance or repair is necessary, but also to effectively optimize maintenance costs, planning preventive measures, and upgrading cathodic protection systems. It also allows us to design new structures considering potential corrosion loads.

The developed us to identify the most vulnerable areas of the pipeline, to carry out a comparative assessment of the effectiveness of existing and new types of protective coatings, as well as to timely implement engineering solutions to prevent emergencies and oil or gas leaks. This is especially relevant in conditions of long-term operation of pipelines laid in difficult climatic or geochemical

conditions, where the risk of loss of tightness increases.

Therefore, the implementation of this mathematical model in the practice of managing the technical condition of oil and gas infrastructure not only increases the technical reliability of facilities, but also helps reduce environmental risks, ensures compliance with modern standards of industrial safety and sustainable development. In combination with other innovative approaches to diagnostics and monitoring, the model opens a new level in the field of pipeline transport operation.

Keywords: environmental safety, oil pipeline, corrosion, corrosion rate, wall thickness, corrosion depth.

Постановка проблеми

В Україні функціонує розгалужена система магістральних нафтопроводів, продуктопроводів та газопроводів, більшість з яких експлуатуються вже понад 35 років. Деякі з перших нафтопроводів працюють понад 50 років [1, 2]. Тривалий контакт металу труб із ґрунтом сприяє активізації корозійних процесів, що поступово знижує механічні характеристики матеріалу сталевих трубопроводів [2].

У багатьох випадках строк експлуатації значної частини магістральних газопроводів, продуктопроводів і нафтопроводів України наближається до проектного. На зовнішніх поверхнях труб зафіксовано численні прояви корозії, що суттєво ускладнює питання їх подальшого безпечного та надійного використання.

Нафтопроводи працюють під впливом різних факторів, до яких належать коливання температури, корозійно-агресивні середовища з широким спектром їх параметрів, динамічні навантаження тощо. Найбільш негативний вплив на термін служби трубопроводів має корозійно-агресивні середовища [3, 4, 5]. До корозійно-небезпечних ділянок належать: заплави; зрошувані землі; болота та перезволожені ґрунти; підводні переходи; промислові та побутові стоки; сміттєзвалища та шлакові відвали; польові склади мінеральних добрив [6]. Корозія може посилюватись при утворенні мікро та макро-гальванічних пар у разі зміни типів ґрунтів під впливом температурних факторів, техногенної діяльності

людини тощо. Аналіз причин аварій трубопроводів показує, що найчастішими пошкодженнями сталевих труб є виразки, спричинені корозією труб [7].

Питання оцінки фактичного технічного стану технологічного обладнання та трубопроводних мереж у нафтогазовій промисловості є особливо актуальним через необхідність продовження терміну служби об'єктів, що відпрацювали свій нормативний термін служби, а також забезпечення надійної та безпечної експлуатації таких об'єктів [8]. Як довів Севернев М. М., у випадку двосторонньої корозії середні втрати на рік для вуглецевих сталей становлять 140 г/м^2 , що відповідає значенню $0,035 \text{ мм}$, для процесів розвитку корозійних пошкоджень швидкість є незначною, тоді як фактично враховуються можливості локальної корозії, а також інші види розвитку корозійних пошкоджень. Особливо небезпечним є поєднання корозійних та механічних факторів, оскільки їх спільна дія може призвести до корозійного розтріскування, корозійної втоми та фреттингового окислення.

Актуальність дослідження

Нафтова галузь займає провідне місце у світовій економіці, постачаючи енергетичні ресурси, без яких неможлива робота більшості промислових секторів. Проте разом з економічними перевагами вона є і одним з найбільших джерел екологічних загроз. Видобуток, транспортування, переробка та зберігання нафти супроводжуються викидами шкідливих речовин, ризиком розливів, деградацією ґрунтів та водних об'єктів, а також негативним впливом на біорізноманіття. Такі фактори призводять до серйозних наслідків для природних екосистем і здоров'я населення.

Один із підходів до підвищення екологічної безпеки та забезпечення надійної роботи нафтопроводів полягає у врахуванні чинників, що впливають на розвиток корозії металу та реальних умов експлуатації конструкцій. Такий підхід дасть можливість запобігти появі тріщин на трубопроводах і витокам нафти.

Деякі з існуючих методів визначення фактичного залишкового ресурсу сталевих конструкцій, що експлуатуються в ґрунтових агресивних середовищах, ґрунтуються на розрахунках, які

не повністю враховують особливості корозійного зношення. У таких випадках корозія сталевих елементів здебільшого описується емпіричними моделями. Зважаючи на це, особливо важливим є впровадження систем моніторингу електрохімічних показників корозії для забезпечення екологічної безпеки експлуатації нафтопроводів. Оцінка залишкового ресурсу сталевих труб безпосередньо пов'язана з контролем товщини їх стінок. Подібні дослідження є актуальними в багатьох країнах світу. До того ж, питання екологічної безпеки та систематичного екологічного контролю посідають провідне місце серед пріоритетів сучасності. Отже, основним завданням залишається гарантування безпечної та стабільної експлуатації трубопроводних систем.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями

Це дослідження проведено відповідно до пріоритетних напрямів наукової діяльності та технічних розробок України у галузі раціонального використання природних ресурсів. У роботі автор зосереджує увагу на розв'язанні нагальних питань, пов'язаних із сталим природокористуванням, захистом довкілля та підвищенням рівня екологічної безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У процесі аналізу нафтотранспортної системи України дослідники [8] підкреслили, що її ефективне та безпечне функціонування можливе лише за умов належної науково-технічної підтримки. При цьому, за думкою авторів, питання забезпечення надійності повинно мати пріоритетне значення як у міжнародному, так і в національному правовому полі.

У роботах [9, 10] досліджувалися коефіцієнти надійності нафтопроводів та ресурсів підземного геологічного простору, процес корозії магістральних нафтопроводів у ґрунтових умовах, аналізувалися проблеми експлуатації підземних об'єктів, стан лінійної частини нафтотранспортної системи, зокрема, в Україні. Результати досліджень вказують на важливість напряму дослідження.

Основи надійності трубопроводних систем

закладаються ще на стадії їхнього проектування. Розрахунки міцності конструкції, що здійснюються за методами будівельної механіки із застосуванням коефіцієнтів запасу, не здатні повністю охопити складність та різноманітність умов експлуатації. Існуючі методи контролю стану трубопроводу дають уявлення про фактичний стан конструкції. Окрім того, проведення такого моніторингу є досить витратним. Періодичне діагностичне обстеження нафтопроводів дозволяє прогнозувати зростання глибини корозії [11].

Відомий метод [12] прогнозування динаміки глибини корозії трубопроводу, який здійснюється на основі двох або більше вимірювань товщини стінки за формулою, однак запропонована модель не враховує фактичні умови корозійного процесу.

Автори [13] використовують емпіричну логарифмічну залежність для визначення товщини стінки та розрахунку глибини корозії. Але такі методи оцінки глибини корозійних пошкоджень на ділянках транспортних споруд, що експлуатуються в агресивних середовищах, базуються на розрахунках, які не враховують особливості корозійних процесів. Корозійні процеси в сталевих профілях переважно представлені емпіричними залежностями, які не враховують наявності пошкоджень в ізоляційному покритті, склад агресивних ґрунтових розчинів, умов потрапляння агресивного електроліту до сталевих ділянок нафтопроводів.

У наукових роботах [14, 15], присвячених методам визначення швидкості корозійного зносу на основі результатів експлуатаційного контролю, наголошується, що ці розрахунки мають емпіричний характер. Зазначені методики включають низку факторів, які можуть суттєво впливати на точність обчислень і призводити до значних похибок.

Науковці встановили, що ключовим фактором у визначенні безпечності експлуатації трубопроводів за умов наявності дефектів в ізоляційному покритті є аналіз швидкості та глибини корозійного ураження з врахуванням умов експлуатації споруд.

Враховуючи, що корозія сталі з тріщинами в ізоляційному покритті протікає здебільшого за електрохімічним механізмом, останні наукові напрацювання щодо розрахунків показників, що оцінюють корозійні процеси базуються на вико-

ристанні електрохімічних та електричних характеристик, таких як щільність корозійного струму, потенціал електрода, поляризація металу у зонах тріщин, а також електричний опір ізоляційного шару. Їх основною перевагою є можливість безпосереднього отримання даних з конструкцій, що перебувають в експлуатації.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття

Забезпечення безаварійної експлуатації трубопровідних систем можливе шляхом спостереження та контролю електрохімічних характеристик, які відображають динаміку розвитку корозії сталі. Попри значну кількість проведених досліджень, зберігається потреба у створенні нових моделей, що дозволяють точніше оцінювати корозійні процеси з урахуванням локальних умов навколишнього середовища, специфіки та режимів функціонування підземних сталевих трубопроводів.

Новизна

Розроблено залежність, що дозволяє визначити глибину корозії сталевих нафтопроводів при роботі макрогальванопари за умов періодичного попадання хімічно агресивного електролітичного середовища в зону пошкодженої ізоляції, що дозволить прогнозувати розвиток корозійного процесу та на ділянці нафтопроводу та планувати необхідні заходи запобігання забрудненню компонентів довкілля.

Методологічне або загальнонаукове значення

Отримані результати наукової роботи, у поєднанні з іншими дослідженнями, дозволять виявити потенційні екологічні загрози, що можуть виникнути під час експлуатації об'єктів нафтової інфраструктури. Це, у свою чергу, сприятиме розробці ефективних профілактичних заходів проти негативних наслідків розгерметизації нафтопроводів, забезпеченню обґрунтованого планування ремонтних робіт і точнішому прогнозуванню реального ресурсу їх експлуатації.

Викладення основного матеріалу

Метою роботи є розробка залежності, яка дозволить розрахувати глибину корозійного пошкодження ділянки трубопроводу при періодичному проникненні агресивного електролітичного розчину в зону пошкодженої ізоляції.

Важливим фактором забезпечення безаварійної експлуатації підземних нафтопроводів є захист їхньої поверхні від ґрунтової корозії високоякісними ізоляційними покриттями. Однак у процесі їх експлуатації відбувається значне пошкодження ізоляційних покриттів і створюються всі умови для розвитку електрохімічної корозії ділянки нафтопроводу.

Товщина стінки труби є одним з основних параметрів, що впливає на зміни напружено-деформованого стану конструкції, а отже, і на її залишковий ресурс та залежить від робочого тиску навантажень, конструктивних характеристик та резервування міцності, включаючи врахування рівномірних втрат від корозії.

З огляду на те, що нафтопровід експлуатується в природних ґрунтових умовах, слід враховувати періодичність зволоження ґрунту, оскільки він не перебуває постійно у вологому або сухому стані. Ця змінність вологості суттєво впливає на інтенсивність і характер корозійних процесів, що відбуваються на поверхні трубопроводу. Частота проникнення в тріщину ґрунтового електроліту впливатиме на середньогодинну щільність струму гальванопари, а отже, і на швидкість корозійного процесу ділянки сталевго трубопроводу.

Середньогодинна щільність струму зростає зі збільшенням частоти проникнення електроліту до зовнішньої поверхні сталі, але доки не настане катодне обмеження процесу, оскільки насичення розчину припиняє надходження кисню.

Висунуто припущення, що корозійне руйнування сталі в зонах тріщин ізоляційного покриття є специфічною формою електрохімічної корозії, яка поєднує характеристики атмосферного впливу та класичної корозії в умовах повного занурення у рідкий електроліт. За умови періодичного зволоження цих ділянок можна оцінити подальші втрати металу на основі відповідного розрахунку.

Миттєва швидкість зменшення товщини стінки $v = \Delta\delta/\Delta\tau$ трактується як граничне значення середньої швидкості в умовах, коли часовий

інтервал $\Delta\tau$ наближається до нуля, тобто:

$$v = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta\delta}{\Delta\tau} = \frac{d\delta}{d\tau}. \quad (1)$$

Таким чином, зміну товщини стінки трубопроводу з часом τ доцільно розглядати як похідну по часу.

$$\frac{d\delta}{d\tau} = -r\delta, \quad (2)$$

де r – питомий рівень зменшення товщини стінки.

Після інтегрування отримуємо

$$\ln \delta = -r\tau + \ln a, \quad (3)$$

де константа інтегрування $A = h \cdot a$.

З останнього рівняння після піднесення до ступеня маємо

$$\delta = ae^{-r\tau} \quad (4)$$

Нехай початкова товщина стінки трубопроводу $\delta = \delta_0$ у початковий час $\tau = 0$, то з врахуванням (4), маємо: $\delta_0 = a \times e^{-r \times 0}$, звідки $a = \delta_0$

Тоді (4) запишемо у вигляді

$$\delta = \delta_0 \times e^{-r\tau} \quad (5)$$

Для визначення r , логарифмуємо рівняння (5)

$$\ln \delta = \ln \delta_0 - r\tau. \quad (6)$$

Використовуючи рівняння (6), можна обчислити значення r для двох відомих значень поперечних перерізів δ_1 та δ_2 .

Товщина δ_1 визначається в момент випробувань τ_1 при максимальному струмі гальванічної пари (при зволоженні), а товщина δ_2 визначається часом τ_2 до наступного зволоження.

$$\delta_2 = \delta_0 \times e^{-r\tau_2}. \quad (7)$$

Тоді:

$$\ln \delta_1 = \ln \delta_0 - r\tau_1, \quad (8)$$

$$\ln \delta_2 = \ln \delta_0 - r\tau_2.$$

Маємо залежність для розрахунку r

$$r = \frac{\ln \delta_1 - \ln \delta_2}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (9)$$

Отже, формулу (5) можна записати так:

$$\delta = \delta_0 \times e^{-\left(\frac{\ln \delta_1 - \ln \delta_2}{\tau_2 - \tau_1}\right)\tau}. \quad (10)$$

Товщина стінки трубопроводу в тріщині після інтервалу часу t_i становить

$$\delta_1 = \delta_0 - \frac{2KI_1}{7,87\pi\delta_0 a_y} \tau_1. \quad (11)$$

Аналогічно, можна знайти товщину стінки з часом τ_2

$$\delta_2 = \delta_0 - \frac{2KI_2}{7,87\pi\delta_0 a_y} \tau_2. \quad (12)$$

На певний момент часу, від початку експлуатації або останнього огляду, глибина корозійного ураження стінки трубопроводу дорівнює

$$\Delta\delta = \delta_0 - \delta_0 e^{-\frac{\ln\delta_1 - \ln\delta_2}{\tau_2 - \tau_1} \tau}, \quad (13)$$

У випадку нерегулярного періодичного зволоження конструкції, розрахунки корозії сталі також виконуються за середнім значенням струму гальванічної пари.

На основі побудованої математичної моделі функціонування гальванічного елемента на поверхні сталевго трубопроводу було отримано залежність, яка дає змогу визначити глибину корозійного ураження у випадках періодичного проникнення агресивного електроліту в зону дефектної ізоляції.

Ця модель дозволяє прогнозувати хід корозійного процесу у часі, не зважаючи на конкретний хімічний склад електроліту.

Висновки

В роботі отримано математичну модель, яка встановлює глибину корозійного пошкодження ділянки трубопроводу за умови періодичного впливу агресивного електролітичного розчину в зоні пошкодженої ізоляції. Залежність базується на реальних параметрах, отриманих неруйнівним методом під час дослідження конструкції та дозволяє прогнозувати реальні терміни роботи конструкції.

Перспективи використання результатів дослідження

Одержані результати можуть стати науковим підґрунтям для подальших досліджень, спрямованих на підвищення екологічної безпеки в нафтовій галузі, особливо щодо оцінювання та прогнозування ризиків, пов'язаних із транспортуванням вуглеводневої сировини. Запропонована розробка має потенціал для формування нових

теоретичних підходів, а також для удосконалення вже існуючих методик, що сприятиме більш ефективному управлінню екологічними ризиками та зниженню негативного впливу на довкілля.

Список використаної літератури

1. Поляков С., Клименко А., Ниркова Л., Малькова О. Електрохімічний моніторинг магістральних трубопроводів на корозійно-небезпечних ділянках. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2008. Спец. вип. №7. Т.2. С. 761 – 766
2. Ждек А.Я., В.Я. Грудз Визначення залишкового ресурсу тривало експлуатованих нафтопроводів із врахуванням наявних корозійних дефектів та умов експлуатації. *Науковий вісник: ІФН-ТУНГ*. 2012. №2(32). С. 58 – 66.
3. Rihan Omar Rihan Electrochemical Corrosion Behavior of X52 and X60 Steels in Carbon Dioxide Containing Saltwater Solution. 2013.Vol.16(1). 227-236 DOI: 10.1590/S1516-14392012005000170
4. Романів О. Н., Ярема С. Я., Никифорчин Г. Н., Махутов Н. А., Стадник М. М. *Втома та циклічна тріщиностійкість конструкційних матеріалів*. Київ: Наукова думка, 1990. 680 с.
5. Єдина ситсема захисту від корозії та старіння. Методи оцінки біокорозійної активності ґрунтів та виявлення наявності мікробної корозії на поверхні підземних металевих споруд: ДСТУ 3291-95. *К. : Держстандарт України*. 1995. 33 с.
6. Степова О.В. Техногенна безпека експлуатації магістральних нафтопроводів. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво*. Вип. 2(30). Полтава: ПолтНТУ. 2011. С. 266 – 269
7. Степова О.В. Забезпечення екологічної безпеки експлуатації нафтопроводів за допомогою моніторингу електрохімічних параметрів. *Збірник наукових праць (технічні науки)*. Вип. 1(53). Рівне: НУВГП. 2011. С.201 – 207
8. Беккер М.В. Забезпечення надійної роботи нафтотранспортної системи ДК «Укратранс-нефть»: *збірник доповідей науково-практичного семінара*. К.: Інститут електрозварювання ім. Е. О. Патона. 2007. С. 3–5.
9. Рогознюк Б., Гуйов Ю., Кузменко Ю. Технічна експлуатація підземного антикорозійного захисту нафтопроводів. Київ: Техдіагаз. 2000.

10. Корнієнко С.В. Ресурси підземного геологічного простору України. *Вісник Київ. ун-ту., серія: Геологія*. 2008. №43. С. 35–37.
 11. URL: <https://all4study.ru/proizvodstvo/raschet-utoneniya-stenki-za-schet-korrozii.html>
 12. Bridgeman J. and Shankar R. Erosion-corrosion data handling for reliable NDE. *Nuclear Eng. And Design*. no. 131. 1991. 285-297.
 13. H. Lee Thinned Pipe Management Program of Korean NPPs. S *Trans. of the 17th Inter. Conf. on Structure Mech. in Reactor Technology (SmiRT 17) Prague, Czech Republic. August 17-22. 2003*. 1-8.
 14. Moolayil T.M. Mitigation of degradation of high energy secondary cecl piping due to FAC and life management in Indian NPPs. *Second international Symposium on Nuclear Power Plant Life Management from 15-18th October, 2007 at Shanghai China*, 48 p.
 15. Moulayil .M. o the question of corrosion under the influence of flow. *Nuclear technology abroa*. no 12. 2008. 16-21.
-
-

УДК 504.54:631.4(477.8)

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202508-09>

РИЗИКИ ДЕГРАДАЦІЇ ҐРУНТІВ У СИСТЕМІ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ІВАНО-ФРАНКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Грицуляк Г. М., Коцюбинський А. О., Линник Д. О.,
Грицуляк В. М., Фомічова О. В., Качала С. В.
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу
gritsulyaka@ukr.net

У статті здійснено оцінювання ризиків деградації ґрунтів у системі екологічної безпеки Івано-Франківської області з урахуванням типів землекористування та рівня антропогенного навантаження. Дослідження ґрунтується на аналізі агрохімічних і еколого-токсикологічних показників ґрунтів сільськогосподарських, урбанізованих, промислових і лісових територій. Проведено відбір та лабораторний аналіз ґрунтових зразків із визначенням вмісту гумусу, реакції ґрунтового середовища та концентрацій важких металів (Pb, Cd, Zn, Cu). Розраховано коефіцієнти концентрації та сумарний показник забруднення Z_c для встановлення рівня екологічного ризику. Виявлено чітку залежність між інтенсивністю антропогенного впливу та ступенем деградації ґрунтів: найнижчий рівень

ризиків характерний для лісових територій, середній – для сільськогосподарських угідь, високий – для урбанізованих і промислових зон. У промислових районах зафіксовано підвищені концентрації важких металів і найменший вміст гумусу, що свідчить про формування процесів агрохімічної та хімічної деградації ґрунтів. Отримані результати підтверджують необхідність диференційованого підходу до управління земельними ресурсами та посилення ґрунтового моніторингу в межах регіональної системи екологічної безпеки

Ключові слова: деградація ґрунтів, екологічна безпека, важкі метали, антропогенне навантаження, типи землекористування, дегуміфікація, хімічне забруднення, технології захисту навколишнього середовища, системний аналіз.

RISKS OF SOIL DEGRADATION IN THE ENVIRONMENTAL SAFETY SYSTEM OF THE IVANO-FRANKIVSK REGION

Hrytsulyak G. M., Kotsyubynsky A. O., Lynnyk D. O.,
Hrytsuliak V. M., Fomichova O. V., Kachala S. V.
Ivano-Frankivsk National Technical
University of Oil and Gas

The article evaluates the risks of soil degradation in the environmental safety system of the Ivano-Frankivsk region, taking into account the types of land use and the level of anthropogenic load. The study is based on the analysis of agrochemical and ecological and toxicological indicators of soils in agricultural, urbanized, industrial and forest areas. The selection and laboratory analysis of soil samples was carried out with the determination of the humus content, the reaction of the soil environment and the concentrations of heavy metals (Pb, Cd, Zn, Cu). Concentration coefficients and total pollution index Z_c were calculated to establish the level of environmental risk. A clear relationship between the intensity of anthropogenic influence and the degree of soil degradation has been revealed: the lowest level of risk is typical for forest areas, medium - for agricultural lands, high - for urbanized and industrial zones. Increased concentrations of heavy metals and the lowest content of humus were recorded in industrial areas, which indicates the formation of processes of agrochemical and chemical soil degradation. The obtained results confirm the need for a differentiated approach to land management and strengthening soil monitoring within the regional environmental security system

Keywords: soil degradation, environmental safety, heavy metals, anthropogenic load, types of land use, dehumification, chemical pollution, environmental protection technologies, system analysis.

Постановка проблеми

Ґрунтовий покрив є одним із ключових компонентів екосистем, що забезпечує продовольчу безпеку, регулювання водного режиму територій, збереження біорізноманіття та виконання низки екологічних функцій. В умовах посилення антропогенного навантаження ґрунти дедалі більше зазнають деградаційних процесів, серед яких провідне місце займають дегуміфікація, підкислення, ерозія та хімічне забруднення важкими металами. Особливо вразливими є регіони з поєднанням інтенсивного землекористування, урбанізації та промислового розвитку.

Івано-Франківська область характеризується складною природно-географічною структурою (рівнинні, передгірські та гірські території) і значною диференціацією типів землекористування, що зумовлює різну чутливість ґрунтів до деградації. Сільськогосподарське освоєння земель, розвиток промислових і енергетичних об'єктів, зростання урбанізованих площ та транспортного навантаження спричиняють порушення природних процесів ґрунтоутворення і накопичення токсичних елементів у ґрунтовому середовищі.

Незважаючи на наявність окремих досліджень, присвячених ерозійним процесам та агрохімічному стану ґрунтів, питання комплексної оцінки ризиків деградації ґрунтового покриву залежно від типу землекористування в системі екологічної безпеки регіону залишається недостатньо опрацьованим. Особливо актуальною є проблема поєднання дегуміфікації та техногенного забруднення важкими металами, які здатні мігрувати

у трофічних ланцюгах і створювати загрозу для здоров'я населення та функціонування природних екосистем.

У зв'язку з цим виникає необхідність проведення порівняльного аналізу агрохімічних і еколого-токсикологічних показників ґрунтів на територіях з різним типом антропогенного навантаження та оцінювання рівня ризику їх деградації як складової регіональної системи екологічної безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика деградації ґрунтів в Івано-Франківській області в останні роки дедалі частіше розглядається як складова регіональної екологічної безпеки – через прямий зв'язок із продовольчою безпекою, паводковими ризиками, якістю водних ресурсів, здоров'ям населення та стійкістю гірсько-передгірських ландшафтів. Базовий «фон» для наукових узагальнень і управлінських рішень формують регіональні доповіді про стан довкілля, де системно описано структуру земельного фонду, стан ґрунтів та ключові деградаційні процеси. Зокрема, за результатами агрохімічної паспортизації: у 2020–2024 рр. обстежено 97,6 тис. га (15,5% с/г угідь області) та зафіксовано проблеми недостатнього охоплення моніторингом через брак фінансування й низьку «обов'язковість» для землекористувачів.

Водночас документ підкреслює, що висока сільськогосподарська освоєність і розораність у низці районів перевищує екологічно збалансовані межі (зокрема, на рівнинних і передгірських територіях), що створює передумови для прогресуючої деградації земель і загроз екологічній безпеці [1, 4].

У науковій літературі для області найбільш дослідженими є напрями, пов'язані з ерозійною деградацією, дегуміфікацією, кислотністю ґрунтів і локальним техногенним забрудненням. Узагальнювальні регіональні публікації (географічний та ґрунтознавчий підходи) акцентують, що для Івано-Франківщини характерне поєднання ґрунтів лісостепу, Передкарпаття і Карпат, а серед деградаційних процесів домінує водна ерозія, яка щороку розширює площі змитих і розмитих ґрунтів; паралельно фіксуються дегуміфікація та зростання площ кислих ґрунтів, що

погіршує родючість і екологічні функції ґрунтового покриву [3, 5].

Помітний тренд останніх років – перехід від загальних констатацій до просторово деталізованих оцінок (на рівні територіальних громад/районів) і використання даних еколого-агрохімічних обстежень.

Проведено комплексну якісну оцінку ґрунтів Долинської територіальної громади: показано домінування кислих ґрунтів і потребу у вапнуванні та органо-мінеральному удобренні; методично важливим є поєднання польових маршрутів, прив'язки GPS та аналізу агрохімічних показників як індикаторів деградації/виснаження [2, 6].

Окремий блок становлять дослідження техногенного навантаження і забруднення ґрунтів, особливо навколо промислових вузлів та енергетичних об'єктів.

Прикладом є публікації щодо вмісту валових і рухомих форм важких металів у ґрунтах м. Бурштин (вплив енергетичного комплексу/викидів), де підкреслюється необхідність оцінювання не лише загального вмісту, а й мобільних форм як екологічно небезпечніших для міграції в харчові ланцюги.

Паралельно в області розвивається прикладний напрям оцінки ризиків забруднення ґрунтів при використанні відходів (зокрема, осадів стічних вод) і при вирощуванні енергокультур, де аналізуються зміни біологічної активності/токсичності та міграція металів у системі «ґрунт-рослина» [1, 7].

Для гірсько-передгірських територій Івано-Франківщини важливим компонентом деградації ґрунтів є взаємодія з небезпечними екзогенними геологічними процесами (зсуви, селі, карст), що підсилюються зміною землекористування та екстремальними опадами.

Таким чином, останні дослідження і публікації підтверджують: ризики деградації ґрунтів в Івано-Франківській області мають комплексний характер (ерозійні + агрохімічні + техногенні + геодинамічні), а їх мінімізація в системі екологічної безпеки потребує поєднання просторово деталізованого моніторингу, ризик-орієнтованого землекористування та цільових ґрунтозахисних заходів, узгоджених із регіональною екополітикою та плануванням розвитку громад.

Визначення цілей статті (постановка завдання)

Метою даної статті є оцінювання ризиків деградації ґрунтів у системі екологічної безпеки Івано-Франківської області на основі аналізу агрохімічних та еколого-токсикологічних показників залежно від типу землекористування.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено розв'язання таких завдань: Проаналізувати сучасний стан ґрунтового покриву Івано-Франківської області в контексті екологічної безпеки регіону.

- Провести відбір і лабораторний аналіз ґрунтових зразків на територіях із різними типами землекористування (сільськогосподарські угіддя, урбанізовані, промислові та лісові території).

- Оцінити вміст гумусу, реакцію ґрунтового середовища та концентрації важких металів (Pb, Cd, Zn, Cu) як індикаторів деградаційних процесів.

- Розрахувати коефіцієнти концентрації та сумарний показник забруднення ґрунтів для визначення рівня екологічного ризику.

- Встановити залежність між інтенсивністю антропогенного навантаження та ступенем деградації ґрунтів різних типів територій.

- Обґрунтувати необхідність диференційованого підходу до управління земельними ресурсами в системі екологічної безпеки області.

Виклад основного матеріалу дослідження

Відбір ґрунтових зразків здійснювався на територіях із різним типом землекористування: сільськогосподарські угіддя (рілля с. Майдан); приміські зони (с. Угринів); ділянки поблизу промислових та енергетичних об'єктів (Івано-Франківська обл.); схилі території Передкарпаття.

Точки відбору було прив'язано до географічних координат за допомогою GPS, що дало змогу провести просторовий аналіз результатів. Відбір ґрунтових проб проводився відповідно до вимог ДСТУ та методичних рекомендацій: глибина відбору – 0–20 см (орний шар); метод відбору – конв'єртний; з кожної ділянки формувалася середня проба масою 1–1,5 кг.

Проби висушували за кімнатної температури, очищали від рослинних решток, подрібнювали та просіювали через сито з діаметром отворів 1 мм.

Рисунок 1 відображає зміну вмісту гумусу в ґрунтах залежно від типу землекористування. Найвищий вміст гумусу зафіксовано на лісових територіях (близько 4,1 %), що зумовлено природним ґрунтоутворенням, постійним надходженням органічних решток та мінімальним антропогенним впливом.

Аналіз графіка (рис. 1) показує чітку тенденцію до зниження вмісту гумусу в ґрунтах за умов зростання антропогенного навантаження. Мінімальні значення характерні для промислових територій, що формує підвищений ризик деграда-

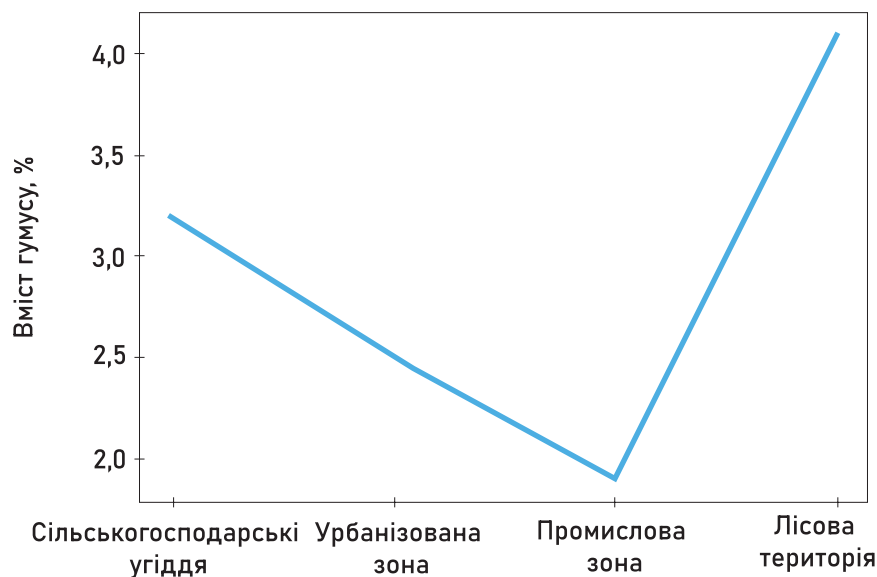


Рисунок 1. Вміст гумусу на різних ділянках землекористування

Таблиця 1

Агрохімічні та еколого-токсикологічні показники ґрунтів на різних типах територій Івано-Франківської області

Тип території	Вміст гумусу, %	pH ґрунту	Pb, мг/кг
Сільськогосподарські угіддя	3,2	6,1	18
Урбанізована зона	2,5	5,5	35
Промислова зона	1,9	5,0	62
Лісова територія	4,1	6,5	12

ції ґрунтів та зниження їх екологічних функцій. Водночас лісові ґрунти демонструють стабільні показники органічної речовини, що підтверджує їхню роль як еталонних (фонових) ділянок.

У ґрунтах сільськогосподарських угідь вміст гумусу становить приблизно 3,2 %, що свідчить про помірний рівень дегуміфікації внаслідок тривалого обробітку ґрунту, інтенсивного землеробства та недостатнього внесення органічних добрив. В урбанізованій зоні спостерігається подальше зниження вмісту гумусу до рівня близько 2,5 %, що може бути пов'язано з ущільненням ґрунтів, порушенням природного ґрунтового профілю та впливом техногенних чинників.

Найменше значення вмісту гумусу характерне для промислової зони (приблизно 1,9 %), що вказує на істотну деградацію ґрунтів під впливом промислових викидів, механічного порушення ґрунтового покриву та обмеженого надходження органічної речовини.

Загалом простежується чітка тенденція до зменшення вмісту гумусу зі зростанням рівня антропогенного навантаження: від лісових територій до промислових зон. Це свідчить про дегуміфікацію ґрунтів як один із ключових процесів їх деградації в умовах урбанізації та промислового освоєння території, що створює ризики для екологічної безпеки регіону.

Як видно з даних таблиці 1, найвищий вміст гумусу характерний для лісових ґрунтів (4,1 %), тоді як у промисловій зоні спостерігається його істотне зниження (1,9 %), що свідчить про прояви дегуміфікації. Реакція ґрунтового розчину на урбанізованих та промислових територіях зміщена

у бік кислих значень (pH 5,0–5,5), що є ознакою агрохімічної деградації.

Найвищі концентрації свинцю (62 мг/кг) зафіксовано в ґрунтах промислової зони, що вказує на техногенне навантаження.

На основі отриманих експериментальних даних встановлено: низький рівень ризику деградації – для лісових територій; середній рівень ризику – для сільськогосподарських угідь; високий рівень ризику – для урбанізованих і промислових зон, де поєднуються дегуміфікація, підкислення та хімічне забруднення. Отримані результати підтверджують необхідність диференційованого підходу до управління земельними ресурсами в системі екологічної безпеки Івано-Франківської області з урахуванням типу землекористування та інтенсивності антропогенного впливу.

На рис.2. відображено зміну концентрацій кадмію, цинку та міді у ґрунтах залежно від типу землекористування. Найвищі значення вмісту всіх досліджуваних важких металів зафіксовано в ґрунтах промислової зони, де концентрація цинку досягає близько 120 мг/кг, міді – близько 60 мг/кг, а кадмію – приблизно 0,9 мг/кг. Це свідчить про значний техногенний вплив на ґрунтовий покрив у межах промислових територій. В урбанізованій зоні також спостерігається підвищений вміст важких металів порівняно із сільськогосподарськими угіддями та лісовими територіями. Зокрема, концентрації цинку та міді тут становлять орієнтовно 78 та 35 мг/кг відповідно, що може бути пов'язано з впливом автотранспорту, комунально-побутових і промислових викидів. Для сільськогосподарських угідь характерні

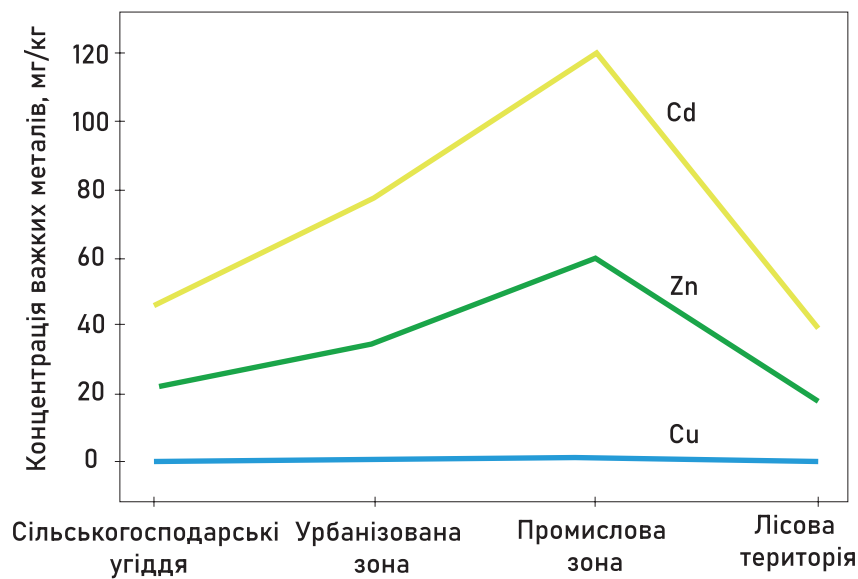


Рисунок 2. Вміст важких металів у ґрунтах різних типів територій Івано-Франківської області

помірні значення вмісту важких металів ($Zn \approx 45$ мг/кг, $Cu \approx 22$ мг/кг, $Cd \approx 0,25$ мг/кг), що може бути зумовлено застосуванням мінеральних добрив і засобів захисту рослин, а також атмосферним надходженням поллютантів.

Найнижчі концентрації кадмію, цинку та міді зафіксовано у ґрунтах лісових територій, які можуть розглядатися як умовно фонові ділянки з мінімальним рівнем антропогенного навантаження.

Загалом простежується чітка закономірність зростання вмісту важких металів зі збільшенням інтенсивності антропогенного впливу – від лісових територій до промислових зон, що свідчить про формування процесів хімічної деградації

ґрунтів та підвищення екологічних ризиків для довкілля і населення.

Аналіз даних таблиці 2 показує, що найвищі концентрації кадмію, цинку та міді характерні для ґрунтів промислової зони, де вміст Cd досягає 0,90 мг/кг, Zn – 120 мг/кг, а Cu – 60 мг/кг.

В урбанізованих зонах також спостерігається підвищення вмісту важких металів порівняно із сільськогосподарськими та лісовими територіями.

Найменші концентрації досліджуваних металів зафіксовано у лісових ґрунтах, що дозволяє розглядати їх як умовно фонові ділянки.

Фон: Pb = 12 мг/кг; Cd = 0,15 мг/кг; Zn = 40 мг/кг; Cu = 18 мг/кг.

Таблиця 2

Вміст важких металів у ґрунтах різних типів територій Івано-Франківської області

Тип території	Cd, мг/кг	Zn, мг/кг	Cu, мг/кг
Сільськогосподарські угіддя	0,25	45	22
Урбанізована зона	0,45	78	35
Промислова зона	0,90	120	60
Лісова територія	0,15	40	18

Таблиця 3

Коефіцієнти концентрації Кс (Сі/Сфон)

Тип території	Кс(Pb)	Кс(Cd)	Кс(Zn)	Кс(Cu)
Сільськогосподарські угіддя	1,50	1,67	1,13	1,22
Урбанізована зона	2,92	3,00	1,95	1,94
Промислова зона	5,17	6,00	3,00	3,33
Лісова територія	1,00	1,00	1,00	1,00

Коефіцієнти концентрації (Кс) розраховано як відношення фактичного вмісту елементів у ґрунті досліджуваних територій до їх фонових значень (лісова територія). Отримані результати свідчать про різний ступінь техногенного навантаження залежно від типу землекористування.

Для сільськогосподарських угідь значення коефіцієнтів концентрації становлять: $K_c(Pb) = 1,50$; $K_c(Cd) = 1,67$; $K_c(Zn) = 1,13$; $K_c(Cu) = 1,22$. Це свідчить про незначне перевищення фонових рівнів всіх досліджуваних елементів, що може бути пов'язано з використанням мінеральних добрив, пестицидів та впливом транспортних викидів. Отримані значення характеризують початкові прояви хімічної деградації ґрунтів агроландшафтів.

В урбанізованій зоні зафіксовано істотніше зростання коефіцієнтів концентрації: $K_c(Pb) = 2,92$; $K_c(Cd) = 3,00$; $K_c(Zn) = 1,95$; $K_c(Cu) = 1,94$. Найвищі значення характерні для кадмію та свинцю, що вказує на домінування автотранспортного навантаження, впливу побутових та промислових викидів. Перевищення фонових значень у 2–3 рази свідчить про формування осередків локального забруднення ґрунтів у межах міських територій.

Найвищі коефіцієнти концентрації встановлено для промислової зони: $K_c(Pb) = 5,17$; $K_c(Cd) = 6,00$; $K_c(Zn) = 3,00$; $K_c(Cu) = 3,33$. Отримані значення вказують на суттєве накопичення важких металів у ґрунтах, зумовлене викидами промислових підприємств та енергетичних об'єктів. Особливо небезпечним є високий рівень кадмію та свинцю, які характеризуються високою токсичністю та здатністю мігрувати в системі

«ґрунт – рослина – людина», що створює ризики для продовольчої та екологічної безпеки регіону.

Для лісової території (фонові) значення коефіцієнтів концентрації для всіх елементів дорівнюють 1,00, що підтверджує її використання як умовно природного еталону та мінімальний рівень антропогенного впливу. Таким чином, аналіз коефіцієнтів концентрації показує чітку тенденцію до зростання рівня забруднення ґрунтів важкими металами зі збільшенням інтенсивності антропогенного навантаження: від лісових територій до промислових зон. Найбільший внесок у формування хімічної деградації ґрунтів мають кадмій і свинець, що обумовлює необхідність посиленого моніторингу та впровадження ґрунтозахисних заходів у промислово-урбанізованих районах Івано-Франківської області.

Оскільки для перших трьох типів територій усі чотири досліджувані елементи (Pb, Cd, Zn, Cu) мають значення $K_c > 1$, прийнято $n = 4$.

Отримані результати свідчать про різний рівень сумарного забруднення ґрунтів залежно від типу землекористування. Для сільськогосподарських угідь сума коефіцієнтів концентрації становить 5,51, що відповідає значенню $Z_c = 2,51$. Це вказує на незначний рівень поліелементного забруднення ґрунтів, імовірно пов'язаний із застосуванням агрохімікатів та впливом транспортних викидів. Такий рівень забруднення характеризується як допустимий і не становить суттєвої загрози екологічній безпеці, однак свідчить про початкові прояви хімічної деградації ґрунтів.

В урбанізованій зоні сума коефіцієнтів концентрації дорівнює 9,81, а значення Z_c становить 6,81. Це свідчить про помітніше накопичення

важких металів у ґрунтах міських територій порівняно із сільськогосподарськими угіддями. Основними джерелами забруднення в даному випадку є автотранспорт, побутові та промислові викиди. Отриманий рівень Z_c також відповідає допустимій категорії, однак характеризується як екологічно напружений і потребує посиленого моніторингу.

Найвищі значення сумарного показника забруднення встановлено для промислової зони, де сума коефіцієнтів концентрації становить 17,50, а $Z_c = 14,50$. Це вказує на найбільший рівень поліелементного забруднення ґрунтів серед досліджуваних територій, зумовлений впливом промислових підприємств та енергетичних об'єктів. Незважаючи на те, що отримане значення формально відповідає допустимому рівню забруднення за шкалою оцінки Z_c , воно є граничним і свідчить про підвищений ризик хімічної деградації ґрунтів та можливу небезпеку міграції токсичних елементів у біогеохімічні ланцюги.

Для лісової території (фонові ділянки) сума коефіцієнтів концентрації дорівнює 4,00, а формально обчислене значення Z_c становить 1,00. Однак дана територія використовується як еталонна (фонові), тому показник Z_c для неї зазвичай не розраховують, а приймають як контрольну базу для порівняння з антропогенно трансформованими ділянками.

Таким чином, аналіз сумарного показника забруднення Z_c показує чітку тенденцію зростання рівня хімічної деградації ґрунтів у напрямі від лісових територій до промислових зон. Найбільш несприятливі умови формуються в межах промислово-урбанізованих територій, що зумовлює необхідність запровадження постійного моніторингу вмісту важких металів у ґрунтах та розроблення заходів з мінімізації техногенного навантаження в системі екологічної безпеки Івано-Франківської області.

Поширена шкала (Ю. Саєт, Б. Равич): $Z_c < 16$ – допустимий, 16–32 – помірний, 32–128 – небезпечний, >128 – надзвичайно небезпечний. Промислова зона ($Z_c = 14,50$) – найбільший ризик, але ще в межах допустимого за цією шкалою. Урбанізована зона (6,81) – нижчий, але помітний поліелементний вплив. С/г угіддя (2,51) – найнижчий серед антропогенних територій.

Висновки та перспективи подальших досліджень

У результаті проведених досліджень встановлено, що деградація ґрунтів Івано-Франківської області має чітко виражений антропогенний характер і зростає зі збільшенням інтенсивності господарського навантаження. Найбільш сприятливий стан ґрунтового покриву зафіксовано на лісових територіях, які можуть розглядатися як умовно фонові ділянки. Для сільськогосподарських угідь характерні прояви дегуміфікації та початкові ознаки хімічного забруднення, що пов'язано з інтенсивним землеробством і застосуванням агрохімікатів.

Урбанізовані та промислові території характеризуються найнижчим вмістом гумусу, підкисленням ґрунтового середовища та підвищеними концентраціями важких металів (Pb, Cd, Zn, Cu), що свідчить про формування процесів агрохімічної та хімічної деградації ґрунтів. Найвищі коефіцієнти концентрації та значення сумарного показника забруднення Z_c встановлено для промислової зони, що вказує на підвищений ризик міграції токсичних елементів у системі «ґрунт – рослина – людина» та створює загрозу екологічній безпеці регіону.

Отримані результати підтверджують доцільність використання диференційованого підходу до оцінювання екологічного стану ґрунтів з урахуванням типу землекористування та рівня антропогенного навантаження. Ґрунти промислово-урбанізованих територій потребують посиленого моніторингу та впровадження ґрунтозахисних заходів, спрямованих на зменшення техногенного впливу і відновлення їх екологічних функцій.

Перспективи подальших досліджень доцільно пов'язати з розширенням мережі пунктів ґрунтового моніторингу на території області, застосуванням ГІС-технологій для просторового аналізу деградаційних процесів та залученням біоіндикаторних і мікробіологічних показників для комплексної оцінки стану ґрунтів.

Окремим напрямом є дослідження міграції важких металів у трофічних ланцюгах і розроблення заходів фіторе mediaції та біоре mediaції як елементів регіональної системи екологічної безпеки.

Список використаної літератури

1. Волощук М. Деградація ґрунтів-глобальна екологічна проблема. Вісник Львівського університету. Івано-Франківськ, 2017. Серія географічна. Вип. 51. С. 63-69.
2. Татаріко О. Г., Ільєнко Т. В., Кучма Т. Л., Білокінь О. А. Ерозія ґрунтів як чинник опустелювання агроландшафтів України. Агроєкологічний журнал. Київ, 2021. №3. С. 6-14.
3. Водна ерозія: причини, наслідки та захист ґрунту. URL: <https://eos.com/uk/blog/vodna-eroziya/> (Дата звернення: 09.04.2025).
4. Ми їх втрачаємо! Ґрунти України бідніють і деградують. URL: <https://surl.li/wfpwey> (Дата звернення: 08.04.2025).
5. Налобіна О. О., Голотюк М. В., Пуць В. С. Дослідження впливу ущільнення ґрунту на його основні характеристики. Сільськогосподарські машини. Луцьк, 2023. Вип. 49. С. 40-45.
6. Еродованість ґрунтів України. URL: <https://surl.li/kigakt> (Дата звернення: 07.04.2025).
7. Стан українських ґрунтів стає проблемою екологічної безпеки країни. URL: <https://surl.li/wgyeek> (Дата звернення: 09.04.2025).
8. Бережняк Є. М., Наумовська О. І., Бережняк М. Ф. Деградаційні процеси в ґрунтах України та їх негативні наслідки для довкілля. Біологічні системи: теорія та інновації. Київ, 2022. Т. 13. № 3–4. С. 96–109.
9. Балюк С., Медведєв В., Воротинцева Л., Шимель В. Сучасні проблеми деградації ґрунтів і заходи щодо досягнення нейтрального її рівня. Вісник аграрної науки. 2017. № 8. С. 5–10.
10. Шарий Г. І., Нестеренко С. В., Щепак В. В. Органічне землеробство як інструмент охорони ґрунтів. Формування сталого землекористування: проблеми та перспективи. Полтава 2020. С. 74-77.
11. Татаріко О.Г., Сиротенко О.В., Кучма Т.Л., Ільєнко Т.В. Аерокосмічний моніторинг опустелювання та деградації земель. Науково-методичний посібник за ред. О.І. Фурдичка. Київ, 2017. С. 17-36.

РОЛЬ ТРАВ'ЯНИСТИХ ПОКРИТТІВ АЕРОДРОМІВ У ЗБЕРЕЖЕННІ ТА ВІДНОВЛЕННІ ҐРУНТІВ ЗАБРУДНЕНИХ НАФТОПРОДУКТАМИ

Черняк Л. М.¹, Кондакова Т. С.¹, Дмитруха Т. І.¹,

Томаш Манєцькі², Лапань О. В.¹

¹Державний університет «Київський авіаційний інститут»,
пр. Любомира Гузара, 1, 03058, м. Київ, Україна

²Лодзинський технологічний університет,
Стефана Жеромського 114, 90-543 м. Лодзь, Польща
larysa.cherniak@npp.kai.edu.ua

Анотація

У статті досліджено практичну, екологічну та фіторе mediaційну роль трав'янистих (дернових) покриттів, що використовуються на територіях аеродромів та аеропортів, з урахуванням їх впливу на якість ґрунтів і можливості відновлення ґрунтів, забруднених нафтопродуктами авіаційного походження. Показано, що діяльність аеропортів супроводжується значним техногенним навантаженням на ґрунтовий покрив, зокрема внаслідок потрапляння паливно-мастильних матеріалів, що призводить до порушення фізико-хімічних властивостей ґрунту, зниження його біологічної активності та фітотоксичності середовища.

Особливу увагу приділено агроекологічним перевагам створення багаторічного трав'яного покриву спеціального призначення на аеродромах як інструменту забезпечення екологічної безпеки ґрунтів, зменшення ерозійних процесів, пиловиділення та вторинного забруднення ґрунтових і поверхневих вод. У роботі обґрунтовано доцільність поєднання експлуатаційних функцій дернових покриттів із фіторе mediaційними властивостями рослин.

Наведено результати експериментальних досліджень з оцінки ефективності фіторе mediaції ґрунтів, штучно забруднених авіаційним пали-

вом, із використанням стандартних травосумішей та їх удосконалених варіантів із додаванням ріпаку й віки. Показано зниження рівня фітотоксичності ґрунту та покращення ростових показників тест-рослин у варіантах із фіторе mediaнтами. Запропоновано рекомендації щодо оптимізації технології формування рослинних покривів на територіях аеропортів.

Отримані результати можуть бути використані при розробці програм відновлення порушених ґрунтів у зоні впливу аеропортів та інших авіаційних підприємств, а також при впровадженні екологічно безпечних технологій управління земельними ресурсами аеродромів.

Ключові слова: трав'яністі покриття, дернові покриття, фіторе mediaція, ґрунти аеродромів, нафтопродукти, авіаційне паливо, екологічна безпека, відновлення ґрунтів.

Cherniak Larysa, Kondakova Tetiana, Dmytrukha Tetiana, Tomasz Maniecki, Lapan Oksana

Abstract

The article investigates the practical, ecological and phytoremediation role of grassy (turf) covers used on airfields and airport territories, with particular attention to their influence on soil quality and

the restoration potential of soils contaminated with petroleum products of aviation origin. It is shown that airport operations are associated with significant technogenic pressure on soil cover, primarily due to the ingress of fuel and lubricants, which leads to deterioration of physicochemical soil properties, reduced biological activity and increased phytotoxicity.

Special attention is paid to the agroecological benefits of establishing perennial grass covers of special purpose on airfields as an effective tool for ensuring soil ecological safety, reducing erosion processes, dust emissions and secondary contamination of groundwater and surface waters. The feasibility of integrating the operational functions of turf covers with the phytoremediation capacity of selected plant species is substantiated.

The paper presents the results of experimental studies assessing the efficiency of phytoremediation of soils artificially contaminated with aviation fuel using standard grass mixtures and improved variants supplemented with rapeseed and vetch. A decrease in soil phytotoxicity and improved growth parameters of test plants were recorded in variants containing phytoremediation species. Based on the obtained results, recommendations for optimizing the technology of plant cover formation on airport grounds are proposed.

The findings can be applied in the development of programs aimed at restoring disturbed soils in airport impact zones and other aviation-related areas, as well as in the implementation of environmentally safe land management practices for airfield territories.

Keywords: grassy covers, turf covers, phytoremediation, airfield soils, petroleum products, aviation fuel, ecological safety, soil restoration.

Постановка проблеми

Діяльність аеропорту нерозривно пов'язана зі значним техногенним навантаженням на усі компоненти довкілля [1]. Одним із найнебезпечніших чинників впливу є забруднення ґрунтів в зоні аеропорту нафтопродуктами [2], що призводить до порушення фізико-хімічних властивостей ґрунту, зниження його біологічної активності, зміни структури, порушення водно-повітряного режиму та мікробіологічної рівноваги [3]. Як наслідок, це призводить до накопичення токсичних

сполук, порушенню екологічної рівноваги, а також до деградації ґрунтового покриву.

Актуальність

В умовах інтенсивного розвитку авіаційної галузі особливого значення набуває питання екологічної безпеки функціонування аеропортів, зокрема збереження якості ґрунтів у межах їхніх територій а в зоні впливу даних підприємств. Під час експлуатації повітряних суден та наземних транспортних засобів в зоні аеропорту відбувається регулярне потрапляння до ґрунту паливно-мастильних матеріалів. Це призводить до погіршення структури ґрунту, зниження кількості аборигенних мікроорганізмів, і, як наслідок, до втрати процесу самовідновлення ґрунту та зниження важливих функцій трав'янистих покриттів ґрунту на території аеропорту.

Традиційні методи відновлення ґрунтів є високовартісними та не завжди екологічно безпечними. Враховуючи сучасні тенденції щодо забезпечення сталого екологічно безпечного розвитку аеропортів [4-5], актуальним є пошук високоефективних та екологічно безпечних методів відновлення порушених земель.

Як показали дослідження [6], ефективним, надійним та екологічно безпечним способом відновлення ґрунту є процес фіторемедіації – використання рослин, що здатні відновлювати екологічний сан ґрунту, забрудненого нафтопродуктами.

Проте, питання науково обґрунтованого підбору рослинних видів із високими фіторемедіаційними властивостями для формування дернових покриттів ґрунту на території аеропортів, залишається недостатньо дослідженим і потребує подальшого вивчення.

Зв'язок автора доробку із важливими науковими та практичними завданнями

З урахуванням актуальності проблеми деградації ґрунтів у зонах впливу аеропортів, було проаналізовано роль дернових покриттів ґрунту на території аеропорту та визначено напрямки для поєднання практичної ролі даних покриттів з фіторемедіаційною, для відновлення ґрунтів, забруднених нафтопродуктами.

Метою роботи була оцінка практичної та екологічної ролі дернових покриттів ґрунту на території аеропорту та визначення ефективності застосування стандартних трав'янистих сумішей з додаванням рекомендованих нами видів рослин при відновленні порушених ґрунтів в зоні впливу аеропорту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Забруднення колишнього середовища в зоні впливу аеропортів і, зокрема забруднення ґрунтів нафтопродуктами є актуальною екологічною проблемою для сучасної галузі цивільної авіації, враховуючи зростання інтенсивності авіатранспортних процесів [7-8, 14]. У результаті аналізу результатів останніх досліджень проблеми впливу діяльності аеропортів на навколишнє середовище, встановлено, що серед усіх компонентів довкілля ґрунтам приділяється найнижчий рівень уваги. Переважна більшість досліджень пов'язана з питанням впливу діяльності аеропортів на атмосферне повітря. У той же час, ґрунти виконують важливу роль для забезпечення відповідного рівня екологічної безпеки даних територій [15]. Окрім того, порушення ґрунтів впливом хімічного забруднення може призводити до зниження функцій дернових покриттів на території аеропортів. Трав'яністі покриття аеродромів відіграють важливу роль у збереженні екологічної рівноваги та зменшенні негативного впливу на навколишнє середовище.

Останні дослідження підтверджують, що використання трав'янистих покриттів сприяє не лише фізичному захисту ґрунту від ерозії, але й покращує його біологічну активність. Автори акцентують на здатності трав'янистих рослин абсорбувати хімічне забруднення, наприклад, важкі метали, та сприяти біорозкладу нафтопродуктів [16]. Крім того, трав'яні покриття сприяють поліпшенню водо- та повітропроникності ґрунтів, що важливо для відновлення природних процесів. Тому, важливим науково-практичним завданням є розроблення рекомендацій з використання ефективних технологій відновлення ґрунтів, забруднених нафтопродуктами в зоні впливу аеропортів. Використання у складі трав'янистих покриттів на аеродромах рослин фіторемедіантів може сприяти зменшенню забруднення ґрунтів [17-19],

знижуючи витрати на хімічні методи очищення та забезпечуючи стійкість екосистеми.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття

Незважаючи на наявність значної кількості досліджень та публікацій стосовно відновлення ґрунтів від забруднення нафтопродуктами, питання використання трав'янистих покриттів на території аеропорту в процесі фіторемедіації залишається недостатньо вивченим. Бракує практичних рекомендацій щодо оптимального складу травосумішей, здатних ефективно відновлювати ґрунт, забруднений нафтопродуктами, в зоні впливу аеропорту,

Новизна

Новизна даної роботи полягає у визначенні здатності окремих видів рослин, зокрема ріпаку та віки, до зниження рівня забруднення ґрунтів від нафтопродуктів у комплексному використанні з видами рослинами, що використовуються для формування трав'яного покриву території аеродромів. А також у розробці рекомендацій щодо формування ефективних травосумішок, використання яких дозволить вирішити питання відновлення ґрунтів в зоні впливу аеропорту.

Методологічне або загальнонаукове значення

Дослідження фіторемедіаційного потенціалу застосування трав'янистих покриттів в зоні впливу аеропорту має важливе значення для вирішення питання відновлення ґрунтів, забруднених нафтопродуктами. Отримані результати можуть стати основою для розробки та впровадження рекомендацій та рішень щодо підвищення рівня екологічної безпеки ґрунтів у зоні впливу даних підприємств.

Виклад основного матеріалу

У сучасних умовах активного техногенного впливу на біосферу декоративні трав'яністі покриття є невід'ємною часткою урбанізованих еко-

систем із значним потенціалом рівня екосистемних послуг, які виконують важливі естетичну та середовище твірну функції.

Значну роль газони, дернові чи трав'янисті покриття відіграють і для територій аеродромів, враховуючи негативний вплив останніх на навколишнє середовище і бажання науковців всього світу вжити відповідних заходів, спрямованих на зниження цього впливу.

Під дерновим покриттям ми розуміємо верхній шар ґрунту, густо порослий трав'янистими рослинами і скріплений її корінням, що підвищує міцність ґрунту і зменшує його розмочування та пилоутворення, що є особливо актуальним для території аеродромів [20].

Дернові покриття аеродромів та злітно-посадкових смуг належать до газонних покриттів спеціального призначення за класифікацією О.О. Лаптева [12]. Саме цей тип газону використовується для задерніння злітно-посадкових площадок на ґрунтових аеродромах, ділянок між цементними смугами в аеропортах, значення яких зросло у зв'язку із збільшенням повітряних ліній місцевого значення, авіаційних обробок в сільському господарстві, застосуванням авіації у суспільному та промисловому секторі.

Трав'янисті покриття на аеродромах можуть створюватися на окремих ділянках злітно-посадкових смуг, зокрема й у місцях, де не потрібне тверде покриття, для облаштування руліжних доріжок, що з'єднують злітно-посадкові смуги з перонами та іншими об'єктами аеродрому, для озеленення перонів – місць стоянки літаків, а також для облаштування санітарно-захисних зон навколо аеродрому задля запобігання поширення шумового та аерозольного забруднення, поширення пожеж тощо.

Дернові покриття спеціального призначення на аеродромах володіють низкою важливих експлуатаційних, екологічних та естетичних функцій:

- сприяють підвищенню рівня безпеки польотів через зменшення відблисків від освітлювальних засобів, покращення видимості для пілотів під час зльотно-посадкових маневрів;

- сприяють уповільненню та зупинці літаків як на злітно-посадкових смугах, так і у разі виконання літака за її межі;

- сформований трав'яний покрив перешко-

жає вітровій та водній ерозії ґрунту, його розми-
ванню й появі ям, утворення яких знижує безпеку;

- дерновий покрив, як надземна його частина, так і підземна, запобігає забрудненню ґрунтових вод нафтопродуктами та іншими шкідливими речовинами, які можуть потрапити в ґрунт під час експлуатації аеродрому;

- виконують шумопоглинальну роль, особливо за умов розташування аеродромів у межах урбанізованих територій;

- відіграють середовищотвірну роль, сприяють очищенню повітря та здійснюють пилоза-
тримання;

- можуть використовуватися для зонування та розмежування зон аеродрому, створюючи висококультурний естетичний аспект.

Відповідно до свого функціонального призначення дернові покриття такого типу повинні володіти низкою характерних властивостей та відповідати певним вимогам. Основним їхнім завданням є не естетичні чи високодекоративні властивості, а здатність до витримування суттєвого фізичного навантаження, їхня стійкість та довговічність, виконання певних еколого-санітарних та технічних функцій. Основною умовою для цього є науковообґрунтовані підходи до створення та подальшого агротехнічного догляду покриттів такого функціонального призначення, формування їх на основі комплексного підходу до оцінки вихідних умов та перспективних експлуатаційних характеристик.

Дернові покриття спеціального призначення повинні володіти низкою властивостей:

- 1) висока експлуатаційна стійкість – сформований трав'яний покрив повинен витримувати суттєве постійне навантаження від літаків, руху людей, техніки тощо;

- 2) формувати належний рівень густоти та щільності покриття, що забезпечує належний рівень експлуатаційних характеристик;

- 3) володіти високою відновлювальною здатністю, високим рівнем самопідтримки декоративності;

- 4) мати високу посухо-, жаро-, холодо- та морозостійкість, забезпечувати цілорічний естетичний вигляд;

- 5) бути стійкими до ураження шкідниками та хворобами, формувати якісний покрив за мінімального застосування агротехнічних засобів.

Основний видовий склад газонних травосумішів представлений видами родин злаків та бобових. Принципи складання травосумішок полягають у змішуванні насіння трав з різними типами кущіння, розташування і потужності кореневої системи, різної висоти. Коренева насиченість є однією з головних діагностуючих ознак стану газонних фітоценозів та визначає щільність дернового покриву, його еластичність і стійкість до фізичних навантажень. Більш стійкими вважаються газони, які складаються з трьох і більше видів рослин з кореневищним та нещільнокущовим типом кущіння. Травосуміші для аеродромів повинні складатися з видів, які утворюють рівномірний та густий травостій і щільне переплетення коренів на глибині щонайменше 12 см, мають пружність і стійкість до механічного розриву, однорідні структуру і щільність ґрунту на всій робочій площі. Крім того, при підборі видів для травосуміші суттєве значення мають кліматичні і ґрунтові умови регіону із врахуванням біологічних особливостей росту і розвитку рослин.

Згідно результатів досліджень вчених газонознавців правильно підібрані компоненти в газонних травосумішах дозволять сформувати фітоценоз, який має ярусну будову в надземній і підземній сферах, що також підвищує проективне покриття, до того ж, унаслідок біологічних відмінностей між видами рослин у такій травосуміші кожний компонент зможе зайняти певну екологічну нішу, де будуть найбільш сприятливі умови для його росту і розвитку. Все це дозволить більш ефективно використовувати ресурси середовища, збільшити довголіття травостою, знизити кількість бур'янів і зменшити кількість коштів на утримання та догляд, а тож, що є дуже важливим, дає можливість зберегти високі показники функціональної ефективності протягом тривалого часу.

Під час злітно-посадкових операцій відбувається потужний викид гарячої газової суміші, що спричиняє високу запиленість, значна кількість дрібного пилу розноситься на великі відстані. Дернові покриття спеціального призначення відіграють важливу роль як засоби захисту аеродромів від джерел пилоутворення. Тому в авіаційній галузі необхідним є впровадження нових технологій створення трав'янистих покриттів, індивідуального підбору травосуміші, які сприятимуть

зниженню екологічного навантаження повітряного транспорту на навколишнє середовище.

Трав'янисті покриття такого складу послугують надійним захистом від утворення вітрової та водної ерозії ґрунту на аеродромі, а також знизять ризик утворення весняних паводків. В цьому значну роль відіграє структуро утворювальна функція кореневої системи в ґрунтовому шарі та сам травостій, що чисельними пагонами і листками захищає поверхню ґрунту від цих процесів. Наявність травостою уповільнює швидкість руху потоку води у підземних шарах. Травостій вистилає поверхню ґрунту і цим захищає її від впливу водного потоку. У своїй сукупності міцна дернина з густим травостоєм є відмінним засобом проти розмивної дії води.

В країнах світу останнім часом проблемі боротьби з акустичним забрудненням навколишнього середовища від авіаційного транспорту, особливо поблизу аеропортів, приділяється велика увага [13-14]. Дернування льотного поля, а також території навколо аеропорту призводить до зниження рівня шумового забруднення через поглинання, розсіювання та відбивання звуків численними надземними вегетативними органами газонних трав, а також дернові покриття знижують дзеркальне, відбиття яскравого джерела світла (сонця), зменшуючи кількість відблисків.

Дернові покриття сприяють зменшенню теплового забруднення на території аеродромів. За рахунок транспірації у спекотний період дерновий травостій випаровує велику кількість вологи, тим самим знижуючи температуру повітря на 5-15°C, тому дерноване льотне поле порівняно з вкритим бетонним покриттям відрізняється більшою відносною вологістю та нижчою температурою поверхні та повітря.

Під час процесу фотосинтезу дерновий травостій виділяє кисень і поглинає вуглекислий газ, тим самим покращуючи якість атмосферного повітря, знижуючи кількість забруднюючих речовин, що викидається авіатранспортом.

За рахунок окремих представників дернові покриття мають фітонцидні властивості, завдяки яким природним шляхом відбувається дезінфекція території і знищення патогенних мікроорганізмів.

До того ж дернові покриття позитивно впливають на емоційний та психологічний стан паса-

жирів та працівників аеропортів, рівна поверхня великого розміру та зеленого кольору заспокоює та підвищує настрій, налаштовує людину на позитив, не перенапружує нервову систему.

Зважаючи на вищевикладене актуальним науковим напрямом є обґрунтування створення стійких дернових фітоценозів та трав'яних покриттів спеціального призначення на територіях аеропортів й аеродромів з високим техногенним тиском для поєднання практичної та екологічної функцій покриттів.

Метою нашого дослідження було експериментальне дослідження ефективності фітореMediaції ґрунту, забрудненого авіаційним керосином, з використанням удосконаленої суміші рослин при формуванні рослинного покриття, регламентованого нормативно-технічними документами [20] шару на поверхні ґрунтового покриву аеропортів.

Експериментальне дослідження фітореMediaційної здатності сформованих рослинних покриттів було виконане за розробленою методикою з використанням стандартних для формуван-

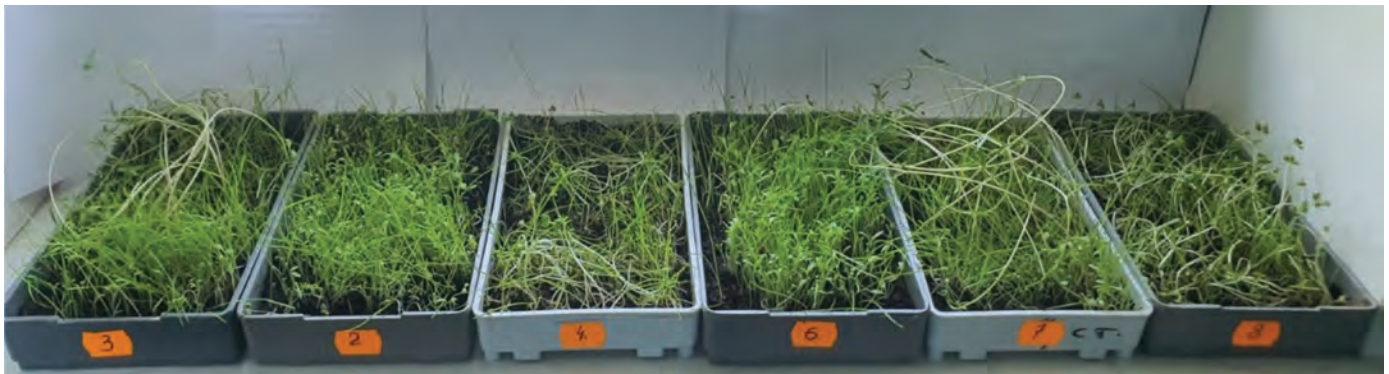


Рисунок 1. Зразки рослин після пророщування

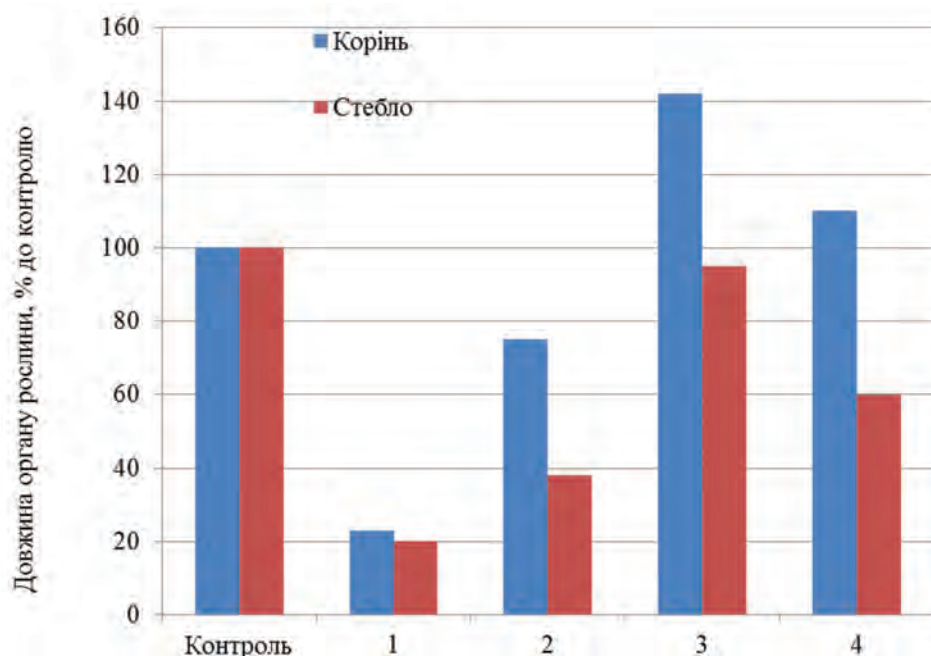


Рисунок 2. Залежність довжини органу тест-рослин від типу суміші рослин (на 7-му добу фітореMediaції): 1 – чиста проба ґрунту з пророщуванням стандартної суміші рослин; 2 – проба ґрунту, штучно забруднена авіаційним паливом у кількості 10 ОДК з пророщуванням стандартної суміші рослин; 3 – проба ґрунту штучно забруднена авіаційним паливом у кількості 10 ОДК з пророщуванням стандартної суміші рослин з додаванням віки; 4 – проба ґрунту, штучно забруднена авіаційним паливом у кількості 10 ОДК з пророщуванням стандартної суміші рослин з додаванням ріпаку

ня рослинного покриття на території аеропорту видів рослин [20] та додаванням запропонованих нами видів рослин, що були обрані для використання у технології фіторемедіації на основі попередніх результатів скринінгу рослин [21]. До кожної ростильні розміром 200x100мм було додано 200 г ґрунту та висіяно стандартну кількість насіння рослин. Було сформовано чотири проби ґрунту: 1 – чиста проба ґрунту з пророщуванням стандартної суміші рослин; 2 – проба ґрунту, штучно забруднена авіаційним паливом у кількості 10 ОДК з пророщуванням стандартної суміші рослин; 3 – проба ґрунту штучно забруднена авіаційним паливом у кількості 10 ОДК з пророщуванням стандартної суміші рослин з додаванням віки; 4 – проба ґрунту, штучно забруднена авіаційним паливом у кількості 10 ОДК з пророщуванням стандартної суміші рослин з додаванням ріпаку. Далі проби було накрито поліетиленовою плівкою та розміщено у термостаті за температури 23°C для пророщування. Вимірювання ростових характеристики рослин здійснювали на 7-му добу пророщування (рис.1).

Біотестування досліджуваних проб ґрунту було здійснено за стандартною методикою біотестування ґрунту «ростовий тест». Результати експериментальних досліджень (рис. 2) підтвердили підвищення зниження рівня фітотоксичності ґрунту, забрудненого авіаційним паливом, при додаванні рослин ріпаку та віки до стандартних трав'яних сумішей покритті аеродрому.

Враховуючи знання про біологічні особливості та закономірність формування високоякісних дернових фітоценозів через науково обґрунтований підбір видів до травосумішей, запропоновано удосконалений компонентний склад травосуміші, із додавання ріпаку та гірчиці, застосування яких сприятиме забезпеченню фіторемедіаційної здатності даного рослинного покриття ґрунту з одночасним збереженням експлуатаційних характеристик, продуктивності, стійкості та довговічності трав'янистих фітоценозів при надмірному фізичному навантаженні злітно-посадкових смуг аеродромів та аеропортів.

Дані матеріали можуть використовуватися при складанні раціональних травосумішей та проведенні заходів з підвищення екологічної ролі та стійкості, довговічності газонних покривів для урбанізованих ландшафтів.

Висновки

Встановлено, що під час експлуатації зони аеропорту фіксується значне техногенне навантаження на ґрунти, зокрема забрудненням нафтопродуктами, що призводить до порушення їх фізико-хімічних властивостей і зниження біологічної активності.

Доведено, що трав'янисті суміші з додаванням ріпаку та віки забезпечують підвищену ефективність процесу фіторемедіації сприяючи зниженню рівня фітотоксичності ґрунту.

Показано, що застосування запропонованих сумішей рослин дозволяє знизити ризик деградації ґрунту, підвищити екологічну стійкість території аеропорту та сприяти мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище.

Список використаної літератури

1. M. Radomska, S. Madzhd, O.Mikhyeyev, L. Cherniak. Environmental Pollution in the Airport Impact Area–Case Study of the Boryspil International Airport. / Ecological Problems. 2020. Vol. 5, no. 2. P. 76–82.
2. Brtnický, M., Pecina, V., Baltazár, T., Vašinová Galiová, M., Baláková, L., Beš, A., & Radziemska, M. (2020). Environmental Impact Assessment of Potentially Toxic Elements in Soils Near the Runway at the International Airport in Central Europe. Sustainability, 12(17), 7224. <https://doi.org/10.3390/su12177224>
3. Шевчик-Костюк, Л. З., Романюк, О. І., & Ощеповський, І. В. (2022). Особливості забруднення ґрунтів нафтою та нафтопродуктами: огляд. Acta Biologica Ukrainica, (1), 32-40. <https://doi.org/10.26661/2410-0943-2022-1-04>
4. Mohammad Parhamfar, Towards green airports: Factors influencing greenhouse gas emissions and sustainability through renewable energy, Next Research, Volume 1, Issue 2, 2024, 100060, ISSN 3050-4759, <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2024.100060>.
5. Jegan Ramakrishnan, Tingting Liu, Rongrong Yu, Karthick Seshadri, Zhonghua Gou, Towards greener airports: Development of an assessment framework by leveraging sustainability reports and rating tools, Environmental Impact Assessment Review, Volume 93, 2022, 106740, ISSN 0195-9255,

<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106740>.

6. Черняк Л., Міхєєв О., Лапань О., Дмитруха Т., Яремчук Л. Аналіз ефективності використання методу фітореMediaції для відновлення нафтозабрудненого ґрунту. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2023. Т. 5, № 126. С. 19–26.

7. Xiong, C., Tian, Y., Liu, X., Tan, R., & Luan, Q. (2022). The Different Impacts of Airports on the Ecological Environment under Distinct Institutional Contexts. *Land*, 11(2), 291. <https://doi.org/10.3390/land11020291>

8. Hamidreza Moradi, Gholamali Shafabakhsh, Ali Naderan, Effect of airport pollution on airport cities and air quality of the area (case study: Imam Khomeini international airport), *Journal of Transport & Health*, Volume 34, 2024, 101729, <https://doi.org/10.1016/j.jth.2023.101729>.

9. Борецька І.Ю. , Джура Н.М. , Романюк О.І. ФітореMediaція техногенно забруднених ґрунтів з використанням енергетичних культур. Екологічні науки № 6(39), 2021, С. 72-76.

10. Софіїч О. Р., Гринь С. О. Фіторедіація як спосіб відновлення нафтозабруднених ґрунтів. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. 2020. Ч. IV. С.44

11. Л. Д. Романчук, Н. Г. Матвійчук, Б. В. Матвійчук. ФітореMediaція ґрунтів шляхом вирощування енергетичних культур. № 11 (2025): Український журнал природничих наук. С. 223-224.

12. Газони: технологічні особливості створення та експлуатації: навч. посіб. / І.М. Дідур, В.М. Прокопчук, О.І. Циганська, В.І. Циганський; Вінн. нац. аграр. ун-т. – Вінниця: ВНАУ, 2019. – 293 с.

13. Ramos, A., & Maia, N. (2020). Environmental Impacts of Airport Noise: A Review of Case Studies and Mitigation Strategies. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101934.

14. Anna Maria Sulej, Żaneta Polkowska, and Jacek Namieśnik. (2022). Contamination of Runoff Water at Gdańsk Airport (Poland) by Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Polychlorinated Biphenyls (PCBs). *Sensors*. 2011, 11(12), 11901-11920. <https://doi.org/10.3390/s111211901>.

15. L.M. Nunes, Y.-G. Zhu, T. Y. Stigter, J. P. Monteiro and M. R. Teixeira. (2011). Environmental impacts on soil and groundwater at airports: origin, contaminants of concern and environmental risks. *J. Environ. Monit.*, 13, 3026–3039 <https://doi.org/10.1039/c1em10458f>.

16. Korzeniowska, J. & Stanisławska-Głubiak, E. (2023). The Phytoremediation Potential of Local Wild Grass Versus Cultivated Grass Species for Zinc-Contaminated Soil. *Agronomy*, 13(1), 160. <https://doi.org/10.3390/agronomy1301010>.

17. Шевчик Л. З., Романюк О. І. Аналіз біологічних способів відновлення нафтозабруднених ґрунтів. *Scientific Journal «ScienceRise: Biological Science»*. 2017. № 1(4). С. 31–39. Rizwan, M.

18. Ali, S.; Rizvi, H.; Rinklebe, J.; Tsang, D.C.W.; Meers, E.; Ok, Y.S.; Ishaque, W. Phytomanagement of Heavy Metals in Contaminated Soils Using Sunflower: A Review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2016, 46, 1498–1528.

19. Arjun Kafle, Anil Timilsina, Asmita Gautam, Kaushik Adhikari, Anukul Bhattarai, Niroj Aryal, Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents, *Environmental Advances*, Volume 8, 2022, 100203, <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100203>

20. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1229-13#Text>.

21. Скринінг рослин для фітореMediaційного відновлення ґрунтів, забруднених нафтопродуктами. / Л. Черняк та ін. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2024. № 4. С. 24–25.

СОНЯЧНІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЕКОЛОГІЧНОЇ РЕВІТАЛІЗАЦІЇ ВІДПРАЦЬОВАНИХ КАР'ЄРІВ

Редько А. І., Адаменко Я. О.

Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу

e-mail: redko.geo@gmail.com

e-mail: yarad1964@gmail.com

Анотація

У статті запропоновано підхід до оцінювання придатності схилів відпрацьованих вапнякових кар'єрів для розміщення наземних сонячних електростанцій (СЕС) на прикладі Стриганецького кар'єру поблизу с. Довге (Івано – Франківська область, Україна). Актуальність теми зумовлена необхідністю поєднання завдань рекультивації порушених земель та розвитку відновлюваної енергетики, зокрема використанням техногенно порушених земель для розміщення СЕС, що активно обговорюється у світовій літературі для відкритих гірничих розробок, але практично не реалізовано для умов Українських Карпат [1 – 3]. На основі цифрової моделі рельєфу кар'єру виконано просторовий аналіз розподілу ухилів, експозицій схилів та сумарної річної сонячної радіації. Для оцінювання придатності використано трирівневу систему класифікації за кожним з показників (поза розрахунком, помірно придатні, придатні, найбільш придатні) з подальшим формуванням інтегрального індексу придатності як добутку часткових індексів. До аналізу було залучено лише ті схили з крутістю понад 15°, які орієнтовані в південний сектор (від півдня через південний схід до південного заходу) та характеризуються підвищеними значеннями річної сумарної сонячної радіації.

Додатково застосовано фільтрацію за площею полігонів, що дозволило відсіяти дрібні, технологічно непридатні фрагменти. У результаті виділено «перспективний схил» площею близько 1,7 га, на якому геометричні параметри рельєфу та радіаційні умови є найсприятливішими для розміщення СЕС.

На основі середньорічної величини радіації та прийнятих параметрів фотоелектричних модулів оцінено потенційний річний виробіток електроенергії та можливу встановлену потужність майбутньої станції.

Показано, що запропонована методика може бути інтегрована у завершальні розділи проєктів розробки та рекультивації кар'єрів як інструмент попереднього планування геометрії уступів та схилів з урахуванням перспектив їх подальшого використання для розміщення СЕС.

Для території Івано – Франківської області це перша спроба комплексного GIS – моделювання придатності схилів відпрацьованого кар'єру з урахуванням інсоляції, ухилу та експозиції, що формує підґрунтя для подальшого поширення підходу на інші гірничі об'єкти регіону.

Ключові слова: відпрацьований кар'єр; рекультивація; сонячна електростанція; деградовані землі; відновлювані джерела енергії; GIS – моделювання; експозиція схилу; сонячна радіація; інтегральний індекс придатності.

SOLAR POWER PLANTS AS A TOOL FOR THE ECOLOGICAL REVITALIZATION OF ABANDONED QUARRIES

A. I. Redko, Y. O. Adamenko
Ivano-Frankivsk National Technical
University of Oil and Gas

Abstract

The article proposes an approach to assessing the suitability of slopes of exhausted limestone quarries for the deployment of ground-mounted solar power plants (SPPs), using the Stryhynets quarry near the village of Dovhe (Ivano-Frankivsk Oblast, Ukraine) as a case study. The relevance of the topic is driven by the need to combine the tasks of reclaiming disturbed lands with the development of renewable energy, in particular the use of technically disturbed lands for SPP siting. This issue is actively discussed in the international literature for open-pit mining sites, but has been virtually unexplored under the conditions of the Ukrainian Carpathians [1–3]. Based on a digital elevation model of the quarry, a spatial analysis of the distribution of slope gradients, slope aspects and annual global solar irradiation was performed. To assess suitability, a three-level classification was applied for each indicator (excluded from consideration, moderately suitable, suitable, highly suitable), followed by the construction of an integral suitability index as the product of the partial indices. The analysis considered only slopes steeper than 15°, oriented towards the southern sector (from south-east through south to south-west) and characterised by increased values of annual global solar irradiation. Additional filtering by polygon area was applied to remove small, technologically unsuitable fragments. As a result, a «prospective slope» with an area of about 1.7 ha was identified, where the geometric parameters of the terrain and the radiation conditions are most favourable for SPP installation. Using the mean annual irradiation and the adopted parameters of photovoltaic modules, the potential annual electricity generation and the possible installed

capacity of a future plant were estimated. It is shown that the proposed methodology can be integrated into the final stages of quarry design and reclamation projects as a tool for pre-planning the geometry of benches and slopes, taking into account their future use for SPP deployment. For the territory of Ivano-Frankivsk Oblast, this represents the first attempt at comprehensive GIS-based modelling of the suitability of exhausted quarry slopes considering insolation, slope and aspect, providing a basis for further application of the approach to other mining sites in the region.

Keywords: exhausted quarry; land reclamation; solar power plant; degraded land; renewable energy sources; GIS modelling; slope aspect; solar radiation; integral suitability index.

Постановка проблеми

Вичерпання запасів корисних копалин у відкритих розробках супроводжується формуванням значних площ порушених земель, які часто залишаються малопридатними для традиційних видів використання. Натомість світова практика демонструє зростаючий інтерес до інтеграції відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних електростанцій, у структуру післягірничого використання територій шахт і кар'єрів [1, 2, 8, 12].

Для України, а особливо для гірських та передгірських районів Карпат, це питання є актуальним з двох причин:

- високий потенціал сонячної радіації на південних та південно – західних схилах;
- потреба у ревіталізації відпрацьованих кар'єрів та пошуку економічно доцільних сценаріїв їх рекультивациі.

При цьому більшість існуючих робіт, присвячених розміщенню СЕС, зосереджуються на рівнинних або слабо хвилястих територіях та використовують багатофакторні методи (АНР, TOPSIS, нечіткі MCDM) на рівні регіональних чи національних масштабів [4–7].

Питання детального моделювання інсоляції та геометрії схилів у межах окремого кар'єру, пов'язаного з конкретною геометрією уступів і «проектом виробітки», залишаються недостатньо опрацьованими, особливо в українському контексті.

Таким чином, виникає науково – практична задача: розробити підхід до оцінювання придатності схилів відпрацьованого кар'єру для розміщення СЕС, який би одночасно враховував інсоляційні характеристики, ухил та експозицію, а також міг бути інтегрований у завершальні стадії проєктів рекультивації кар'єрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Можливості використання гірничих територій для розміщення сонячних електростанцій активно розглядаються у низці сучасних праць. Зокрема у роботі [1] автори продемонстрували, що глобальні гірничі території мають значний потенціал для встановлення СЕС, здатний робити помітний внесок у декарбонізацію енергетики.

Ряд досліджень у Південній Кореї аналізують фотогальванічний потенціал на територіях рекультивації покинутих шахт, використовуючи карти відновлюваних ресурсів та GIS – аналіз [2, 11, 12].

Показано, що поєднання інформації про глобальну горизонтальну радіацію, характер землекористування та інженерні обмеження дозволяє відбирати ділянки для СЕС у межах десятків та сотень гірничих об'єктів.

На рівні методології вибору майданчиків для СЕС в останні роки домінують підходи на основі багатокритеріального аналізу, що інтегруються з GIS. Автори [4] запропонували АНР – TOPSIS – метод для вибору майданчиків СЕС на відвалах вуглевідходів, поєднуючи технічні, екологічні та соціально – економічні критерії [4].

У статті [5] застосували нечітку MCDM для оцінки придатності територій до розміщення СЕС, інтегруючи радіаційні, орографічні та інфраструктурні показники.

У статті [6] автори використали GIS та нечіткий АНР для вибору майданчиків СЕС у західному Середземномор'ї Туреччини, а у роботі [7] автори проаналізували оптимальне розміщення СЕС за допомогою GIS та багатокритеріального аналізу на прикладі Іспанії. Подібні підходи демонструють ефективність поєднання просторових даних та MCDM, однак переважно зосереджуються на макрорівні (регіони, провінції).

Для детального моделювання сонячної радіації в складному рельєфі ключову роль відіграють моделі на кшталт *r.sun* у GRASS GIS, розробленої авторами [9, 10], а також численні застосування GIS для розрахунку сонячних карт та оцінки потенціалу дахів чи схилів [8].

В українському контексті питання рекультивації кар'єрів під розміщення СЕС нами розглядалося, у роботі [3], де обґрунтовано доцільність використання відпрацьованих кар'єрів для будівництва сонячних електростанцій та наведено узагальнену методику оцінки їхнього потенціалу. Однак вказане дослідження не деталізує GIS – моделювання інсоляції на рівні окремих схилів та не інтегрує його безпосередньо з геометрією кар'єру.

Отже, невирішеною залишається задача розроблення детальної методики для одного конкретного кар'єру, яка б комплексно враховувала:

- ухил та експозицію схилів;
- поле сумарної річної сонячної радіації;
- фільтрацію ділянок за площею;
- можливість інтеграції результатів у проєкти рекультивації.

Ця прогалина й обумовлює мету даної роботи.

Мета статті та постановка завдання

Мета дослідження – розробити та апробувати GIS – методику оцінювання придатності схилів відпрацьованого вапнякового кар'єру для розміщення наземної сонячної електростанції, з подальшим виділенням перспективного схилу та оцінкою його енергетичного потенціалу.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

Побудувати цифрову модель рельєфу (ЦМР) кар'єру та отримати на її основі карти ухилів, експозицій та сумарної річної сонячної радіації.

Розробити класифікацію ухилів, експозицій і радіації за рівнями придатності до розміщення СЕС.

Сформувати інтегральний індекс придатності шляхом поєднання часткових індексів та побудувати карту інтегральної придатності схилів.

Виконати фільтрацію виділених ділянок за мінімальною площею та визначити перспективний схил для розміщення СЕС.

Оцінити потенційну встановлену потужність та річний виробіток СЕС на виділеному схилі.

Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є відпрацьований вапняковий кар'єр поблизу с. Довге (Стриганецький кар'єр) в Івано – Франківській області. Кар'єр розташований у передгір'ї Карпат, характеризується складним рельєфом із системою уступів та терас, що формують різноорієнтовані схили.

Для аналізу використано:

- цифрову модель рельєфу кар'єру, побудовану за результатами геодезичного знімання;
- супутникові та картографічні дані про контури кар'єру та прилеглі території;
- кліматичні дані про сонячну радіацію (довгострокові середньорічні значення) для району дослідження.

Побудова цифрової моделі рельєфу та похідних карт

На основі вхідних геодезичних даних створено растрову ЦМР із просторовою роздільною здатністю, узгодженою з розмірами уступів, що дозволяє візуалізувати загальну будову рельєфу кар'єру та прилеглої території і слугує вихідною основою для подальших розрахунків (рис. 1).

У середовищі ArcGIS сформовано такі похідні шари:

Карта ухилів – значення ухилу в градусах для кожного пікселя ЦМР.

Карта експозицій схилів – азимут експозиції ($0 - 360^\circ$) з відліком від півночі за годинниковою стрілкою.

На (рис. 2) подано просторовий розподіл експозиції схилів у межах Стриганецького кар'єру, отриманий шляхом розрахунку азимутів похилу поверхні за цифровою моделлю рельєфу. Значення експозиції згруповано у класові інтервали ($1 - 21^\circ$, $22 - 44^\circ$, ..., $331 - 360^\circ$), які відображено різними кольорами та накладено на тривимірну модель кар'єру. Така візуалізація дозволяє виокремити ділянки південної та наближених до неї орієнтацій, що є ключовими для подальшої

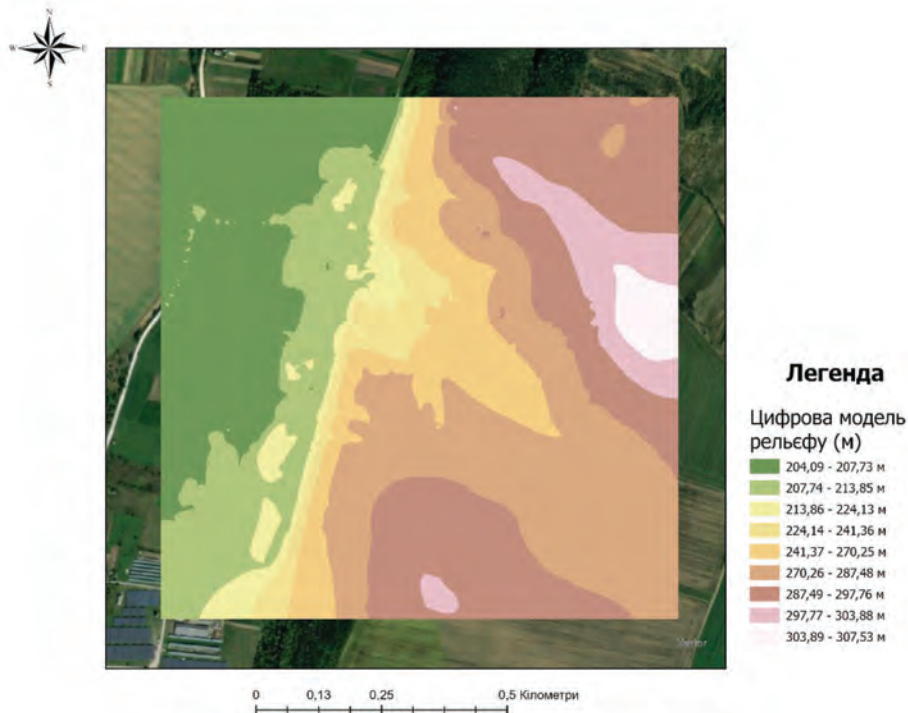


Рисунок 1. Цифрова модель рельєфу Стриганецького кар'єру, побудована за даними топографічного знімання

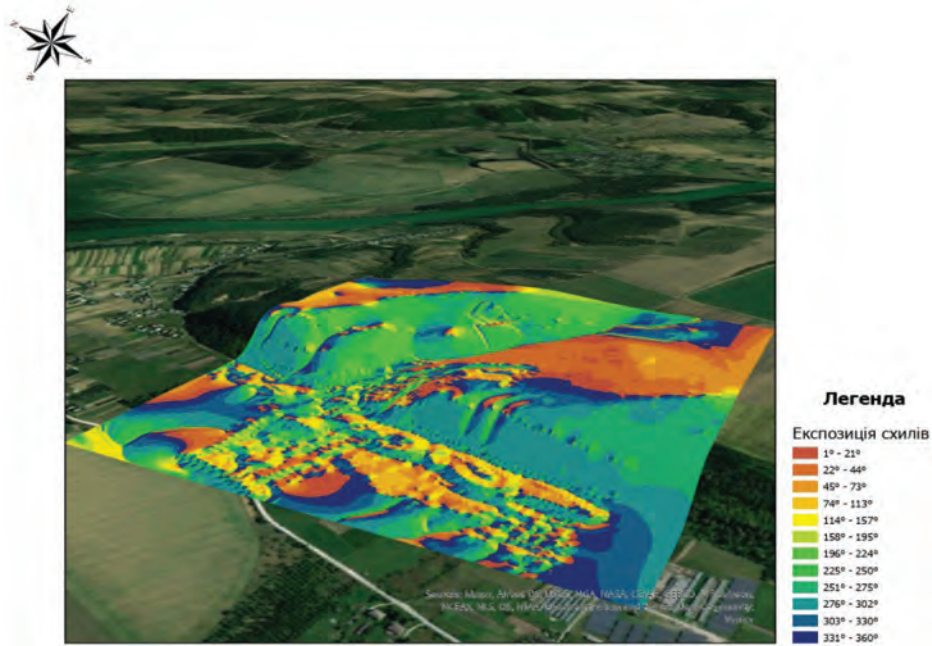


Рисунок 2. Модель експозиції схилів Стриганецького кар'єру

оцінки сонячного потенціалу схилів при розміщенні сонячних електростанцій.

Карта сумарної річної сонячної радіації – інтегральна річна радіація, перерахована до площини, дотичної до поверхні схилу (МВт·год/м²·рік). Для її отримання застосовано методику GIS – моделювання сонячної радіації, аналогічну до реалізованої в g.sun та подібних моделях, які враховують орографію, тіньові ефекти та характеристики атмосфери [8 – 10].

На (рис. 3) представлено просторовий розподіл сумарної річної сонячної радіації в межах Стриганецького кар'єру. Значення радіації варіюють у діапазоні приблизно від 0,18 до 1,17 МВт/м², що відображено градієнтом кольорів від холодних до теплих тонів. Карта враховує геометрію схилів та затінення бортами кар'єру і слугує основою для виділення ділянок із підвищеним сонячним потенціалом для подальшого розміщення сонячних електростанцій.



Рисунок 3. Модель сумарної річної сонячної радіації (МВт/м²) для Стриганецького кар'єру

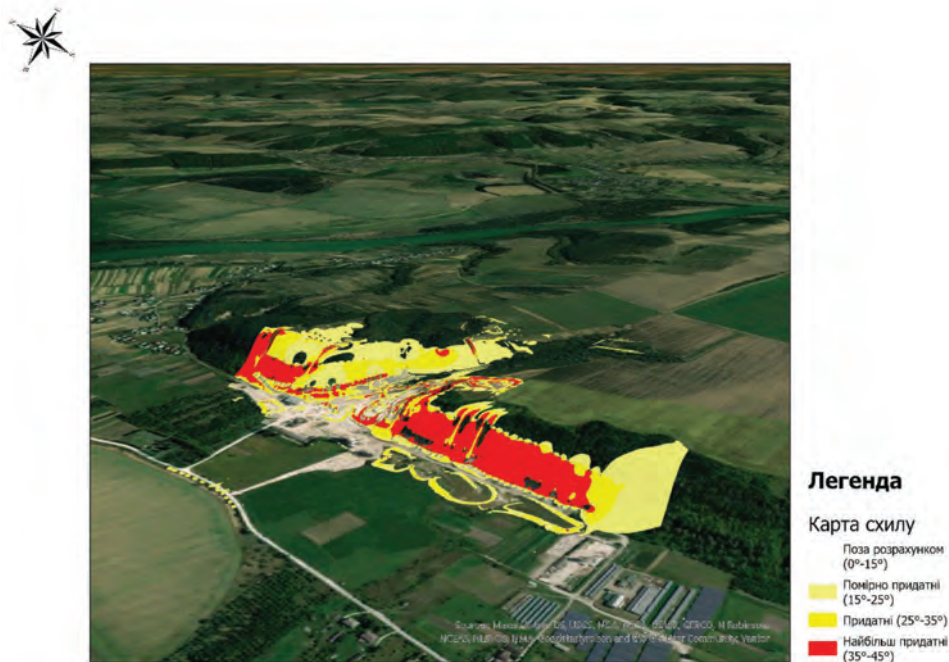


Рисунок 4. Карта класифікованих ухилів поверхні Стриганецького кар'єру

З метою оцінки придатності схилів до розміщення СЕС кожен з трьох показників – ухил, експозиція та сумарна річна радіація – класифіковано за чотирма рівнями:

- 0 – «поза розрахунком» (непридатні або виключені ділянки);
- 1 – «помірно придатні»;
- 2 – «придатні»;
- 3 – «найбільш придатні».

Нами були обґрунтовано наступні критерії за ухилом – до розрахунку включали лише ділянки з ухилом більше 15°, оскільки площі з меншими ухилами розглядаються як рівнинні та не відповідають фокусу роботи на схилах.

Для ділянок з більшими ухилами встановлено такі класи (приклад, який може уточнюватися в подальших роботах) (рис. 4):

- $0 \leq 15^\circ$ (поза розрахунком);



Рисунок 5. Карта придатності схилів Стриганецького кар'єру за експозицією

- 15° – 25° (помірно придатні);
- 25° – 35° (придатні);
- 35° – 45° (найбільш придатні з точки зору

використання рельєфу для щільного розміщення рядів панелей, за умови забезпечення стійкості та безпеки).

За експозицією схили були поділено на такі групи (кут – азимут експозиції) (рис. 5):

- 0 – поза розрахунком: 0 – 120° та 240 – 360° (переважно північні, північний схід і північний захід);
- 1 – помірно придатні: 120 – 150° та 210 – 240°;
- 2 – придатні: 150 – 165° та 195 – 210°;
- 3 – найбільш придатні: 165 – 195° (максимально наближені до південної орієнтації).

Таким чином, у розрахунок включаються схили з орієнтацією від південного сходу до південного заходу, що відповідає рекомендаціям щодо орієнтації панелей у Північній півкулі [5 - 7].

Сумарну річну радіацію на схилі (МВт·год/м²·рік) також було класифіковано на 4 класи за квантилями або фіксованими порогами (конкретні порогові значення визначено за статистикою для кар'єру):

- 0 – поза розрахунком: ≤1000;
- 1 – помірно придатні: 1000 – 1100;

- 2 – придатні: 1100 – 1200;
- 3 – найбільш придатні: >1200.

Для комплексної оцінки придатності кожного пікселя використано інтегральний індекс придатності I_{INT} , що обчислюється як добуток трьох часткових індексів:

$$I_{int} = I_S \cdot I_E \cdot I_R, \quad (1)$$

де:

I_S – індекс ухилу (0, 1, 2, 3); I_E – індекс експозиції (0, 1, 2, 3); I_R – індекс річної радіації (0, 1, 2, 3).

Інтерпретація результатів обчислення за формулою (1):

– якщо $I_{INT} = 0$, ділянка виключається з подальшого розгляду;

– чим більше значення I_{INT} , тим вищою є комплексна придатність для розміщення СЕС.

На основі цієї формули побудовано карту інтегрального індексу придатності (рис. 6).

Відбір ділянок та виділення перспективного схилу проводили за:

1. Фільтрація за площею – оскільки практичне розміщення СЕС потребує певної мінімальної площі для формування рядів панелей, полігони з високими значеннями I_{INT} було додатково відфільтровано за критерієм площі. З карти інтегрального індексу придатності виділено полігони з:
 - значенням $I_{INT} > 0$;



Рисунок 6. Карта інтегрального індексу придатності схилів Стриганецького кар'єру для розміщення сонячної електростанції

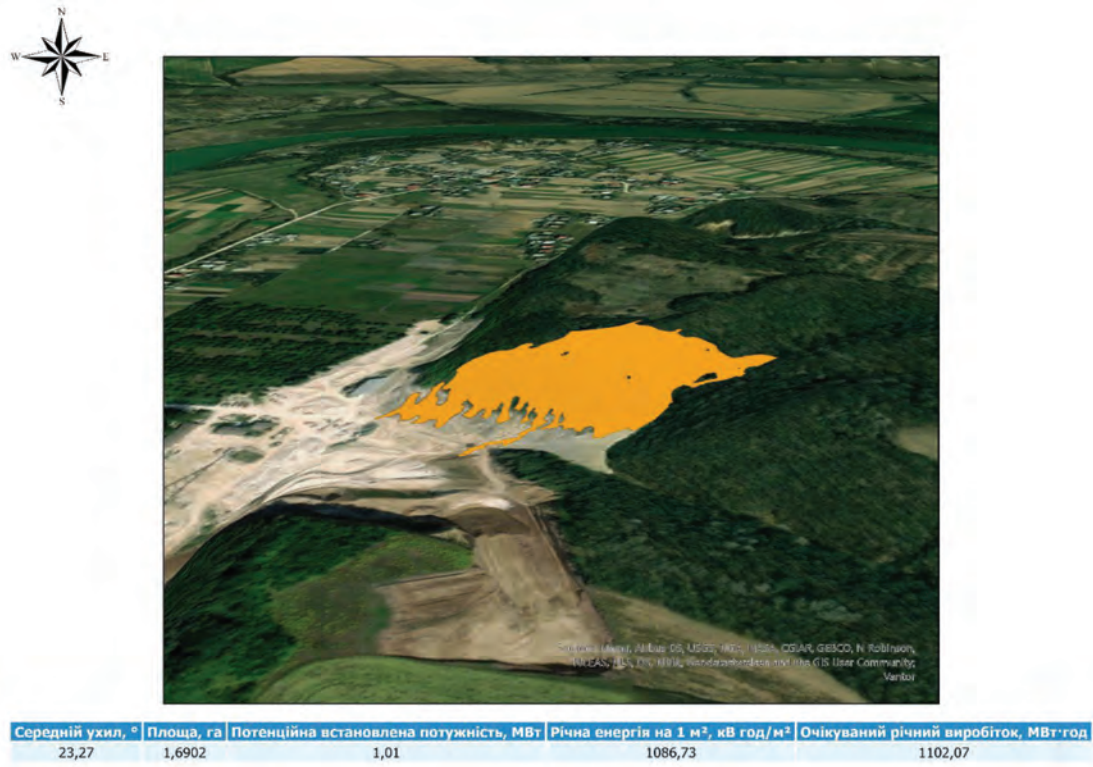


Рисунок 7. Виділена ділянка з максимальною інтегральною придатністю для розміщення СЕС у Стриганецькому кар'єрі

– площею не менше встановленого порогу (у роботі використано поріг, що дозволяє уникнути фрагментів, менших за кілька сотих гектара).

Це дало змогу відсіяти дрібні ділянки придатності, які, з інженерної точки зору, економічно недоцільно освоювати під окремі масиви панелей.

2. Характеристика виділеного схилу - у результаті аналізу в межах Стриганецького кар'єру виділено перспективний схил площею близько 1,7 га (рис. 7), який:

– розташований на південному або близькому до півдня схилі;

– має ухили, що забезпечують вигідне розташування панелей щодо Сонця та можливість оптимізувати відстань між рядами;

– характеризується підвищеними значеннями сумарної річної радіації порівняно із середніми по кар'єру;

– утворює відносно цілісну ділянку без суттєвого «розбиття» уступами на дрібні фрагменти.

Цей схил розглядається як еталонна ділянка для оцінки енергетичного потенціалу та приклад того, як геометрія кар'єру може бути використана для формування майданчика під СЕС.

3. Оцінка енергетичного потенційного річного виробітку електроенергії здійснюється на основі:

1. Середньорічної сумарної сонячної радіації на площину схилу $G_{р\text{іч}}$ (кВт·год/м²·рік), отриманої з карти радіації.

2. ККД фотоелектричної системи (модулі + інвертори + кабельні втрати), який для сучасних СЕС зазвичай приймається в 0,6 для перерахунку від енергії сонячної радіації до електричної енергії на виході станції [5, 7].

3. Площа перспективного схилу $F \approx 1690,2 \text{ м}^2$.

У загальному вигляді річний виробіток електроенергії на схилі можна подати як:

$$E_{р\text{іч}} = G_{р\text{іч}} \cdot F \cdot \eta_{\text{системи}} \quad (2)$$

де:

$E_{р\text{іч}}$ – річний виробіток електроенергії, кВт·год/рік; $G_{р\text{іч}}$ – сумарна річна сонячна радіація на площину схилу, кВт·год/м²·рік; F – площа перспективного схилу, м²; $\eta_{\text{системи}}$ – загальний коефіцієнт корисної дії фотоелектричної системи (0,60).

$$E_{р\text{іч}} = \frac{(1086,73 \cdot 1690,2 \cdot 0,6)}{1000} = 1102,07 \text{ МВт год.}$$

Конкретні числові розрахунки для перспективного схилу виконуються на основі отриманих у проекті значень $G_{річ}$ та прийнятих технічних параметрів СЕС. Вони демонструють, що навіть у межах одного кар'єру можливо сформувавши ділянку, де річний виробіток на 1 кВт встановленої потужності є конкурентоспроможним порівняно з традиційними рівнинними майданчиками, а використання уже порушених земель зменшує конфлікти щодо землекористування.

Обговорення результатів

Отримані результати узгоджуються з висновками міжнародних досліджень щодо потенціалу відпрацьованих гірничих територій для розміщення СЕС [1–2, 11, 12]. Однак запропонований підхід має низку особливостей та переваг:

1. Фокус на схилах кар'єру, а не на плоских майданчиках. Більшість робіт, що стосуються шахт і відвалів, аналізують відносно пологі поверхні (відвали, тераси, рекультивовані майданчики). У даній роботі акцент зроблено саме на схилах, що вимагає більш тонкого урахування ухилів та експозицій.

2. Комплексний інтегральний індекс. На відміну від підходів, де ухил, експозиція та радіація враховуються окремо у багатокритеріальній схемі з вагами [4–7], використання інтегрального індексу у вигляді добутку трьох часткових індексів дозволяє автоматично відфільтровувати ділянки, де хоча б один критерій є неприйнятним (наприклад, тіньові північні схили). Це робить методику простою в реалізації та прозорою з точки зору інтерпретації.

3. Масштаб кар'єру і зв'язок із «проектом виробітки». Методика орієнтована на рівень одного кар'єру, що дозволяє безпосередньо пов'язувати результати з геометрією уступів та схилів. У перспективі це дає змогу враховувати вимоги до «енергетично придатної» форми кар'єру вже на стадії проектування розробки родовища.

4. Рекультиваційний аспект. Розміщення СЕС на відпрацьованих схилах може розглядатися як один зі сценаріїв техніко – екологічної рекультивції, який поєднує:

- стабілізацію схилів;
- мінімізацію пиловиділення та ерозійних процесів;

– створення довгострокового економічного використання території.

5. Регіональна новизна. Для Івано – Франківської області та загалом для України запропонований GIS – підхід до моделювання придатності схилів відпрацьованого кар'єру з урахуванням інсоляції, ухилу та експозиції є, за результатами аналізу літератури, першим реалізованим прикладом на рівні конкретного об'єкта [1, 2, 3].

Серед обмежень методики слід відзначити:

- залежність точності результатів від якості ЦМР та параметрів моделі сонячної радіації;
- не враховані в даній роботі геотехнічні та гідрогеологічні фактори стійкості схилів;
- необхідність інтеграції економічних та мережевих критеріїв (близькість до ліній електропередач, вартість підключення) для повноцінної оцінки інвестиційної привабливості майданчика.

Висновки

1. Розроблено та апробовано GIS – методику оцінювання придатності схилів відпрацьованого вапнякового кар'єру у с. Довге для розміщення наземної сонячної електростанції, яка комплексно враховує ухил, експозицію та сумарну річну сонячну радіацію.

2. На основі класифікації кожного з трьох параметрів за чотирма рівнями (поза розрахунком, помірно придатні, придатні, найбільш придатні) та формування інтегрального індексу придатності у вигляді добутку часткових індексів побудовано карту інтегральної придатності схилів кар'єру.

3. Додаткова фільтрація за площею полігонів дозволила відсіяти дрібні ділянки та виділити перспективну ділянку площею близько 1,7 га, який має найсприятливіше поєднання ухилу, експозиції та інсоляції для розміщення СЕС.

4. Проведені розрахунки показують, що на виділеному схилі можливо розмістити СЕС зі значним річним виробітком електроенергії та питомими показниками, співставними з показниками наземних станцій на рівнинних територіях, при цьому використовуючи вже порушені гірничими роботами землі.

5. Запропонована методика може бути інтегрована у завершальні розділи проектів розробки та рекультивції відпрацьованих кар'єрів як інструмент формування «енергетично придатної» гео-

метрії схилів. Це дозволяє ще на етапі планування гірничих робіт враховувати майбутнє використання території під СЕС.

6. Для території Івано – Франківської області та, ширше, Українських Карпат дана робота є першим прикладом комплексного GIS – моделювання придатності схилів відпрацьованого кар’єру з урахуванням інсоляції, ухилу та експозиції, що відкриває можливості для поширення підходу на інші кар’єри регіону.

Перспективи подальших досліджень пов’язані з:

- розширенням методики на групу кар’єрів області з метою формування карти потенційних майданчиків СЕС;

- інтеграцією геотехнічних, гідрогеологічних та економічних критеріїв у єдину систему багатокритеріального аналізу;

- детальним порівнянням різних варіантів геометрії кар’єру на стадії проектування з погляду їхньої подальшої придатності для розміщення СЕС;

- аналізом впливу різних сценаріїв зміни клімату на довгостроковий сонячний ресурс у регіоні.

Список використаної літератури

1. He, T., Chen, Y., Zhao, Y., Li, F., Xu, N., Ren, H. Harnessing the solar photovoltaic potential in global mining areas: Energy locations for the future. *Innovation*, 2025, 6(10), 100987. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2025.100987>.

2. Choi, Y., Song, J. Assessment of Photovoltaic Potentials at Abandoned Mine Reclamation Sites in Korea Using Renewable Energy Resource Maps. *New & Renewable Energy*, 2016, 12(49 – 2), 44 – 52.

3. Редько, А.І., Адаменко, Я.О. Рекультивация відпрацьованих кар’єрів під розміщення сонячних електростанцій. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2025, 35(4), 79–88. (англ. назва: *Reclamation of exhausted quarries for solar power plant placement*). DOI: <https://doi.org/10.36930/40350409>.

4. Shi, F., Li, X., Li, M., Bai, B. Site selection strategy for photovoltaic power plants construction on gangue hills: An integrated method based on

GIS and AHP – TOPSIS. *Energy Strategy Reviews*, 2025, 59, 101722. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101722>.

5. Almasad, A., Pavlak, G., Alquthami, T., Kumara, S. Site suitability analysis for implementing solar PV power plants using GIS and fuzzy MCDM based approach. *Solar Energy*, 2023, 249, 642 – 650. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.11.046>.

6. Yilmaz, İ., Koçer, A., Aksoy, E. Site selection for solar power plants using GIS and fuzzy analytic hierarchy process: Case study of the western Mediterranean region of Türkiye. *Renewable Energy*, 2024, 237, 121799. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121799>.

7. de Luis – Ruiz, J.M., Salas – Menocal, B.R., Pereda – García, R., et al. Optimal Location of Solar Photovoltaic Plants Using Geographic Information Systems and Multi – Criteria Analysis. *Sustainability*, 2024, 16(7), 2895. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16072895>.

8. Choi, Y. GIS – based solar radiation mapping, site evaluation, and potential estimation of rooftop solar photovoltaic systems: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 104, 165 – 177 DOI: <https://doi.org/10.3390/app9091960>.

9. Hofierka, J., Šúri, M. The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications. In: *Proceedings of the Open Source GIS – GRASS Users Conference*, Trento, Italy, 11 – 13 September 2002.

10. Hofierka, J., Huld, T., Cebecauer, T., Šúri, M. Open source solar radiation tools for environmental and renewable energy applications. *EU JRC Conference Proceedings*, 2008. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC43644>

11. Song, J., Choi, Y., Yoon, S. – H. Analysis of photovoltaic potential at abandoned mine promotion districts in Korea. *Geosystem Engineering*, 2015, 18(3), 168 – 172. DOI: <https://doi.org/10.1080/12269328.2015.1023469>.

12. Li, X., Gu, Q., Wang, Q., et al. Renewable energy in the mining industry: Status, opportunities and challenges. *Energy Strategy Reviews*, 2024, 52, 101597. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101597>.

ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРФОРАЦІЇ СВЕРДЛОВИН: ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ

Грицуляк Г. М., Качала С. В., Шиманський В. Я.,
Фомічова О. В., Калин Т. І.

Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу

У статті розглянуто екологічні та технологічні аспекти підвищення ефективності перфорації нафтових і газових свердловин. Проведено порівняльний аналіз традиційної кумулятивної перфорації, кумулятивної перфорації з низькоенергетичними вибуховими речовинами та гідроабразивної перфорації з позицій їх впливу на фільтраційні властивості привибійної зони пласта і рівень техногенного навантаження на довкілля. Експериментальні дослідження виконано на зразках керну пісковика в умовах, наближених до пластових, із визначенням зміни проникності та значень skin-фактора. Оцінено склад продуктів перфорації та вміст потенційно небезпечних компонентів у промивних рідинах і газовій фазі. Встановлено, що традиційна кумулятивна

перфорація спричиняє найбільше пошкодження колекторських порід і характеризується підвищеним екологічним ризиком. Застосування низькоенергетичних вибухових речовин дає змогу частково зменшити негативний вплив, проте не усуває його повністю. Найменше зниження проникності та мінімальні значення skin-фактора зафіксовано при гідроабразивній перфорації, що свідчить про її технологічну доцільність і екологічну безпечність. Обґрунтовано перспективність впровадження безвибухових і малоенергетичних методів перфорації як складової екологічно орієнтованого нафтогазовидобутку

Ключові слова: перфорація свердловин, екологічна безпека, техногенне навантаження, нафтогазовидобування, екологічні аспекти.

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF WELL PERFORATION: ENVIRONMENTAL ASPECTS

Hrytsulyak G. M., Kachala S. V., Shymanskyi V. Y.,
Fomichova O. V., Kalyn T. I.
Ivano-Frankivsk National Technical
University of Oil and Gas

The article considers ecological and technological aspects of increasing the efficiency of perforation of oil and gas wells. A comparative analysis of traditional cumulative perforation, cumulative perforation with low-energy explosives and hydroabrasive perforation was carried out in terms of their influence on the filtration properties of the near-hole zone of the formation and the level of man-made load on the environment. Experimental studies were performed on sandstone core samples in conditions close to reservoir conditions, with determination of changes in permeability and skin factor values. The composition of the perforation products and the content of potentially dangerous components in the washing fluids and the gas phase were evaluated. It has been established that traditional cumulative perforation causes the greatest damage to reservoir rocks and is characterized by increased environmental risk. The use of low-energy explosives makes it possible to partially reduce the negative impact, but does not completely eliminate it. The smallest decrease in permeability and the minimum values of the skin factor were recorded with hydroabrasive perforation, which indicates its technological expediency and environmental safety. The perspective of introducing explosion-free and low-energy perforation methods as a component of ecologically oriented oil and gas production is substantiated.

Keywords: well perforation, environmental safety, man-made load, oil and gas production, environmental aspects.

Постановка проблеми

Підвищення ефективності розкриття продуктивних пластів є однією з ключових умов

інтенсифікації видобутку вуглеводнів. Традиційні методи кумулятивної перфорації, широко застосовувані на нафтових і газових свердловинах, часто супроводжуються суттєвим пошкодженням привибійної зони пласта, зниженням його фільтраційних властивостей та утворенням продуктів вибуху, що можуть містити токсичні й екологічно небезпечні компоненти. Це призводить не лише до зменшення дебіту свердловин, а й до зростання техногенного навантаження на геологічне середовище та ризиків вторинного забруднення підземних вод. У зв'язку з посиленням вимог до екологічної безпеки видобувних технологій актуалізується потреба у впровадженні альтернативних способів перфорації, зокрема малоенергетичних і безвибухових, які забезпечували б ефективне розкриття пласта за мінімального негативного впливу на його структуру та довкілля. Проте на сьогодні відсутня достатньо обґрунтована порівняльна оцінка традиційних і альтернативних методів перфорації з позицій одночасно технологічної ефективності та екологічної безпеки, що й зумовлює необхідність проведення відповідних досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасних наукових дослідженнях значна увага приділяється проблемі ефективного та екологічно безпечного розкриття продуктивних пластів нафтових і газових свердловин. Традиційна кумулятивна перфорація залишається найбільш поширеним методом, проте численні публікації вказують на її суттєві недоліки, пов'язані з пошкодженням привибійної зони пласта.

Унаслідок дії високих температур і тисків формується зона дроблення породи (*crushed zone*), що супроводжується зниженням пористості та проникності, а також зростанням гідродинамічного опору фільтрації. Це проявляється у збільшенні *skin*-фактора та зменшенні дебіту свердловини [1, 4, 6].

Ряд авторів доводять, що геометрія перфораційних каналів (довжина, діаметр, орієнтація) суттєво впливає на фільтраційні характеристики системи «свердловина – пласт». У сучасних роботах широко застосовуються чисельні методи моделювання (CFD-моделювання, метод скінченних елементів) для оцінки розподілу напружень, характеру руйнування породи та розвитку зони пошкодження. Отримані результати підтверджують, що при традиційній вибуховій перфорації зона зниженої проникності може поширюватися на кілька сантиметрів від стінки каналу, що є критичним для низькопроникних колекторів [2, 7].

У зв'язку з цим у наукових публікаціях останніх років простежується тенденція до розвитку альтернативних, малоенергетичних та безвибухових методів перфорації. Зокрема, значну увагу приділено гідроабразивній та абразивно-струменевої перфорації, які базуються на дії високошвидкісного потоку рідини з твердими частинками. Перевагою таких методів є можливість формування щілинних або орієнтованих каналів заданої конфігурації без термічного ушкодження породи. Дослідження показують, що при цьому суттєво зменшується зона механічного ущільнення та зберігається природна структура порового простору пласта [3, 5].

Окремим напрямом досліджень є вдосконалення конструкцій перфораційних пристроїв і оптимізація режимів роботи гідроабразивних систем. У публікаціях розглядаються питання зношування сопел, стабільності подачі абразиву, впливу тиску та швидкості струменя на глибину проникнення в породу. Автори наголошують, що правильний вибір режимів перфорації дозволяє не лише підвищити продуктивність свердловини, а й знизити енерговитрати та кількість технологічних відходів.

Поряд із техніко-технологічними аспектами дедалі більшої актуальності набувають екологічні дослідження. У працях, присвячених аналізу наслідків застосування вибухових речовин у на-

фтовидобувній галузі, зазначається, що продукти детонації можуть містити токсичні сполуки та важкі метали, які потенційно потрапляють у промивальні рідини та пластові флюїди. Це створює ризик забруднення ґрунтів і підземних вод, особливо за умов порушення герметичності обсадних колон або неправильного поводження з відходами буріння [3, 6].

У сучасних дослідженнях також розглядаються питання утилізації та очищення технологічних рідин після перфорації, зокрема методи фізико-хімічного та біотехнологічного очищення від іонів металів і токсичних компонентів. Показано, що поєднання інженерних і природоохоронних підходів дозволяє суттєво знизити антропогенне навантаження на навколишнє середовище [9].

Таким чином, аналіз останніх наукових публікацій свідчить про перехід від суто технічного підходу до комплексного розгляду процесів перфорації, який поєднує підвищення нафтовилучення з мінімізацією екологічних ризиків. Актуальними залишаються дослідження, спрямовані на вдосконалення безвибухових методів розкриття пластів, зменшення зони пошкодження колектора та розробку екологічно безпечних технологій ведення перфораційних робіт.

Визначення цілей статті (постановка завдання)

Метою статті є порівняльна оцінка ефективності та екологічної безпеки різних методів перфорації свердловин (традиційної кумулятивної, кумулятивної з низькоенергетичними вибуховими речовинами та гідроабразивної) з позицій їх впливу на фільтраційні властивості привибійної зони пласта та рівень техногенного навантаження на довкілля. Для досягнення поставленої мети передбачено експериментально дослідити зміну проникності колекторських порід після застосування різних методів перфорації, визначити величину *skin*-фактора як показника ступеня пошкодження привибійної зони пласта, проаналізувати склад продуктів перфорації та оцінити вміст потенційно небезпечних компонентів у промивних рідинах і газовій фазі, а також здійснити порівняльний аналіз технологічної та екологічної ефективності досліджуваних методів і обґрунтувати доцільність використання альтер-

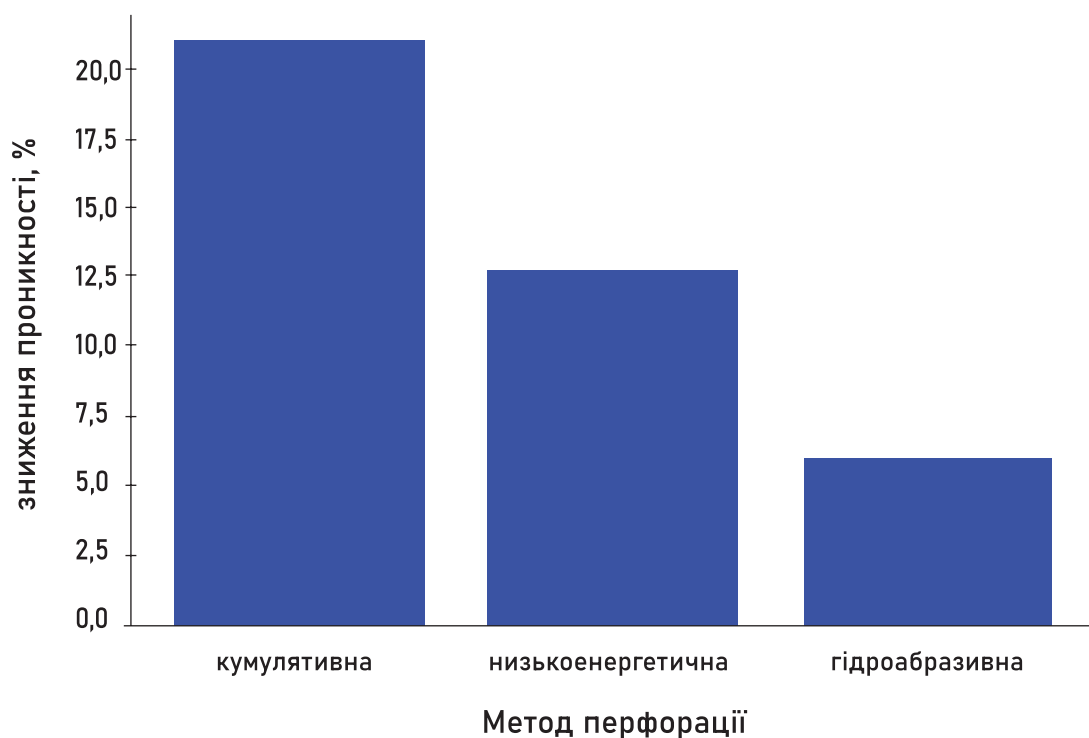


Рисунок 1. Порівняння ефективності різних методів перфорації свердловин

нативних безвибухових або малоенергетичних технологій перфорації свердловин.

Виклад основного матеріалу дослідження. Об'єктом дослідження є модельна вертикальна свердловина, пробурена у теригенних відкладах із середньою проникністю пласта 0,15–0,25 мкм². Для проведення експериментів використовувалися керни пісковика, відібрані з глибини 1800–2000 м, що відповідають умовам нафтового родовища.

Дослідження проводилися в лабораторних умовах із використанням стендової установки, що імітує пластові тиск (20–25 МПа) та температуру (60–80°C).

Для порівняння були застосовані три методи перфорації:

- традиційна кумулятивна перфорація;
- кумулятивна перфорація з низькоенергетичними вибуховими речовинами;
- гідроабразивна перфорація.

На кожному зразку керна формували по 4 перфораційні канали з однаковою глибиною проникнення (30–40 мм). Після перфорації проводили фільтраційні випробування для визначення коефіцієнта проникності та коефіцієнта пошкодження привибійної зони пласта.

Для оцінки екологічних параметрів здійсню-

вали: аналіз складу продуктів вибуху та абразивного матеріалу; визначення вмісту важких металів у промивній рідині методом атомно-абсорбційної спектроскопії; газохроматографічний аналіз складу газів після перфорації.

На рис.1 наведено порівняння ефективності різних методів перфорації свердловин за показником зниження проникності пласта. По осі абсцис відкладено методи перфорації – кумулятивний, низькоенергетичний та гідроабразивний, а по осі ординат – відсоток зниження проникності після проведення перфораційних робіт. Аналіз отриманих даних показує, що найбільше зниження проникності спостерігається при застосуванні кумулятивної перфорації і становить близько 21 %, що свідчить про істотне пошкодження привибійної зони пласта. Низькоенергетична перфорація характеризується помірним впливом на колекторські властивості порід – зниження проникності складає приблизно 12–13%. Найменший негативний ефект зафіксовано при використанні гідроабразивної перфорації, для якої зниження проникності не перевищує 6 %. Таким чином, гідроабразивний метод є найбільш доцільним з точки зору збереження фільтраційних властивостей пласта та підвищення ефективності експлуатації свердловин, тоді як

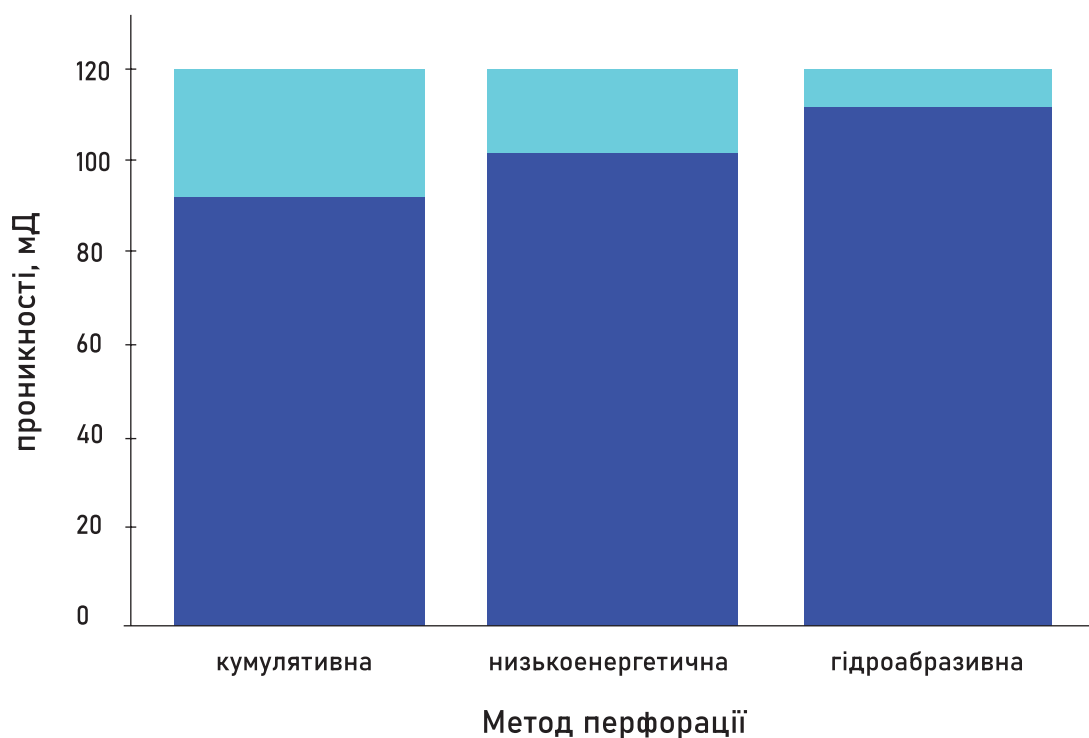


Рисунок 2. Порівняння початкової та післяперфораційної проникності пласта

традиційна кумулятивна перфорація характеризується найвищим рівнем техногенного впливу на привибійну зону.

На рис. 2 відображено порівняння початкової та післяперфораційної проникності пласта для різних методів перфорації свердловин. По осі абсцис наведено методи перфорації – кумулятивний, низькоенергетичний та гідроабразивний, а по осі ординат – значення проникності в мілідарсі (мД). Аналіз результатів показує, що для всіх досліджуваних методів початкова проникність пласта становить однакову величину, тоді як після виконання перфорації спостерігається її зменшення, ступінь якого залежить від застосованої технології. Найбільше зниження проникності зафіксовано при кумулятивній перфорації, що свідчить про суттєве пошкодження привибійної зони пласта. Для низькоенергетичної перфорації зменшення проникності є менш вираженим, що вказує на більш щадний вплив на структуру порового простору порід. Найменша різниця між початковою та післяперфораційною проникністю спостерігається при гідроабразивній перфорації, що підтверджує її переваги з точки зору збереження фільтраційних властивостей пласта. Отримані результати свідчать про доцільність

використання безвибухових або малоенергетичних методів перфорації з метою підвищення ефективності розкриття продуктивного горизонту та зменшення техногенного впливу на колекторські породи.

На рис. 3 представлено залежність значення skin-фактора від методу перфорації свердловини. По осі абсцис відкладено методи перфорації – кумулятивний, низькоенергетичний та гідроабразивний, а по осі ординат – величину skin-фактора, який характеризує додатковий гідродинамічний опір у привибійній зоні пласта. Аналіз графіка показує, що найбільше значення skin-фактора спостерігається при застосуванні кумулятивної перфорації, що свідчить про істотне пошкодження привибійної зони та погіршення фільтраційних властивостей пласта. Для низькоенергетичної перфорації значення skin-фактора є меншим, що вказує на зниження ступеня техногенного впливу на пласт порівняно з традиційним кумулятивним методом. Найменше значення skin-фактора зафіксовано при використанні гідроабразивної перфорації, що підтверджує її переваги як найбільш щадного способу розкриття продуктивного горизонту. Отримані результати свідчать про доцільність впровадження

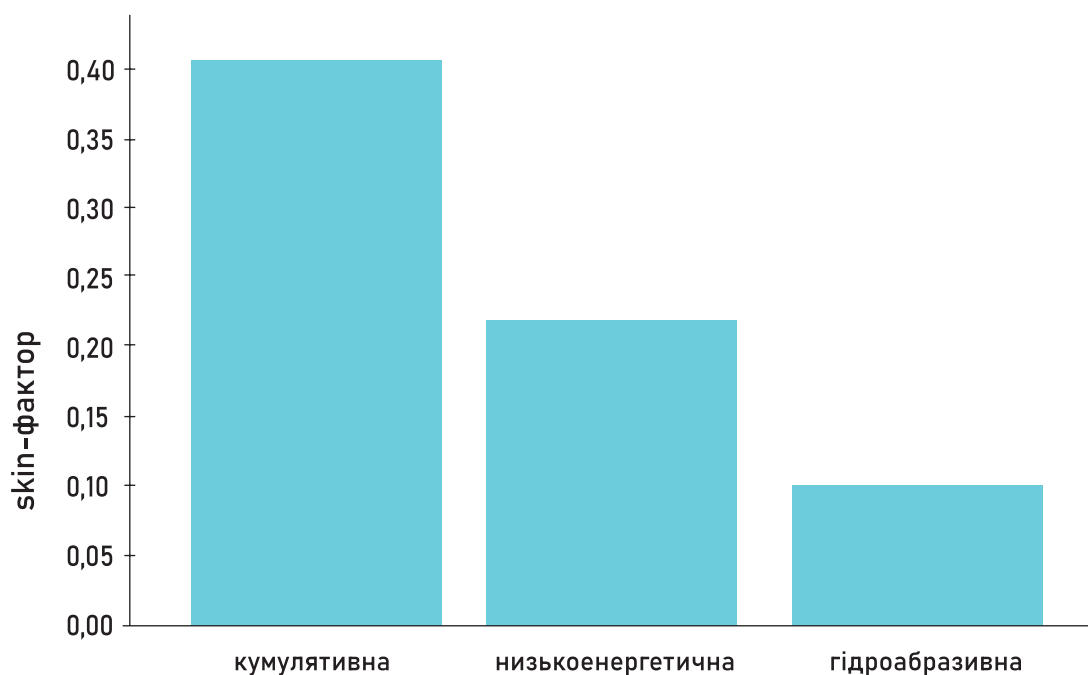


Рисунок 3. Залежність значення skin-фактора від методу перфорації

альтернативних безвибухових технологій перфорації з метою зменшення гідродинамічного опору, збереження колекторських властивостей порід та підвищення ефективності експлуатації свердловин.

Отримані результати свідчать про доцільність застосування альтернативних методів перфорації з метою підвищення як технологічної, так і екологічної ефективності розкриття пласта. Зменшення обсягів вторинного забруднення та збереження фільтраційних властивостей порід сприяє підвищенню дебіту свердловин і зниженню ризиків негативного впливу на підземні водонасінні горизонти.

Особливо перспективною є гідроабразивна перфорація, яка дозволяє уникнути застосування вибухових речовин і зменшити утворення токсичних продуктів, що відповідає принципам екологічно орієнтованого видобутку вуглеводнів.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У результаті проведених досліджень встановлено, що вибір методу перфорації суттєво впливає як на фільтраційні властивості привибійної зони пласта, так і на рівень техногенного навантаження на довкілля. Традиційна кумулятивна перфорація характеризується найбільшим ступенем пошкодження колекторських порід, що проявляється у значному зниженні проникності

та зростанні skin-фактора, а також утворенні продуктів вибуху, потенційно небезпечних для геологічного середовища. Застосування низькоенергетичних вибухових речовин дає змогу зменшити негативний вплив на структуру пласта та знизити інтенсивність вторинного забруднення, проте не усуває повністю екологічні ризики, пов'язані з використанням вибухових технологій.

Найбільш екологічно доцільним та технологічно ефективним виявився гідроабразивний метод перфорації, який забезпечує мінімальне погіршення проникності пласта, найменші значення skin-фактора та відсутність токсичних продуктів вибуху. Це дозволяє розглядати його як перспективний напрям удосконалення технологій розкриття продуктивних горизонтів у контексті концепції екологічно орієнтованого видобутку вуглеводнів.

Перспективи подальших досліджень доцільно пов'язати з розширенням експериментальної бази шляхом випробування різних типів колекторських порід і варіації термобаричних умов, наближених до реальних пластових. Особливої уваги потребує вивчення довготривалого впливу альтернативних методів перфорації на стабільність фільтраційних властивостей пласта в процесі експлуатації свердловин, а також оцінка міграції продуктів перфорації у водонасінні горизонти.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розроблення комплексних критеріїв вибору технології перфорації з урахуванням одночасно техніко-економічних та екологічних показників, що сприятиме підвищенню ефективності та безпечності нафтогазовидобутку

Список використаної літератури

1. Качмар Ю. Д., Світлицький В. М., Синюк Б. Б., Яремійчук Р. С. Інтенсифікація припливу вуглеводів у свердловину: Наукове видання. Кн.І. Львів: Центр Європи. 2004. 352 с.
2. Качмар Ю. Д., Світлицький В. М., Синюк Б. Б., Яремійчук Р. С. Інтенсифікація припливу вуглеводів у свердловину. Наукове видання. Кн.ІІ. Львів: Центр Європи, 2005. 414 с.
3. Качмар Д. Ю., Бурмич Ф. М., Андрусак А. М., Цьомко В. В. Аналіз застосування потужних гідророзривів у глибоких свердловинах України. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2002. №1. С. 17-21.
4. Качмар Ю. Д., Меркуров А. Б., Бурмич Ф. М., Савка В. М. Застосування потужних гідравлічних розривів пласта на родовищах України. Нафтова та газова промисловість. 1999. №4. С. 28-31.
5. Nolte K. G., Smith M. B. Interpretation of Fracturing Pressures. SPE 8297, J. Petr. Tech. September 1981. Vol. 33. 1767-1775.
6. Economides. M. J., Nolte K. G. Reservoir Stimulation. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, March 1989. 430 p.
7. Качмар Ю. Д., Цьомко В. В. Методика комплексного проектування гідророзриву пласта. Нафтова та газова промисловість. 2005. № 4. С. 12-15.
8. Спосіб гідроструминної перфорації свердловин: пат. на корисну модель № 150245, Україна. / Погребняк В. Г., Перкун І. В., Погребняк А. В., Шиманський В. Я. // опубл. 19.01.2022.
9. Водополімерний спосіб різання заморожених харчових продуктів та матеріалів: пат. на корисну модель №74609, Україна./ Погребняк А. В., Наумчук М.В.// опубл. 12.11.2012 р.

УДК 504.054

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202508-013>

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ВПЛИВУ АВТОТРАНСПОРТУ НА СТАН АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ М. ІВАНО-ФРАНКІВСЬК

Грицуляк Г. М., Коцюбинський А. О., Линник Д. О.,
Качала С. В., Фомічова О. В., Лопушняк В. І.
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу

У статті здійснено комплексну оцінку впливу автотранспорту на стан атмосферного повітря міста Івано-Франківськ на основі аналізу інтенсивності транспортних потоків та експериментальних вимірювань концентрацій основних забруднюючих речовин. Дослідження проведено на основних міських магістралях із різним рівнем транспортного навантаження. Визначено концентрації оксиду вуглецю (CO), діоксиду азоту (NO₂) та завислих речовин (PM) у приземному шарі атмосфери. Встановлено пряму залежність між інтенсивністю руху автотранспорту та рівнем забруднення повітря, що підтверджено результатами кореляційного аналізу. Найвищі концентрації забруднюючих речовин зафіксовано на вулицях

із найбільшим транспортним навантаженням, зокрема в центральній частині міста. Порівняння отриманих результатів із гранично допустимими концентраціями свідчить про наближення рівнів окремих забруднювачів до нормативних значень у години пік. Отримані результати можуть бути використані для розроблення заходів щодо зменшення негативного впливу автотранспорту на якість атмосферного повітря, оптимізації транспортних потоків та підвищення екологічної безпеки міського середовища.

Ключові слова: забруднення, атмосферне повітря, завислі речовини, урбанізоване середовище, екологічна оцінка, моніторинг довкілля, захист навколишнього середовища.

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF THE IMPACT OF ROAD TRANSPORT ON THE ATMOSPHERIC AIR CONDITION OF IVANO-FRANKIVSK

Hrytsulyak G. M., Kotsyubynsky A. O., Lynnyk D. O.,
Kachala S. V., Fomichova O. V., Lopushniak V. I.
Ivano-Frankivsk National Technical
University of Oil and Gas

In the article, a comprehensive assessment of the impact of motor vehicles on the state of atmospheric air in the city of Ivano-Frankivsk is carried out based on the analysis of the intensity of traffic flows and experimental measurements of the concentrations of the main pollutants. The study was conducted on the main city highways with different levels of traffic load. Concentrations of carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂) and suspended matter (PM) in the surface layer of the atmosphere were determined. A direct relationship between the intensity of traffic and the level of air pollution was established, which was confirmed by the results of the correlation analysis. The highest concentrations of pollutants were recorded on the streets with the greatest traffic load, in particular in the central part of the city. A comparison of the obtained results with the maximum permissible concentrations shows that the levels of individual pollutants are approaching the normative values during peak hours. The obtained results can be used to develop measures to reduce the negative impact of motor vehicles on atmospheric air quality, optimize traffic flows and improve the environmental safety of the urban environment.

Keywords: pollution, atmospheric air, suspended substances, urban environment, ecological assessment, environmental monitoring, environmental protection.

Постановка проблеми

Метою статті є комплексна оцінка впливу автотранспорту на стан атмосферного повітря в межах міста Івано-Франківськ на основі експериментальних вимірювань концентрацій основних

забруднюючих речовин та аналізу інтенсивності транспортних потоків.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено розв'язання таких основних завдань:

- проаналізувати структуру та інтенсивність автотранспортного руху на основних магістралях міста;
- визначити рівні концентрацій оксиду вуглецю (CO), діоксиду азоту (NO₂) та завислих речовин (PM) у приземному шарі атмосфери на вибраних ділянках;
- встановити залежність між інтенсивністю транспортних потоків і рівнем забруднення атмосферного повітря;
- здійснити порівняння отриманих результатів із гранично допустимими концентраціями забруднюючих речовин;
- обґрунтувати практичні рекомендації щодо зменшення негативного впливу автотранспорту на якість атмосферного повітря в умовах урбанізованого середовища.

Отримані результати мають науково-практичне значення для оцінювання екологічного стану міських територій та можуть бути використані при розробленні заходів з оптимізації транспортних потоків і покращення якості повітряного середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Атмосферне повітря є важливою складовою природного середовища та життєвого простору людини.

В умовах інтенсивної урбанізації, розвитку промисловості й транспорту його якість зазнає

значного антропогенного навантаження, особливо у великих містах [1, 6].

Основними джерелами забруднення атмосферного повітря в урбанізованих зонах є стаціонарні, пересувні та природні. До стаціонарних належать промислові підприємства, теплоелектростанції, котельні та об'єкти житлово-комунального господарства, що викидають у повітря діоксид сірки (SO_2), оксиди азоту (NO_x), вуглекислий газ (CO_2), пил і важкі метали. Ці речовини негативно впливають на здоров'я населення та стан екосистем [3].

Провідну роль серед пересувних джерел відіграє автомобільний транспорт. У процесі роботи двигунів внутрішнього згоряння утворюються чадний газ (CO), оксиди азоту (NO_x), леткі органічні сполуки (ЛОС), тверді частинки $\text{PM}_{2.5}$ і PM_{10} та бензапірен.

Дрібнодисперсний пил здатний проникати глибоко в легені й кровоносну систему, спричиняючи запальні процеси, серцево-судинні та респіраторні захворювання. До пересувних джерел також належать залізничний, повітряний і водний транспорт, однак їхній внесок у міське забруднення є меншим [2, 4].

Окрему групу становлять природні джерела: пилові бурі, лісові пожежі, вулканічна активність і процеси розкладу органічних речовин. Їхній вплив у межах міст зазвичай має локальний або сезонний характер і поступається техногенним викидам.

В Україні у структурі міських викидів домінує автотранспорт, частка якого становить близько 64%. Це зумовлено високою інтенсивністю руху, зношеністю автопарку та недостатнім рівнем екологічних стандартів транспортних засобів. Особливо небезпечними є тверді частинки $\text{PM}_{2.5}$ та бензапірен, концентрації яких часто перевищують гранично допустимі значення у центральних районах міст [3, 8].

Негативний вплив автотранспорту посилюється природно-географічними чинниками. У містах, розташованих у низинах або долинах, за умов температурної інверсії забруднювальні речовини накопичуються у приземному шарі атмосфери, що сприяє утворенню смогу та зростанню рівня захворюваності населення.

Характер і обсяги викидів залежать від типу двигуна та якості пального. Дизельні двигуни

продукують більшу кількість оксидів азоту та дрібнодисперсного пилу, тоді як бензинові – переважно чадний газ і леткі органічні сполуки. Значна частина автомобілів в Україні не відповідає сучасним екологічним стандартам, що підвищує рівень техногенного навантаження.

Досвід країн Європейського Союзу свідчить про ефективність запровадження зон низьких викидів, розвитку електротранспорту та велосипедної інфраструктури. Такі заходи дозволяють суттєво зменшити концентрації оксидів азоту й твердих частинок у повітрі [4, 9].

Аналіз літературних джерел свідчить, що проблема впливу автотранспорту на стан атмосферного повітря та здоров'я населення є об'єктом міждисциплінарних досліджень у галузях екології, медицини, урбаністики та транспортного планування. У наукових працях і звітах міжнародних організацій, зокрема Всесвітньої організації охорони здоров'я, наголошується на тісному зв'язку між концентраціями дрібнодисперсних частинок $\text{PM}_{2.5}$, оксидів азоту та продуктів згоряння пального і зростанням рівня серцево-судинних, респіраторних та онкологічних захворювань. За даними ВООЗ, забруднення атмосферного повітря є одним із провідних факторів передчасної смертності у світі, що підкреслює соціально-економічну значущість досліджуваної проблеми. Водночас у працях Організації економічного співробітництва та розвитку показано, що економічні втрати від забруднення повітря можуть становити кілька відсотків ВВП, що зумовлює необхідність не лише екологічних, а й управлінських рішень у сфері транспорту та міського розвитку [7].

Значний масив літератури присвячений кількісній оцінці викидів автотранспорту. Провідним методичним джерелом у європейській практиці є керівництво ЕМЕР/ЕЕА Air Pollutant Emission Inventory Guidebook, у якому запропоновано уніфіковані підходи до розрахунку викидів залежно від типу транспортних засобів, виду пального, екологічного класу та режимів руху. На його основі створено програмний комплекс COPERT, який широко використовується для інвентаризації транспортних викидів у країнах Європейського Союзу.

Перевагою цих підходів є стандартизованість і можливість порівняння результатів між різними регіонами, однак їх точність значною мірою зале-

жить від якості вхідних даних щодо інтенсивності руху та структури автопарку [9, 11].

В українських наукових дослідженнях значна увага приділяється оцінці локального впливу транспортних потоків на якість повітря у межах міських територій. Роботи вітчизняних авторів базуються як на інструментальних вимірюваннях концентрацій забруднювальних речовин, так і на застосуванні математичних моделей поширення домішок у повітрі. Дослідження, виконані для магістральних вулиць і об'їзних доріг великих міст, засвідчують перевищення гранично допустимих концентрацій чадного газу та діоксиду азоту в години пікового навантаження. У працях українських науковців також обґрунтовується доцільність комплексного підходу, який враховує не лише газоподібні забруднювачі, а й тверді частинки, шумове та вібраційне навантаження.

У міжнародному науковому просторі значний внесок у дослідження впливу транспортного забруднення на здоров'я населення зроблено в межах масштабних епідеміологічних проєктів, зокрема європейських когортних досліджень. У роботах зарубіжних авторів доведено, що навіть відносно невеликі підвищення концентрацій PM_{2.5} та NO₂ асоціюються зі зростанням ризику ішемічної хвороби серця, інсультів та раку легень. Окрему увагу приділено ролі просторового чинника – віддаленості житла від основних транспортних магістралей, що підтверджує необхідність урахування екологічних параметрів у міському плануванні [10].

Методичну основу оцінювання якості атмосферного повітря становлять інструментальні, аналітико-розрахункові та комбіновані підходи. Інструментальні методи, що базуються на використанні стаціонарних постів моніторингу та мобільних лабораторій, забезпечують високу точність даних, однак характеризуються обмеженим просторовим охопленням і значними фінансовими витратами. Розрахункові методи, зокрема дисперсійні моделі AERMOD, CALPUFF та ADMS-Urban, дозволяють прогнозувати розподіл концентрацій забруднювачів у межах міської забудови з урахуванням метеорологічних і топографічних умов. Комбіновані підходи, що поєднують вимірювання з моделюванням, вважаються найбільш обґрунтованими з точки зору отримання достовірної картини забруднення повітря [8, 11].

Важливу роль у системі оцінювання якості повітря відіграють нормативні показники, насамперед гранично допустимі концентрації забруднювальних речовин, які використовуються як критерії екологічної безпеки. Поряд із ними широкого застосування набули інтегральні індекси, зокрема індекс якості повітря AQI та індекс забруднення атмосфери, що дозволяють у доступній формі інформувати населення про рівень ризику для здоров'я. У сучасних умовах ці інструменти активно використовуються в інформаційних системах моніторингу.

Аналіз джерел показує, що в Україні сформувалася багаторівнева система спостережень за станом атмосферного повітря, яка поєднує державні пости гідрометеорологічної служби та громадські ініціативи. Платформи типу EcoCity і SaveEcoBot забезпечують оперативний доступ до даних про концентрації основних забруднювачів, що сприяє підвищенню екологічної обізнаності населення. Водночас у літературі наголошується, що дані громадських сенсорів потребують калібрування та узгодження з офіційними вимірюваннями для коректного використання в наукових дослідженнях.

Отже, узагальнення наукових праць і методичних документів свідчить про достатній рівень опрацювання проблеми автотранспортного забруднення як у міжнародному, так і в національному контексті. Водночас залишаються актуальними питання інтеграції інструментальних і модельних методів, удосконалення систем моніторингу та адаптації європейських підходів до умов України. Це зумовлює доцільність подальших досліджень, спрямованих на комплексну оцінку впливу автотранспорту на якість атмосферного повітря та обґрунтування ефективних заходів зі зменшення його негативного впливу.

Визначення цілей статті (постановка завдання)

Метою статті є оцінка впливу автотранспорту на стан атмосферного повітря міста Івано-Франківськ на основі аналізу інтенсивності транспортних потоків та експериментальних даних щодо концентрацій основних забруднюючих речовин.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено розв'язання таких завдань:

- проаналізувати інтенсивність та структуру автотранспортного руху на основних магістралях міста;
- визначити концентрації оксиду вуглецю (CO), діоксиду азоту (NO₂) та завислих речовин (PM) у приземному шарі атмосфери;
- встановити залежність між рівнем транспортного навантаження та показниками забруднення атмосферного повітря;
- здійснити порівняння отриманих результатів із гранично допустимими концентраціями;
- обґрунтувати напрями зменшення негативно-го впливу автотранспорту на якість атмосферного повітря в умовах міського середовища.

Виклад основного матеріалу дослідження

З метою практичної оцінки впливу автотранспорту на стан атмосферного повітря було проведено експериментальне дослідження на території міста Івано-Франківськ.

Місто є типовим обласним центром із помірною площею забудови, високою щільністю населення в центральній частині та значним транспортним навантаженням у години пік, що робить його доцільним об'єктом для аналізу транспортного забруднення повітря.

Дослідження проводилося на основних транспортних магістралях міста, зокрема на вулицях Незалежності, Галицькій, Довгій, Коновальця та на площі Ринок, де спостерігається інтенсивний рух автомобільного транспорту.

Вибір локацій зумовлений високою щільністю транспортних потоків та наближеністю до житлової забудови.

У процесі дослідження визначалися концентрації основних автотранспортних забруднювачів атмосферного повітря, а саме:

- оксиду вуглецю (CO),
- діоксиду азоту (NO₂),
- завислих речовин (PM).

Паралельно здійснювався підрахунок кількості транспортних засобів на вибраних ділянках у години максимального навантаження (8:00–10:00 та 17:00–19:00). Транспортні засоби поділялися на легкові автомобілі, громадський транспорт та вантажні автомобілі.

Результати спостережень показали, що найбільша інтенсивність руху зафіксована на вулиці

Незалежності та в центральній частині міста. У середньому за годину тут проходить понад 1200–1500 транспортних засобів, з яких переважають легкові автомобілі.

Отримані експериментальні дані свідчать про наявність прямої залежності між інтенсивністю руху транспорту та концентраціями шкідливих речовин у повітрі. Так, у центральній частині міста середні значення концентрації оксиду вуглецю становили близько 1,1–1,3 мг/м³, діоксиду азоту – 0,06–0,09 мг/м³, а завислих речовин – 0,15–0,18 мг/м³. На ділянках із меншим транспортним навантаженням (житлові райони, паркова зона) відповідні показники були у 1,5–2 рази нижчими.

Порівняння отриманих результатів із гранично допустимими концентраціями (ГДК) показало, що в години пік концентрації діоксиду азоту та оксиду вуглецю наближаються до допустимих нормативів, що створює потенційну загрозу для здоров'я населення, особливо для людей із захворюваннями органів дихання та серцево-судинної системи.

Особливу увагу слід звернути на вплив зупинок громадського транспорту та перехресть зі світлофорами, де через часті розгони й гальмування автомобілів відбувається локальне накопичення забруднюючих речовин. У цих точках зафіксовано найвищі показники CO та NO₂.

Таким чином, експериментальне дослідження підтвердило, що автотранспорт є одним із основних джерел забруднення атмосферного повітря в місті Івано-Франківськ. Найбільш уразливими є центральні вулиці та райони з інтенсивним рухом транспорту.

Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування заходів щодо зменшення негативного впливу автотранспорту, зокрема шляхом оптимізації транспортних потоків, розвитку електротранспорту, створення пішохідних зон та збільшення площ зелених насаджень уздовж основних магістралей міста.

Згідно з даними таблиці 1, найбільша інтенсивність руху автотранспорту спостерігається на вул. Незалежності – 1320 од./год. Основну частку транспортного потоку становлять легкові автомобілі (1050 од./год), що свідчить про високу частку індивідуального автотранспорту в загальній структурі руху. Кількість громадського транспорту

Таблиця 1

Інтенсивність руху автотранспорту на дослідних ділянках м. Івано-Франківськ

Ділянка міста	Легкові авто, од./год	Громадський транспорт, од./год	Вантажний транспорт, од./год	Усього, од./год
вул. Незалежності	1050	180	90	1320
вул. Галицька	980	160	70	1210
вул. Коновальця	850	140	60	1050
вул. Довга	720	110	50	880
пл. Ринок	600	130	40	770

ту на цій ділянці становить 180 од./год, а вантажного – 90 од./год, що додатково підсилює антропогенне навантаження на атмосферне повітря.

Другою за рівнем транспортного навантаження є вул. Галицька, де загальна інтенсивність руху складає 1210 од./год. Тут також переважають легкові автомобілі (980 од./год), тоді як громадський транспорт становить 160 од./год, а вантажний – 70 од./год. Високі показники пояснюються тим, що дана вулиця є однією з основних транспортних артерій міста та забезпечує сполучення між центральною та периферійною частинами Івано-Франківська.

На вул. Коновальця загальна інтенсивність руху становить 1050 од./год, з яких 850 од./год припадає на легкові автомобілі, 140 од./год – на громадський транспорт і 60 од./год – на вантажні транспортні засоби. Отримані значення свідчать про помірно високий рівень транспортного навантаження, характерний для вулиць із житловою та комерційною забудовою.

Менші показники зафіксовано на вул. Довгій – 880 од./год. Частка легкових автомобілів тут складає 720 од./год, громадського транспорту – 110 од./год, вантажного – 50 од./год. Порівняно з центральними магістралями, дана ділянка характеризується меншою інтенсивністю руху, що зумовлює відносно нижче навантаження на атмосферне повітря.

Найменша інтенсивність руху спостерігається на пл. Ринок – 770 од./год. При цьому легкові автомобілі становлять 600 од./год, громадський транспорт – 130 од./год, а вантажний – 40 од./год. Зниження транспортного потоку на цій ділянці пояснюється обмеженням руху в історичній частині міста та наявністю пішохідних зон.

Загалом, аналіз таблиці 3. свідчить, що у структурі транспортного потоку на всіх досліджених ділянках переважають легкові автомобілі, частка яких становить понад 75–80 % від загальної кількості транспортних засобів. Це підтверджує домінуючу роль індивідуального автотранспорту

Таблиця 2

Середні концентрації забруднюючих речовин у повітрі м. Івано-Франківськ

Ділянка міста	CO, мг/м ³	NO ₂ , мг/м ³	Завислі речовини, мг/м ³
вул. Незалежності	1.30	0.09	0.18
вул. Галицька	1.20	0.08	0.17
вул. Коновальця	1.05	0.07	0.15
вул. Довга	0.85	0.06	0.13

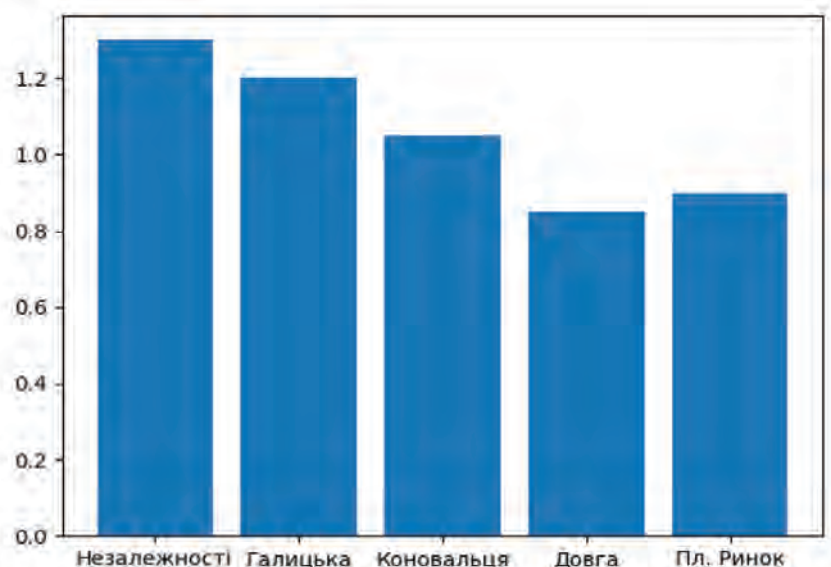


Рисунок 1. Концентрація оксиду вуглецю (CO), мг/м³

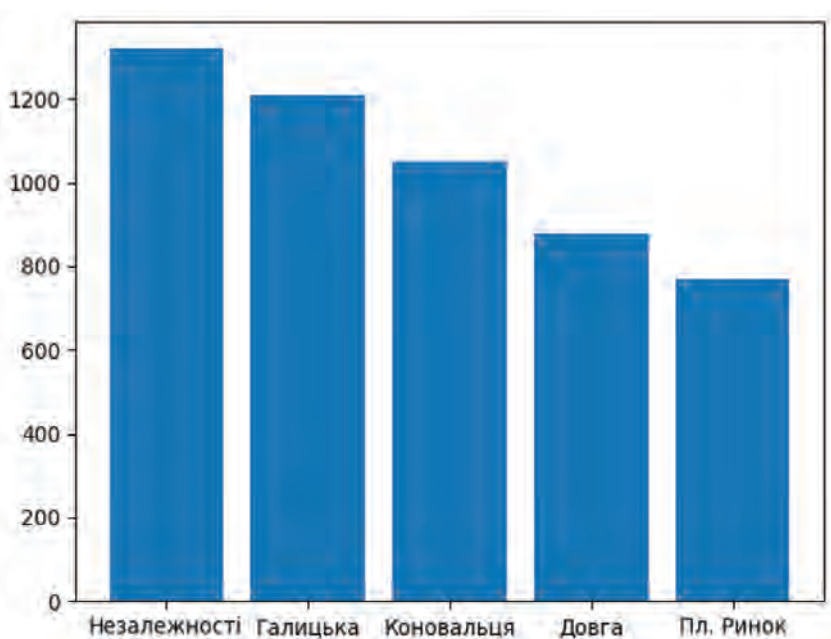


Рисунок 2. Інтенсивність руху транспорту, од./год

у формуванні транспортного навантаження та потенційного забруднення атмосферного повітря в місті Івано-Франківськ. Найбільш напруженими з еколог

Згідно з даними таблиці 2, середні концентрації основних забруднюючих речовин у повітрі м. Івано-Франківськ суттєво відрізняються залежно від інтенсивності автотранспортного руху на досліджених ділянках.

Найвищі концентрації всіх досліджуваних забруднювачів зафіксовано на вул. Незалежності,

де рівень оксиду вуглецю становить 1,30 мг/м³, діоксиду азоту – 0,09 мг/м³, а завислих речовин – 0,18 мг/м³.

Отримані значення зумовлені високою інтенсивністю транспортного потоку на цій вулиці, значною кількістю зупинок громадського транспорту та частими режимами розгону й гальмування транспортних засобів, що сприяє підвищеному утворенню вихлопних газів і пилових частинок.

Дещо нижчі, проте також підвищені показники спостерігаються на вул. Галицькій: концентра-

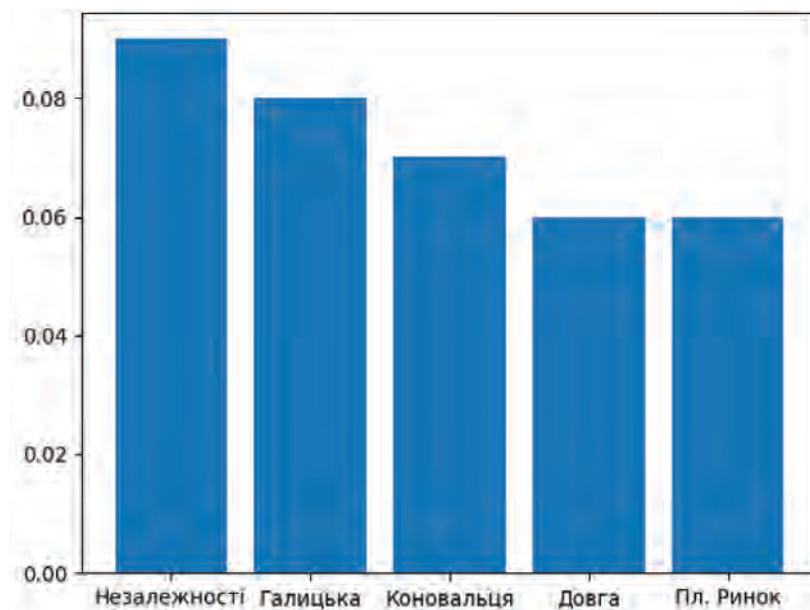


Рисунок 3. Концентрація діоксиду азоту (NO_2), мг/м^3 .
 між трафіком і CO: $r = 0,96$; між трафіком і NO_2 : $r = 0,94$; між трафіком і PM: $r = 0,92$

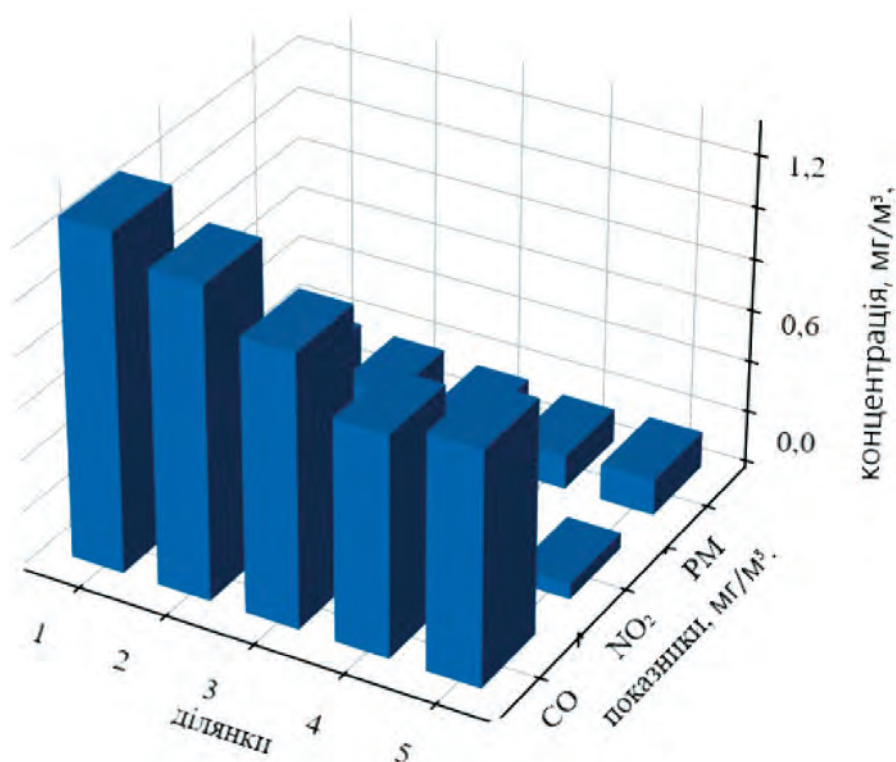


Рис.4. Кореляційний аналіз показав наявність тісного прямого зв'язку між інтенсивністю руху автотранспорту та рівнем забруднення атмосферного повітря.

Примітка: 1. вул. Незалежності.

2. вул. Галицька.

3. вул. Коновальця.

4. вул. Довга.

5. пл. Ринок

Таблиця 3

Порівняння з іншими містами

Місто	CO, мг/м ³	NO ₂ , мг/м ³	PM, мг/м ³
Івано-Франківськ	1.10	0.07	0.15
Львів	4.40	0.10	0.24
Київ	1.00	0.12	0.16
Полтава	4.00	0.08	0.20

ція CO становить 1,20 мг/м³, NO₂ – 0,08 мг/м³, а завислих речовин – 0,17 мг/м³. Це пояснюється тим, що дана вулиця є однією з основних транспортних магістралей міста та характеризується інтенсивним рухом автотранспорту протягом більшої частини доби.

На вул. Коновальця зафіксовано середній рівень забруднення: концентрація оксиду вуглецю становить 1,05 мг/м³, діоксиду азоту – 0,07 мг/м³, а завислих речовин – 0,15 мг/м³. Отримані значення свідчать про помірний вплив автотранспорту на стан атмосферного повітря, що характерно для вулиць із поєднанням житлової та ділової забудови.

Найменші концентрації забруднюючих речовин серед досліджених ділянок спостерігаються на вул. Довгій, де рівень CO становить 0,85 мг/м³, NO₂ – 0,06 мг/м³, а завислих речовин – 0,13 мг/м³. Це може бути зумовлено меншою інтенсивністю руху автотранспорту, більшою віддаленістю від центральної частини міста та наявністю зелених насаджень, які частково виконують бар'єрну та фільтрувальну функцію.

Загалом аналіз таблиці 3 свідчить про наявність прямої залежності між інтенсивністю автотранспортного руху та рівнем забруднення атмосферного повітря.

Найбільш забрудненими є центральні вулиці міста з високим транспортним навантаженням, тоді як у менш завантажених районах концентрації шкідливих речовин є нижчими.

Отримані результати підтверджують провідну роль автотранспорту у формуванні якості повітряного середовища в місті Івано-Франківськ та

обґрунтовують необхідність упровадження заходів зі зменшення викидів саме в зонах із найбільш інтенсивним рухом транспорту.

Так, коефіцієнт кореляції між трафіком і концентрацією оксиду вуглецю становить $r = 0,96$, між трафіком і діоксидом азоту – $r = 0,94$, а між трафіком і завислими речовинами – $r = 0,92$. Отримані значення свідчать про домінуючий вплив автотранспорту на формування якості атмосферного повітря в місті Івано-Франківськ.

З метою узагальнення отриманих результатів було проведено порівняльний аналіз середніх концентрацій основних забруднюючих речовин у місті Івано-Франківськ з відповідними показниками для інших великих міст України – Львова, Києва та Полтави (табл. 3).

Згідно з наведеними даними, у місті Івано-Франківськ середня концентрація оксиду вуглецю (CO) становить 1,10 мг/м³, що є нижчим показником порівняно з Львовом (4,40 мг/м³) та Полтавою (4,00 мг/м³), але дещо вищим, ніж у Києві (1,00 мг/м³). Це свідчить про помірний рівень забруднення повітря чадним газом у досліджуваному місті.

Концентрація діоксиду азоту (NO₂) в Івано-Франківську становить 0,07 мг/м³, що є нижчим показником порівняно з Києвом (0,12 мг/м³) та Львовом (0,10 мг/м³), і дещо меншим, ніж у Полтаві (0,08 мг/м³). Отримані дані вказують на відносно сприятливі умови щодо забруднення повітря оксидами азоту в Івано-Франківську порівняно з більш індустріалізованими та транспортно навантаженими містами.

Що стосується завислих речовин (РМ), то їх середня концентрація в Івано-Франківську становить $0,15 \text{ мг/м}^3$, що є нижчим значенням порівняно з Львовом ($0,24 \text{ мг/м}^3$) та Полтавою ($0,20 \text{ мг/м}^3$), але дещо поступається показнику Києва ($0,16 \text{ мг/м}^3$).

Це може бути пов'язано з меншою щільністю транспортних потоків і відсутністю потужних промислових підприємств у межах міста.

Загалом порівняльний аналіз свідчить, що рівень забруднення атмосферного повітря в місті Івано-Франківськ є нижчим або співставним із показниками великих промислово-транспортних центрів України. Водночас наявність перевищень або наближення концентрацій окремих забруднюючих речовин до гранично допустимих значень підтверджує актуальність проблеми впливу автотранспорту на якість повітря та необхідність упровадження заходів зі зменшення викидів у міському середовищі.

Висновки та перспективи подальших досліджень

У результаті проведеного дослідження здійснено комплексну оцінку впливу автотранспорту на стан атмосферного повітря міста Івано-Франківськ на основі аналізу інтенсивності транспортних потоків і експериментальних вимірювань концентрацій основних забруднюючих речовин. Встановлено, що найбільш напружена екологічна ситуація формується на центральних вулицях міста з високою щільністю руху автотранспорту, зокрема на вулицях Незалежності та Галицькій.

Отримані результати свідчать про наявність прямої залежності між інтенсивністю транспортних потоків і рівнем забруднення атмосферного повітря. Найвищі концентрації оксиду вуглецю, діоксиду азоту та завислих речовин зафіксовано на ділянках із найбільшим транспортним навантаженням. Кореляційний аналіз підтвердив тісний зв'язок між показниками трафіку та концентраціями забруднювачів ($r = 0,92\text{--}0,96$), що вказує на домінуючу роль автотранспорту у формуванні якості повітряного середовища в межах міста.

Порівняння середніх концентрацій забруднюючих речовин у місті Івано-Франківськ із показниками інших великих міст України показало, що рівень забруднення є нижчим або співставним із

промислово навантаженими центрами, однак у години пікового транспортного навантаження концентрації окремих речовин наближаються до гранично допустимих значень. Це створює потенційні ризики для здоров'я населення, особливо для вразливих груп (дітей, осіб із захворюваннями органів дихання та серцево-судинної системи).

Отримані результати підтверджують доцільність упровадження комплексу заходів, спрямованих на зменшення негативного впливу автотранспорту на якість атмосферного повітря, зокрема оптимізації транспортних потоків, розвитку електротранспорту та громадського транспорту, створення зон обмеження руху в центральній частині міста, а також збільшення площ зелених насаджень уздовж основних магістралей.

Перспективи подальших досліджень доцільно спрямувати на розширення просторового та часового охоплення спостережень, з урахуванням сезонних і метеорологічних чинників, а також на детальніше вивчення дрібнодисперсних частинок $\text{PM}_{2.5}$ та органічних токсикантів, зокрема бенз(а)пірену. Актуальним є поєднання інструментальних вимірювань із математичним моделюванням поширення домішок у приземному шарі атмосфери для прогнозування змін якості повітря за різних сценаріїв транспортного розвитку.

Подальші дослідження також можуть бути спрямовані на оцінку впливу автотранспортного забруднення на показники здоров'я населення та інтеграцію результатів у систему міського екологічного моніторингу, що сприятиме формуванню науково обґрунтованих управлінських рішень у сфері сталого розвитку міських територій.

Список використаної літератури

1. Dr. David McKeown. Air pollution burden of illness from traffic in Toronto Dr. David McKeown. Toronto : Toronto Public Health, November 2007. 57.
2. Аболмасова Г.В. Елементи інтегрального підходу в екологічній оцінці стану забрудненості придорожнього простору. Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: зб. наук, статей XV міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 9 - 13 верес. 2019 р. УКРНДІЕП. ПП «Стиль-Іздат», 2019. С.5 - 8.
3. Lynnyk, D. O., & Hrytsuliak, G. M. (2023).

Analysis of the state of atmospheric air in the city of Ivano-Frankivsk. In 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Vol. 2023, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520140>

4. Резнюк А.М., Гутаревич Ю.Ф., Агєєв В.Б., Клименко О.А. Інтеграція України до ЕС у сфері захисту довкілля від шкідливих викидів автомобільного транспорту: задачі та перспективи. Автошляховик України. 2005, № 1. С. 375.

5. Стан і нові можливості соціально-економічного розвитку Дніпропетровської області : монографія / за заг. ред. О. Ю. Бобровської. – Дніпро : ДРІДУ НАДУ, 2019. – 276 с.

6. Статистичний збірник «Регіони України» за 2017 р. /Державна служба статистики України.

– Режим доступу: http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/publ2_u.htm

7. EU ban on the sale of new petrol and diesel cars from 2035 explained. Topics. European Parliament. 2024. URL: <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20221019STO44572/eu-ban-on-sale-of-new-petrol-anddiesel-cars-from-2035-explained>.

8. Discover More About E-Fuels... Sustain Classics. 28.02.2024. URL: <https://sustainclassic.com/sustainable-fuel/syntheticfuels/efuels/>

9. Карти якості повітря. SaveEcoBot. 2024. URL: <https://www.saveecobot.com/maps>

10. Станція моніторингу якості повітря. Еко-загроза. 2024. URL: https://ecozagroza.gov.ua/map?layer=air_pollution .

11. Карта моніторингу якості повітря Eco City. 2024. URL: <https://eco-city.org.ua/>

ОЦІНКА ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ ҐРУНТОВОЇ ТОВЩІ З НЕОДНОРІДНИМ РОЗПОДІЛОМ РАДІОНУКЛІДІВ ЗА ГЛИБИНОЮ

Попов О. О.¹, Кочелаб Є. В.¹, Пилипчук Є. В.¹, Сідельов А. В.¹, Толстой І. А.²

¹Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення
моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України,
03142, м. Київ, пр. Академіка Палладіна, 34а

²Державний університет «Житомирська політехніка»,
10005, Україна, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103

Радіоактивні матеріали вже давно стали невід'ємними супутниками розвитку людської цивілізації, що стимулює сталий інтерес до глибокого вивчення природи радіоактивності, широкого впровадження унікальних можливостей іонізуючого випромінювання та розробки методів захисту від небезпечних впливів радіації. Ці дослідження пов'язані із оцінкою гамма випромінювання ґрунтової товщі, яка характеризується неоднорідним розподілом джерел радіації. Як свідчать експериментальні результати, залежність радіоактивності від глибини не є сталою, а може описуватись унімодальною функцією. З математичної точки зору, це ускладнює побудову аналітичних залежностей у проблемах оцінки радіоактивності ґрунтів за допомогою детекторів, які розташовані над їх поверхнею. Тоді для розв'язання таких задач залучають наближені методи. Зокрема, у роботі пропонується викори-

стати підхід, який ґрунтується на апроксимації профілю розподілу потоку випромінювання з глибиною за допомогою ступінчатих функцій. Це дозволяє виразити кінцевий результат у формі скінченної лінійної комбінації значень узагальненої функції. Застосування такого підходу демонструється на прикладі експериментальних даних про розподіл.

Також у роботі здійснюється ретельний аналіз впливу заміни неперервної функції на її ступінчасту апроксиманту шляхом порівняння числових та аналітичних досліджень. Отримані у роботі результати можуть бути корисними для розробки обернених задач спектрометрії, удосконалення методів дистанційного моніторингу радіоактивних полів, тощо.

Ключові слова: радіоактивне забруднення, гамма випромінювання, гамма- спектрометрія, радіологічний контроль.

ASSESSMENT OF GAMMA RADIATION IN SOIL WITH HETEROGENEOUS DISTRIBUTION OF RADIONUCLIDES OVER DEPTH

Popov Oleksandr, Kochelab Yevheniia, Pylypchuk Ievhen,
Sidelov Andrii, Tolstoy Igor

Radioactive materials have long been an integral part of human civilization, stimulating ongoing interest in the in-depth study of the nature of radioactivity, the widespread implementation of the unique capabilities of ionizing radiation, and the development of methods to protect against the dangerous effects of radiation.

These studies are related to the assessment of gamma radiation in the soil layer, which is characterized by an inhomogeneous distribution of radiation sources.

As experimental results show, the dependence of radioactivity on depth is not constant and can be described by a unimodal function. From a mathematical point of view, this complicates the construction of analytical dependencies in problems of soil radioactivity assessment using detectors located above their surface. In such cases, approximate methods are used to solve these problems. In particular, these studies propose an approach based on approximating the radiation flux distribution profile with depth using step functions.

This allows the final result to be expressed as a finite linear combination of the values of the generalized function. The application of this approach is demonstrated using experimental distribution data. The research also provides a detailed analysis of the effect of replacing a continuous function with its stepwise approximation by comparing numerical and analytical studies. The results obtained in the research can be useful for solving inverse spectrometry problems, improvement of methods for remote monitoring of radioactive fields, etc.

Keywords: radioactive contamination, gamma radiation, gamma spectrometry, radiological monitoring.

Постановка проблеми

Радіоактивні матеріали знайшли своє широке застосування у медицині, енергетиці, військовій справі, пошуку мінеральних ресурсів, неруйнівної діагностики, організації заходів безпеки, тощо [1,2,3,7]. Однак разом з корисними застосуваннями таких матеріалів, ми стикаємось з проблемами захисту живих організмів від іонізуючого випромінювання.

Звичайно, невеликі та короткодійні дози радіації не спричиняють значної шкоди організмам, що дозволяє працювати із захищеними джерелами радіації.

Проблеми виникають, коли відбувається масштабне розповсюдження радіоактивних матеріалів на значній території, навіть не обов'язково сильно радіоактивних.

Прикладом таких ситуацій є аварії на атомних станціях Чорнобиля та Фукусіми, до зони забруднення яких прикута увага вчених всього світу з метою вивчення наслідків опромінення на навколишнє середовище. Уявлення про вплив Чорнобильської АЕС можна скласти за результатами робіт наприклад [3,4,5].

В умовах таких масштабних подій основна частина забруднюючих радіонуклідів потрапляє у ґрунти, де зберігається надзвичайно довго на відміну від повітря чи водних систем [6,15,16].

Тому ґрунти, їх стан забруднення та методи очищення є об'єктами багатьох теоретичних та прикладних досліджень, включно з гамма-спектроскопією [1,16,18,19].

Зокрема, нас цікавить оцінка гамма випромінювання забрудненого ґрунту, а саме теоретичний аспект побудови такої оцінки.

Актуальність дослідження

Отже, з огляду на небезпеку, яку становить радіаційне забруднення для екології довкілля та проживання великих груп людей поблизу радіаційно забруднених територій, вивчення теоретичних основ поширення потоків заряджених частинок та гамма-квантів є життєво необхідним завданням.

Зазначимо також, що розвиток сучасних методів аналізу даних за допомогою нейромереж та вдосконалення обчислювальних можливостей значно поглибили моніторинг радіоактивних об'єктів у всіх його аспектах. Все ж удосконалення опису простих випромінюючих об'єктів і поглибленого аналізу їх властивостей все ще залишається важливим, оскільки сприяє правильному розумінню фізики процесів, розвитку контролю і калібрування установки, формування теоретичних основ спектрометрії, а також ставить перед суміжними галузями науки нові завдання.

Як відомо [1,2,15], найпростіші моделі для опису інтенсивності поширення гамма квантів були розроблені для точкових джерел, найпростіших плоских поверхонь та симетричних тіл. До того ж розподіл джерел випромінювання приймався однорідним або апроксимувався зручними для аналізу функціями. Складні випадки зазвичай аналізувались числовими методами.

Мета роботи

Розробити аналітичний підхід до оцінки радіоактивності ґрунту з урахуванням неоднорідності розподілу джерел випромінювання з глибиною.

Виклад основного матеріалу

Відправною точкою для оцінки моноенергетичного нерозсіяного гамма-потoku, випромінюваного точковим джерелом, є відомий експоненційний закон для інтенсивності I гамма потоку [1,2,7,12]:

$$I = \frac{q}{4\pi r^2} \exp\left(-\int_0^r \mu(s) ds\right),$$

де q – активність джерела, r – відстань від джерела випромінювання до точки спостереження, μ – коефіцієнт затухання.

Інтегруючи співвідношення для точкового джерела в деякій просторовій області, можна оцінити гамма-поле, створене плоским джерелом. Наприклад, коли ми маємо справу з тонкою радіоактивною плівкою, то інтенсивність гамма-потoku I , оцінена на висоті h від неї (з урахуванням стратифікації середовища за коефіцієнтом ослаблення променів), обчислюється за таким співвідношенням:

$$I = \frac{q}{2} E_1\left(\sum_{i=1}^k h_i \mu_i\right), \quad (1)$$

де функція $E_1(x) = \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t} dt = \int_0^{\frac{e^{-x}}{x}} \frac{e^{-x/u}}{u} du$ є експоненціальним інтегралом першого роду; h_i – товщини паралельних шарів, що лежать над плівкою ($h = \sum_{i=1}^k h_i$); q – коефіцієнти ослаблення для шарів.

Дійсно, розглядаючи радіоактивну плівку (Рис.1) з поверхневою радіоактивністю q (Бк/м²), інтенсивність гамма-потoku I можна записати у такій формі

$$I = \int_0^d \frac{q}{4\pi r^2} \exp\left(-\sum_{i=1}^k r_i \mu_i\right) dS$$

де dS – елемент площі плівки. Такі інтеграли зручно обчислювати у полярній системі координат на площині ($x = R \cos \varphi$, $y = R \sin \varphi$), тоді

$$I = \int_0^d \int_0^{2\pi} \frac{q}{4\pi r^2} \exp\left(-\sum_{i=1}^k r_i \mu_i\right) R dR d\varphi$$

Інтегруючи по змінній φ та враховуючи, що $r_i = h_i / \cos \alpha$, $r = h / \cos \alpha$, $R = h \tan \alpha$ (Рис.1), отримаємо

$$I = \frac{q}{2} \int_0^1 \frac{1}{u} \exp\left(-\frac{\sum_{i=1}^k h_i \mu_i}{u}\right) du \equiv \frac{q}{2} E_1\left(\sum_{i=1}^k h_i \mu_i\right)$$

де $u = \cos \alpha$.

Для оцінки гамма-потoku товстого шару радіоактивного матеріалу товщиною d на висоті H від

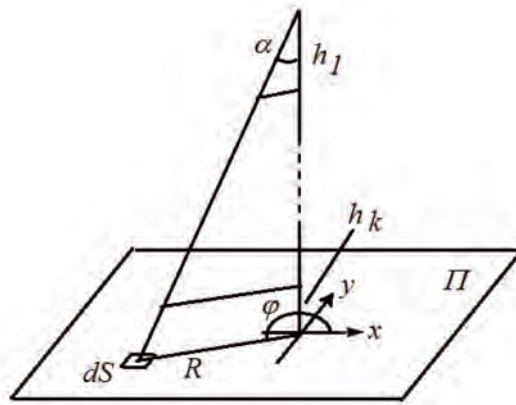


Рисунок 1. Схема оцінки гамма-поля для плоскої радіоактивної плівки (площина Π)

*Джерело: розроблено авторами

нього розглядатимемо його як сукупність тонких плівок, що дозволяє використати співвідношення (1) та проінтегрувати його за вертикальною координатою z . У результаті перетворень отримаємо наступне співвідношення

$$I = \int_0^d \frac{q}{2} E_1(\mu H + v(d - z)) dz \quad (2)$$

де v і μ – коефіцієнти ослаблення для матеріалу прошарку і середовища поза ним відповідно.

Коли активність джерела q є сталою або деякою елементарною функцією z , співвідношення (2) можна представити в аналітичній формі. Наприклад, коли $q = q_0 = \text{const}$, з (2) випливає

$$I = \frac{q_0}{2v} E_2(\mu H + v(d - z)) \quad (3)$$

де $E_2(x) = x \int_x^\infty t^{-2} e^{-t} dt$ – експоненціальний інтеграл другого роду. В інших випадках, як правило, слід застосовувати альтернативні методи.

У цьому дослідженні розробляється напіваналітичний підхід для обчислення інтеграла (2), коли q є функцією z . На сьогодні зібрано значний обсяг експериментального матеріалу щодо розподілу радіонуклідів за глибиною, які відображають його неоднорідний характер [5, 13, 14, 17, 19]. Як правило для опису такого розподілу в гамма спектроскопії розглядається функція $v(\zeta)$ (Бк/кг), де ζ визначається у термінах маси ґрунту, що знаходиться над точкою спостереження, тобто $\zeta = \int_0^z \rho(s) ds$ (кг/м²).

Як зазначено у роботі [14], така функція характеризується кількома очевидними властивостями: має описувати профіль з несиметричним максимумом, містити не більше трьох параметрів та прямувати до нуля на великих глибинах. З поміж можливих аналітичних представлень функції $v(\zeta)$ часто використовують $v = (B_1 \zeta + B_2) e^{-a \zeta}$ або функція Лоренца

$$v = \frac{A_1}{(A_2 - \zeta)^2 + A_3^2}$$

Надалі ми використовуємо саме функцію Лоренца, вибравши значення параметрів, які визначені експериментально та вказані у роботі [13]:

$$A_1 = 5.96 \text{ Бк} \cdot \text{г} \cdot \text{см}^{-4}, A_2 = 3.62 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}, A_3 = 7.00 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}.$$

У своїх дослідженнях ми використовуємо величини (Бк·м⁻²) та (м) тому перейдемо від функції $v(z)$ до q , використовуючи співвідношення $q = \rho v(\rho z)$, де ρ – густина ґрунту, яку ми приймемо сталою, тобто $\rho = 1.5 \text{ г/см}^3$ (перший множник ρ зумовлений переходом до змінної z в диференціалі dz інтегралу (2). Тож по суті усі параметри $A_{1,2,3}$ слід поділити на густину ґрунту, що приводить нас до наступного виразу

$$q = \frac{a_1}{(a_2 - z)^2 + a_3^2} \quad (4)$$

де $a_{1,2,3} = A_{1,2,3} \rho^{-1}$ (Рис.2, суцільна крива).

Отже, з метою оцінки інтеграла (2) застосуємо підхід, розроблений у роботах [7,8,9], що базується на представленні [10,11] функції $q(z)$ у вигляді лінійної комбінації ступінчастих функцій.

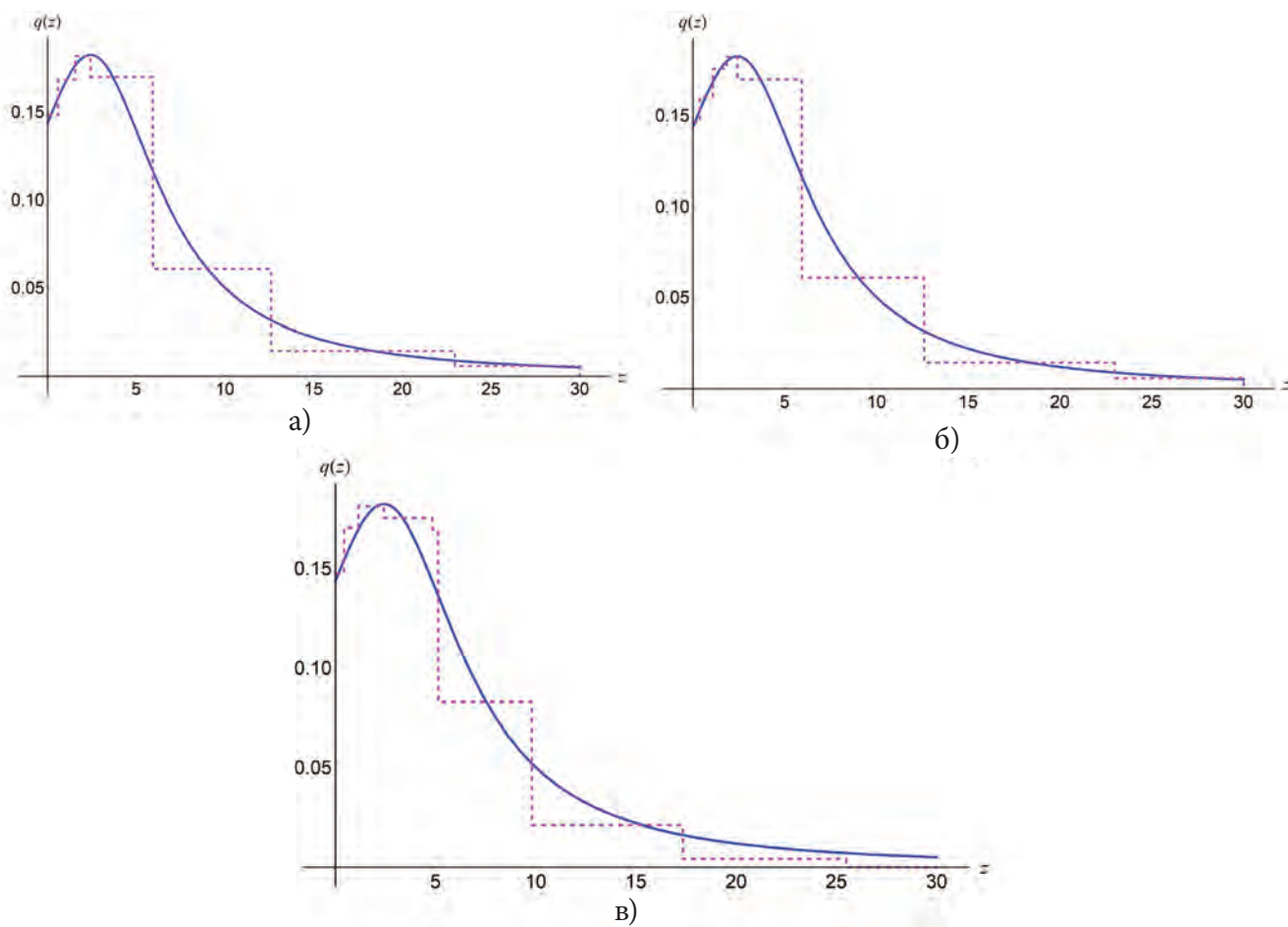


Рисунок 2. Графік функції $q(z)$ (суцільна крива) та її наближення ступінчатою функцією (пунктирні криві) при $N = 3$ (а), $N = 4$ (б) та $N = 5$ (в)

*Джерело: розроблено авторами

Застосовуючи його до виразу (2), припустимо, що функція $q(z)$ визначена в інтервалі $[0;d]$ і існують числа $\gamma_n = \int_0^d z^n q(z) dz < \infty$. Далі нехай $d_i, i = 0, 1, \dots, N$ ($d_0 = 0, d_N = d$) – розбиття області визначення $[0;d]$. Припустимо, що існують такі числа φ_i що справедливе наступне представлення

$$\tilde{q}_N(z) = \varphi_1(\theta(z - d_0) - \theta(z - d_1)) + \dots + \varphi_N(\theta(z - d_{N-1}) - \theta(z - d_N)) \quad (5)$$

де $\theta(z)$ – функція Хевісайда ($\theta(z)$ дорівнює 0 для від'ємного z і 1 для додатного z).

Щоб отримати обмеження на величини $\varphi_1, \dots, \varphi_N$ і $d_1, \dots, d_{N-1}$ (нагадаємо, що d_N фіксоване), помножимо співвідношення (4) на $(n+1)z^n, n = 0, \dots, 2N-1$ і кожна з них інтегрується по $[0;d]$. Отримані нелінійні алгебраїчні рівняння можна представити у вигляді наступної системи [7]

$$\begin{aligned} \varphi_1 d_1 + \varphi_2 (d_2 - d_1) + \dots + \varphi_N (d - d_{N-1}) &= \gamma_0, \\ \varphi_1 d_1^2 + \varphi_2 (d_2^2 - d_1^2) + \dots + \varphi_N (d^2 - d_{N-1}^2) &= 2\gamma_1, \\ &\dots \\ \varphi_1 d_1^{2N-1} + \varphi_2 (d_2^{2N-1} - d_1^{2N-1}) + \dots + \varphi_N (d^{2N-1} - d_{N-1}^{2N-1}) &= (2N-1)\gamma_{2N-2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Розв'язок цієї системи дає нам розбиття інтервалу $[0;d]$ та вагові коефіцієнти для ступінчастих функцій.

Отже, існує природне обмеження для d_i . Вони повинні лежати в інтервалі $[0;d]$, тобто $0 < d_i < d$. Зазначимо також, що система (5) має розв'язок $\{d_1, \dots, d_{N-1}\}$, тоді будь-яка перестановка d_i також є розв'язком (φ_i не зберігаються).

Застосуємо вказану процедуру до наближення функції $q(z)$, приймаючи $N = 3, 4, 5$.

Зокрема, розглядаючи більш детально випадок $N = 3$, необхідно розв'язати наступну систему із п'яти рівнянь, яка впливає із системи (6), відносно $\varphi_{1,2,3}$ і $d_{1,2}$.

$$\begin{aligned}
 \varphi_1 d_1 + \varphi_2 (d_2 - d_1) + \varphi_3 (d - d_2) &= \gamma_0, \\
 \varphi_1 d_1^2 + \varphi_2 (d_2^2 - d_1^2) + \varphi_3 (d^2 - d_2^2) &= 2\gamma_1, \\
 \varphi_1 d_1^3 + \varphi_2 (d_2^3 - d_1^3) + \varphi_3 (d^3 - d_2^3) &= 3\gamma_2, \\
 \varphi_1 d_1^4 + \varphi_2 (d_2^4 - d_1^4) + \varphi_3 (d^4 - d_2^4) &= 4\gamma_3, \\
 \varphi_1 d_1^5 + \varphi_2 (d_2^5 - d_1^5) + \varphi_3 (d^5 - d_2^5) &= 5\gamma_4.
 \end{aligned} \quad (7)$$

Величини $\varphi_{1,2,3}$ входять до системи лінійно, що загалом дозволяє звести систему до меншої кількості рівнянь за допомогою формул Крамера, але це не дуже спрощує розв'язання системи. Тому використаємо числові засоби розв'язання нелінійних алгебраїчних систем, які пропонуються у пакеті прикладних програм Mathematica 12. Зокрема, можна використати команду NSolve[], яка для з опцією «Reals» дозволяє отримати дійсні розв'язки поліноміальної системи, які задовольняють умови задачі: розв'язки додатні, а $d_{1,2}$ потрапляють в інтервал $[0; d]$. Для більших при застосуванні NSolve[] часто отримуються сторонні корені, тоді корисною є команда FindRoot[], за допомогою якої при підборі вдалим початкових умов для пошуку розв'язку можна отримати потрібний розв'язок системи.

Для побудови ступінчастої апроксиманти не-монотонної функції $q(z)$, інтервал $[0; d]$ абсцисою критичної точки z_{cr} розбивався на два інтервали $[0; z_{cr}]$ та $[z_{cr}; d]$. Для зменшення обсягів обчислень,

процедуру побудови ступінчастої функції побудовано для інтервалу виду $[0; L]$, а всі інші інтервали монотонності приводяться до вигляду $[0; L]$ за допомогою відповідного лінійного перетворення. Наприклад, щоб побудувати наближення в інтервалі $[z_{cr}; d]$ спочатку зсунемо спадну частину графіка $q(z)$ вздовж горизонтальної осі на величину z_{cr} , аналізуючи надалі функцію $Q(z) = q(z + z_{cr})$. Після розв'язання системи (6) слід повернутись до вихідних значень аргументу за допомогою зворотного перетворення (додавши до значень d_i величину z_{cr}).

Отже, наближаючи криву (4) ступінчастою апроксимантою з $N = 3$ точками поділу кожного інтервалу монотонності за допомогою вище описаної процедури, отримаємо параметри, значення яких приведено у Таблиці 1. Порівняння кривої (4) та апроксиманти $\tilde{q}_3$ зображено на Рис.2а. Аналогічні обчислення проведено для $N = 4$ (Таблиця 2) та $N = 5$ (Таблиця 3). На рисунках 2б та 2в здійснено порівняння отриманих апроксимант з кривою (4). Варто зазначити, що із зростанням N стає усе складніше знайти коректний розв'язок нелінійної системи (6), яка стає усе більш багатомірною. Тому можна рекомендувати зупинитись на малих N або ретельно підбирати початкові умови для запуску ітераційної процедури пошуку коренів у системі Mathematica 12.

Таблиця 1

Значення розв'язків системи (7) для $N = 3$

Гілки $q(z)$	φ_1	φ_2	φ_3	d_1	d_2
↗	0,1484	0,1615	0,1817	1,5521	0,5796
↘	0,1593	0,1338	0,0066	15,6533	4,8255

* Позначки «↗» та «↘» відповідають зростаючій та спадній гілці функції $q(z)$ відповідно.

* Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2

Значення розв'язків системи (6) для $N = 4$

Гілки $q(z)$	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	d_1	d_2	d_3
↗	0,1467	0,1531	0,1681	0,1821	1,8359	1,0779	0,3709
↘	0,1702	0,1234	0,0144	0,0059	10,1803	3,5136	20,5333

* Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3

Значення розв'язків системи (6) для $N = 5$

Гілки $q(z)$	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5	d_1	d_2	d_3	d_4
$\nearrow$	0,1475	0,1474	0,1706	0,1812	0,1813	2,9607	0,4287	1,1375	2,9413
$\searrow$	0,1754	0,0885	0,0266	0,0097	0,0056	2,7127	7,3875	14,9185	23,0651

*Джерело: розроблено авторами

Таблиця 4

Значення Δ_n

n	3	4	5
Δ_n	0,024	0,015	0,012

*Джерело: розроблено авторами

Контроль наближення функції $q(z)$ її апроксимантами $\tilde{q}_n(z)$ здійснювався шляхом обчислення відхилення

$$\Delta_n = \int_0^d (q(s) - \tilde{q}_n(s))^2 ds.$$

Результати обчислення відхилення подано в Таблиці 4.

При $q = \tilde{q}_k$, визначеному формулою (4), інтеграл (2) перетворюється на співвідношення

$$\tilde{I} = \frac{q_0}{2\nu} \sum_{i=1}^k \varphi_i E_2(\mu H + \nu(d-z)) \Big|_{d_{i-1}}^{d_i} \quad (8)$$

де $d_0 = 0$, $d_N = d$.

Для порівняння точного значення I , яке визначається інтегралом (2) та його наближення $\tilde{I}$, оцінене за допомогою виразу (8), зобразимо залежність цих величин від висоти H на Рис. 3. Інтеграл (2) обчислювався числовим способом засобами пакету *Mathematica* 12 при фіксованих параметрах $\mu = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$, $\nu = 0,111 \text{ см}^{-1}$ і $d = 30 \text{ см}$, взятих з роботи [12].

Побудувавши апроксимацію $\tilde{q}_3(z)$, можна обчислити інтеграл (2) за формулою (8) та порівняти оцінку з точним значенням, яке обчислюється за формулою (7). Результат порівняння зображено на рис.3, де добре видно, що, починаючи вже з третього наближення $\tilde{q}_3(z)$, досягається досить добре узгодження результатів.

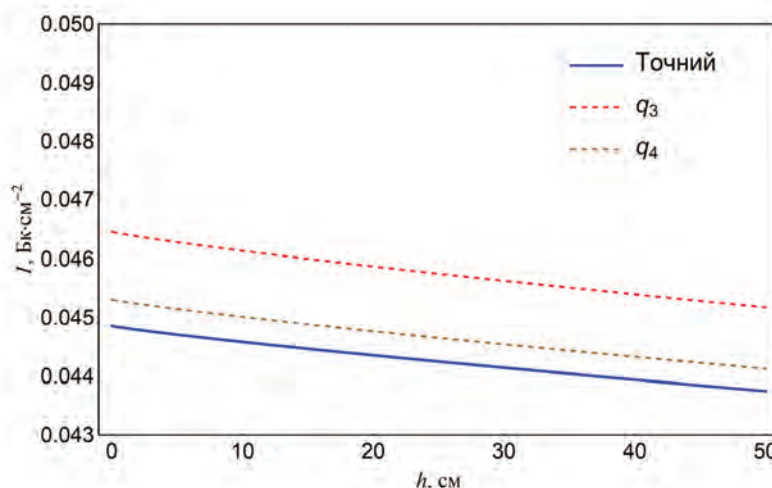


Рисунок 3. Порівняння інтеграла (2), обчисленого числовим способом («точний» результат, суцільна крива), та апроксимант $\tilde{q}_{3,4}$ (пунктирні криві), обчислених за допомогою виразу (8)

*Джерело: розроблено авторами

Висновки

Отже, у цьому дослідженні розглядалось задача про оцінку інтенсивності гамма-випромінювання ґрунтової товщі, коли розподіл джерел радіоактивності є неоднорідним і, як свідчать відомі експериментальні дані, може бути описаний унімодальною неперервною функцією. Використовуючи напіваналітичний підхід, коли вихідну функцію активності апроксимують лінійною комбінацією ступінчатих функцій (по суті апроксимують неоднорідний ґрунт шаруватим середовищем), у роботі було отримано аналітичний вираз для наближеної оцінки інтенсивності гамма-потoku.

Порівняння наближених і точних (числових) значень інтенсивності випромінювання показав їх чудове співпадіння навіть при малих кількостях точок розриву ступінчатої функції.

Список використаних джерел

1. Коган Р.М., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Основы гамма-спектрометрии природных сред. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 232 с.
2. Израэль Ю.А., Стукин Е.Д. Гамма-излучение радиоактивных . Москва: Атомиздат, 1967. 224 с.
3. Израэль Ю.А. Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий. Санкт-Петербург: Прогресс-Погода, 1996. 355 с.
4. Корбут Г. О., Положенець В. М., Сіренко С. П., Ремезова О. О., Трембіцький В. А. Вплив ландшафтного фактора на радіаційну ситуацію в забрудненому радіонуклідами регіоні Житомирського Полісся. Вісник ДААУ. Проблеми аграрної, лісової та інженерної радіоекології і питання моніторингу. 2001. № 1. С. 160–171.
5. Varley A., Tyler A., Dowdall M., Bondar Yu., Zabrotski V. An in situ method for the high resolution mapping of ^{137}Cs and estimation of vertical depth penetration in a highly contaminated environment. *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 605–606. P. 957–966. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.067>
6. Кобец С. А., Федорова В. М., Пшинко Г. Н., академик НАН Украины Гончарук В. В. Влияние природной модификации поверхности глинистых компонентов почв на десорбцию цезия. Докладі Національної академії наук України. 2015. №11. С. 82–90. DOI: <https://nasu-periodicals.org.ua/index.php/dp/article/view/15374/14474>
7. Popov, O., Skurativskyi, S., Molitor, N., Koniushkov, A., Fomichova, O., Svitlyshin, I. Improvement in the evaluation of gamma radiation from cylindrical bodies with spatially inhomogeneous source activity distribution. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1415. P. 012086. DOI: 10.1088/1755-1315/1415/1/012086
8. Попов О.О., Скуратівський С.І., Коваленко О.М., Мартинюк І.Д. Оцінка гамма випромінювання циліндричних тіл з неоднорідно розподіленими джерелами радіоактивності. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції, 11-17 березня 2024 р. Черкаси : ЧНУ Богдана Хмельницького, 2024.
9. Попов О.О., Скуратівський С.І., Пилипчук Є.В., Куценко В.О., Краснов Є.Б. Оцінка гамма випромінювання тіл з просторово неоднорідним розподілом джерел радіоактивності. Сталій розвиток: виклики та реалії здійснення (Україна-світ) : збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів і молодих вчених, м. Івано-Франківськ, 22 травня 2024 р. Відповід. за вип.: Т.М. Яцишин, Г.М. Грицуляк. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2024. С. 26–30.
10. Vakhnenko V., Danylenko V., Michtchenko A. Diagnostics of the medium structure by long wave of finite amplitude. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2000. Vol. 35. P.1105–1113. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0020-7462\(99\)00082-7](https://doi.org/10.1016/S0020-7462(99)00082-7)
11. Vakhnenko V. Wave dynamics of the structured media with relaxation. Lambert Academic Publishing, 2015. 173 p. <http://www.igph.kiev.ua/vakhnenko/02.03.2016/book-Vakhnenko.pdf>
12. Попов О., Скуратівський С., Ковач В., Рибка Є., Грицуляк Г., Марцева Л. Оцінка інтенсивності гамма-випромінювання шаруватого ґрунтового масиву. Журнал фізичних досліджень. 2024. №4(28). 4801. <https://doi.org/10.30970/jps.28.4801>
13. Hillmann U., Schimmack W., Jacob P.,

Bunzl K. In situ γ -spectrometry several years after deposition of radiocesium Part I. Approximation of depth distributions by the Lorentz function. *Radiation and Environmental Biophysics*. 1996. Vol. 35. P. 297–303. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004110050043>

14. Kastlander J., Bargholtz Ch. Efficient in situ method to determine radionuclide concentration in soil. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2005. Vol. 547(2–3). P. 400–410. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.03.143>

15. Laedermann J.-P., Byrde F., Murith C. In-Situ gamma-ray spectrometry: the influence of topography on the accuracy of activity determination. *Journal of Environmental Radioactivity*. 1998. Vol. 38(1). P. 1–16. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(97\)00025-8](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(97)00025-8)

16. ICRU Report 53: Gamma-Ray Spectrometry in the Environment (International Commission on Radiation Units and Measurements). Maryland: ICRU, 1994. 84 p.

17. Md Moudud Hasan, Bart Rogiers, Eric Laloy, Jos Rutten, Johan Camps, Tim Vidmar, Marijke Huysmans. Soil radioactivity-depth profiles from regularized inversion of borehole gamma spectrometry data. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2022. Vol. 243. P. 106807. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106807>

18. Singla A., Dhingra N. Investigation of impact of soil texture, depth and gamma ray energy on the mass attenuation coefficient and determination of soil bulk density using Gamma-Ray Spectrometry. *Radiation Physics and Chemistry*. 2024. Vol. 216 P. 111400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111400>

19. Lettner H., Andrasi A., Hubner A.K., Lovranich E., Steger F., Zombori P. In situ gamma-spectrometry intercomparison exercise in Salzburg, Austria. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 1996. Vol. 369 (2–3). P. 547–551. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)80048-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(96)80048-9)

УДК 621.039:504.064:004.9

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202508-015>

РОЗВИТОК ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ ХІМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ АЕС ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ВІДПОВІДНОСТІ МІЖНАРОДНИМ СТАНДАРТАМ

Яцишин А. В.¹, Ковач В. О.¹, Кубрак Ю. О.²,
Левченко А. Ю.², Коваленко О. М.¹

¹Центр інформаційно-аналітичного та технічного
забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України,
03142, м. Київ, пр. Академіка Палладіна, 34а,

²Державний університет «Житомирська політехніка»,
10005, Україна, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103,
iatsyshyn.andriy@gmail.com

У статті розглянуто актуальні проблеми та напрями розвитку інтегрованих інформаційно-аналітичних систем хімічного моніторингу атомних електростанцій як важливого інструменту підвищення екологічної безпеки та забезпечення відповідності міжнародним стандартам. Обґрунтовано необхідність комплексного підходу до моніторингу впливу АЕС на довкілля, що поєднує контроль радіаційних і хімічних факторів техногенного навантаження, з урахуванням сучасних вимог МАГАТЕ, нормативів Європейського Союзу та національного законодавства.

Проаналізовано міжнародну та національну нормативно-правову базу у галузі екологічного моніторингу АЕС, визначено ключові вимоги до систем контролю викидів і скидів, водно-хімічного режиму та екологічної інформаційної прозорості. Розглянуто концепцію побудови інтегрованої інформаційно-аналітичної системи хімічного моніторингу, що охоплює етапи аналізу вимог, проектування архітектури, розробки програмного забезпечення, впровадження, введення в експлуатацію та подальшого супроводу системи.

Особливу увагу приділено сучасним технологічним рішенням у сфері автоматизованого хімічного контролю, зокрема використанню онлайн-аналізаторів, проточних методів аналізу, дистанційних постів спостереження, геоінформаційних систем та елементів інтелектуального аналізу даних.

Узагальнено зарубіжний досвід впровадження інтегрованих систем моніторингу на АЕС та показано їх ефективність у своєчасному виявленні відхилень, підтримці водно-хімічного режиму і зниженні екологічних ризиків.

Зроблено висновок, що розвиток інтегрованих інформаційно-аналітичних систем хімічного моніторингу є необхідною умовою підвищення рівня екологічної безпеки АЕС, гармонізації національних підходів з міжнародними стандартами та забезпечення сталого розвитку ядерної енергетики.

Ключові слова: атомна електростанція, хімічний моніторинг, інформаційно-аналітична система, екологічна безпека, міжнародні стандарти, МАГАТЕ.

DEVELOPMENT OF INTEGRATED CHEMICAL MONITORING SYSTEMS FOR NPPS AS A TOOL FOR IMPROVING THE LEVEL OF ENVIRONMENTAL SAFETY AND COMPLIANCE WITH INTERNATIONAL STANDARDS

Iatsyshyn Andrii¹, Kovach Valeriia¹, Kubrak Yurii²,
Levchenko Anton², Kovalenko Oleksandr¹

¹Center for Information-analytical and Technical
Support of Nuclear Power Facilities Monitoring of the
NAS of Ukraine, 34a Palladin Ave., Kyiv, 03142, Ukraine

²Zhytomyr Polytechnic State University,
103 Chudnivsyka Str., Zhytomyr, 10005, Ukraine

The article considers current problems and directions for the development of integrated information and analytical systems for chemical monitoring of nuclear power plants as an important tool for improving environmental safety and ensuring compliance with international standards. The need for a comprehensive approach to monitoring the impact of nuclear power plants on the environment, which combines control of radiation and chemical factors of technogenic load, taking into account modern IAEA requirements, European Union regulations and national legislation, is substantiated.

The international and national regulatory framework in the field of environmental monitoring of nuclear power plants is analyzed, key requirements for emission and discharge control systems, water-chemical regime and environmental information transparency are determined. The concept of building an integrated information and analytical system for chemical monitoring is considered, which includes the stages of requirements analysis, architecture design, software development, implementation, commissioning and further system maintenance.

Particular attention is paid to modern technological solutions in the field of automated chemical control, in particular the use of online analyzers, flow analysis methods, remote observation posts, geo-

graphic information systems and elements of intelligent data analysis. Foreign experience in implementing integrated monitoring systems at nuclear power plants is summarized and their effectiveness in timely detection of deviations, maintenance of the water-chemical regime and reduction of environmental risks is shown.

It is concluded that the development of integrated information and analytical systems of chemical monitoring is a necessary condition for increasing the level of environmental safety of nuclear power plants, harmonizing national approaches with international standards and ensuring sustainable development of nuclear energy.

Keywords: nuclear power plant, chemical monitoring, information and analytical system, environmental safety, international standards, IAEA.

Актуальність дослідження

Атомні електростанції (АЕС) характеризуються низьким рівнем викидів парникових газів і є важливим джерелом енергетичних ресурсів, однак їх експлуатація супроводжується впливом на навколишнє природне середовище [1, 2]. Окрім радіаційних факторів, існують хімічні чинники техногенного впливу: теплове забруднення

водойм охолоджувачами, скиди очищених технологічних вод із залишковим вмістом реагентів, роботи дизель-генераторів, поводження з відходами тощо. Для забезпечення екологічної безпеки та відповідності нормативним вимогам необхідно здійснювати комплексний моніторинг довкілля навколо АЕС – як радіаційний, так і хімічний. Особливо актуальним є створення інтегрованих інформаційно-аналітичних систем (ІАС) такого моніторингу, що дають змогу оперативно збирати й аналізувати дані про стан довкілля та про водно-хімічні процеси на станції, своєчасно виявляти відхилення і приймати управлінські рішення для захисту довкілля.

Актуальність дослідження зумовлена кількома чинниками. По-перше, сучасні вимоги до ядерної та радіаційної безпеки передбачають дотримання не лише дозових лімітів опромінення населення, але й контроль нерадіаційних впливів АЕС на навколишнє середовище. Міжнародні стандарти (МАГАТЕ, ЄС) наголошують на принципах сталого розвитку, що включають мінімізацію хімічного забруднення і раціональне використання водних ресурсів при експлуатації АЕС. По-друге, розвиток інформаційних технологій (ІоТ-сенсори, бездротові мережі, хмарні платформи, системи підтримки рішень) відкриває нові можливості для автоматизації моніторингу і обробки даних у режимі реального часу. Це дозволяє перейти від розрізнених вимірювань до інтегрованих систем екологічного нагляду, що охоплюють широкий спектр показників. По-третє, для України актуальним є завдання гармонізації стандартів екологічного моніторингу з міжнародними, зокрема з нормами Євросоюзу, у контексті євроінтеграції та виконання міжнародних зобов'язань.

Незважаючи на значний прогрес у сфері контролю викидів і скидів АЕС (за нормальної експлуатації вплив на довкілля є дуже малим і часто знаходиться на рівні фонових значень), все ще існують невирішені проблеми. До них належать: відсутність уніфікованих підходів до інтеграції даних від різних підсистем (радіаційний моніторинг, гідрохімічний контроль, метеоспостереження тощо); недостатня автоматизація контролю окремих хімічних забрудників (важкі метали, органічні сполуки) – аналіз яких досі потребує ручного відбору проб і лабораторних методів; необхідність модернізації нормативної

бази з урахуванням сучасних технічних можливостей моніторингу; забезпечення інформаційного обміну і прозорості даних для громадськості згідно з міжнародними принципами [3, 4].

Таким чином, розвиток інтегрованих ІАС хімічного моніторингу АЕС визначається поєднанням посилення регуляторних вимог, необхідністю мінімізації екологічних ризиків та впровадженням сучасних цифрових технологій. ІАС хімічного моніторингу забезпечують системне об'єднання даних із різномірних джерел (автоматизовані пости контролю, лабораторні аналізи, метеоспостереження, підсистеми водно-хімічного режиму), їх оперативну верифікацію, аналітичну обробку та підтримку прийняття управлінських рішень у штатних і позаштатних режимах роботи АЕС. Водночас, формування таких систем потребує науково обґрунтованого підходу до вибору контрольованих параметрів, стандартизації форматів і протоколів даних, забезпечення надійності та кіберзахисту, а також узгодження національних регуляторних вимог із рекомендаціями МАГАТЕ та нормами ЄС.

Метою статті є обґрунтування необхідності розвитку та впровадження інтегрованих інформаційно-аналітичних систем хімічного моніторингу атомних електростанцій, а також визначення концептуальних підходів, етапів побудови й сучасних технологічних рішень для підвищення рівня екологічної безпеки та забезпечення відповідності національних систем моніторингу міжнародним стандартам МАГАТЕ та Європейського Союзу.

Викладення основного матеріалу

Нормативне забезпечення та міжнародні стандарти

Нормативно-правова база відіграє ключову роль у визначенні вимог до моніторингу довкілля на АЕС. У світі існує ієрархія таких вимог: глобальні стандарти МАГАТЕ, регіональні директиви (наприклад, Євратом в ЄС), національні закони і правила, локальні регламенти експлуатуючих організацій. В ідеалі, інтегровані системи моніторингу мають бути розроблені з урахуванням усіх цих рівнів, щоб забезпечити гармонізацію стандартів.

На міжнародному рівні ключову роль відіграють вимоги МАГАТЕ щодо контролю викидів і скидів, а також організації моніторингу навколишнього середовища [5]. Зокрема, МАГАТЕ зобов'язує операторів АЕС здійснювати радіаційно-екологічний моніторинг з метою захисту населення і довкілля, підтримувати викиди «якнайнижчими, практично досяжними» (ALARA) та регулярно звітувати регулятору [6]. Хоча акцент робиться на радіоактивних речовинах, зазначається, що необхідно враховувати також хімічні та фізичні характеристики цих речовин і середовища при оцінці їх впливу [7]. В посібнику МАГАТЕ наведено рекомендації щодо побудови програм моніторингу для ядерних установок з урахуванням всіх шляхів впливу на населення і довкілля [8]. Також МАГАТЕ приділяє увагу готовності до аварій – існують стандарти, які вимагають створення систем раннього оповіщення та моніторингових мереж на випадок радіаційних аварій (наприклад, міжнародна система IRMIS для обміну даними між країнами). Ці вимоги теж слід інтегрувати в інформаційну систему АЕС, щоб у разі надзвичайних ситуацій дані хімічного і радіаційного моніторингу оперативно передавалися відповідним органам.

На рівні Європейського Союзу застосовують-

ся нормативи, гармонізовані з підходами МАГАТЕ, але в багатьох випадках більш суворі щодо екологічних аспектів. Директива 2013/59/Euratom встановлює обов'язок держав-членів забезпечити моніторинг радіоактивних викидів і доз для населення, що спонукає операторів АЕС мати системи контролю середовища. Поза радіаційною безпекою, екологічне законодавство ЄС (Водна рамкова директива, Директива про промислові викиди тощо) регламентує якість води та повітря і містить вимоги до моніторингу забруднень. Наприклад, кожна АЕС повинна отримати дозвіл на спеціальне водокористування та скиди, де встановлено гранично допустимі концентрації хімічних речовин у стічних водах. Для контролю цього потрібні автоматичні або регулярні вимірювання рН, температури, завислих речовин, хімічного споживання кисню (ХСК), нафтопродуктів, важких металів тощо у місцях скидів і у водоймі, що приймає ці скиди. Вимоги щодо безперервного моніторингу певних параметрів дедалі посилюються. Показовим є випадок Туреччини: після оновлення природоохоронного законодавства, для нової АЕС «Аккую» було зроблено обов'язковим встановлення системи безперервного дистанційного контролю охолоджувальних вод, що скидаються в море [9]. Ця система в режимі ре-



Рисунок 1. Будівництво АЕС «Аккую» (Туреччина), на якій впроваджується автоматизована система безперервного моніторингу хімічних показників охолоджувальної води, що скидається в море [9]

ального часу відстежує прозорість, витрату води, концентрацію завислих речовин, розчинений кисень, рН, ХСК, температуру, електропровідність та інші показники відповідно до турецьких норм. Таким чином, нормативні вимоги виступили визначальним чинником упровадження інноваційної системи моніторингу, здатної функціонувати протягом усього життєвого циклу станції та оперативно сигналізувати про будь-які перевищення допустимих рівнів у скидах.

На національному рівні кожна країна-оператор АЕС має власні нормативні акти, що регулюють моніторинг. В Україні, наприклад, діють закони «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», «Про охорону навколишнього природного середовища» та підзаконні акти, що зобов'язують Енергоатом здійснювати державний моніторинг в санітарно-захисній зоні (СЗЗ) і зоні спостереження АЕС. Регулятор (Державна інспекція ядерного регулювання України) встановлює нормативи допустимих викидів/скидів і контролює виконання. Існують також галузеві нормативні документи, наприклад, стандарти на водно-хімічний режим (ВХР) енергоблоків, що визначають норми вмісту корозійно-агресивних домішок у теплоносіях (хлориди, сульфати, розчинений кисень тощо) і відповідні методи контролю. Багато з цих документів розроблені ще за часів СРСР або раніше й наразі переглядаються з урахуванням рекомендацій МАГАТЕ та досвіду ЄС. Зокрема, Україна взяла курс на впровадження інтегрованих систем менеджменту на АЕС, сертифікованих за міжнародними стандартами ISO 14001 (екологічне управління) та ISO 9001 (якість). Це передбачає створення єдиної інформаційної платформи, де відслідковуються показники, пов'язані з безпекою, охороною довкілля, якістю, охороною праці тощо.

Отже, нормативне поле формує вимоги та стимулює розвиток систем моніторингу. Гармонізація стандартів означає приведення національних норм у відповідність до кращих міжнародних практик. Для інтегрованих ІАС хімічного моніторингу це означає, що система має забезпечувати збір даних для виконання вимог наглядових органів (радіаційного і природоохоронного), а також відповідати рекомендаціям МАГАТЕ щодо структури та якості моніторингу. Зокрема, дані моніторингу повинні бути достовірними, опера-

тивними, відкритими для контролюючих органів і громадськості (у межах, не розкриваючих чутливої інформації), а також зберігатися протягом усього життєвого циклу станції для аналізу трендів і обґрунтування безпеки.

Концепція розвитку інтегрованої системи моніторингу (етапи побудови)

Інтегрована ІАС хімічного моніторингу АЕС – це сукупність технічних і програмних засобів, об'єднаних у єдину інфраструктуру, що забезпечує автоматизований збір, передачу, зберігання, аналіз та представлення даних про хімічні та радіаційно-хімічні показники стану довкілля і технологічних середовищ АЕС. Розробка такої системи є комплексним завданням, яке можна умовно розбити на кілька етапів:

1. *Аналіз вимог та планування.* На цьому етапі визначаються цілі моніторингової системи (охорона довкілля, ядерна безпека, підтримка технологічних режимів), перелік параметрів для контролю та частота вимірювань, виходячи з нормативних вимог і внутрішніх потреб експлуатації. Наприклад, для довкілля зазвичай контролюють: викиди в атмосферу (об'ємні активності аерозолів, газів; концентрації хімічних речовин, якщо є значущі джерела), скиди у водойми (радіонукліди, рН, температура, солоність, завислі речовини, ХСК, йони металів тощо), стан ґрунтів, біоти (вміст радіонуклідів і забрудників у пробах). Всередині станції – параметри водно-хімічного режиму першого і другого контурів (концентрація бору, кислотно-лужні властивості, розчинений кисень, концентрація корозійно-активних солей, радіоактивність води тощо). Також визначається географія системи: мережа постів в СЗЗ і зоні спостереження, точки відбору проб, підключення до технологічних контурів. На основі цього складається технічне завдання на проектування системи.

2. *Проектування архітектури системи.* Розробляється структура ІАС, що зазвичай має трирівневу ієрархію: первинні вимірювальні пристрої (датчики, аналізатори, пробовідбірники) – середовище передачі даних (кабельні або бездротові мережі, протоколи зв'язку) – центральний інформаційно-аналітичний центр (сервери збору даних, бази даних, програмне забезпечення для

аналізу). На цьому етапі обираються конкретні технологічні рішення: типи датчиків (наприклад, рН-метри, кисневі зонди, хроматографічні аналізатори), логери і контролери, спосіб передачі сигналу (промислові стандарти OPC, Modbus, бездротові мережі для віддалених постів тощо). Враховуються питання надійності (резервування каналів, дублювання критичних датчиків), кібербезпеки (захист від несанкціонованого доступу до даних) та сумісності з існуючими системами АЕС (наприклад, інтеграція з автоматизованою системою контролю радіаційної обстановки – АСКРО, чи з системою управління блоком).

3. *Розробка програмного забезпечення та бази даних.* На верхньому рівні ІАС створюється програмний комплекс, який забезпечує збір, обробку, зберігання та відображення інформації. Таке ПЗ виконує кілька важливих функцій (рис. 2): а) агрегація даних з різних джерел у єдиній базі (наприклад, об'єднання показань автоматичних постів контролю гамма-фону, хіманалізаторів, метеостанцій та лабораторних аналізів); б) аналіз та діагностика – програма в реальному часі порівнює отримані значення з нормативними граничними рівнями, розраховує тренди і може виявляти небажані тенденції задовго до досягнення аварійних значень; в) сповіщення персоналу – ІАС має автоматично сигналізувати черговому хіміку або екологу про вихід параметрів за допустимі межі. г) підготовка звітності – система формує необхідні звіти: щоденні оперативні зведення, щомісячні і річні звіти для керівництва та

регуляторів, включно з розрахунками статистичних показників, графіками змін концентрацій, об'ємів викидів тощо. г) підтримка лабораторії – сучасне ПЗ може включати модулі для керування роботою хімічної лабораторії: ведення електронних лабораторних журналів, протоколювання результатів аналізів, внутрішній контроль якості вимірювань (калібрування приладів, статистичний аналіз похибок). Така інтеграція лабораторного і автоматичного контролю – один з ключових принципів концепції ІАС, оскільки забезпечує цілісність інформації та усуває «розрив» між оперативними даними і детальними аналізами.

4. *Впровадження (монтаж та налагодження).* На цьому етапі здійснюється придбання і встановлення обладнання на місцях: датчики монтуються у контури і на екологічних постах, прокладаються кабельні лінії чи налаштовуються радіомодулі, розгортається серверне обладнання і встановлюється програмне забезпечення. Після монтажу – тривалий процес пусконаладжувальних робіт: перевірка правильності передачі сигналів, калібрування датчиків і аналізаторів на еталонних розчинах, тестування програмних алгоритмів. Важливо також інтегрувати систему в існуючу інфраструктуру АЕС. Завершальним кроком цього етапу є дослідно-промислова експлуатація ІАС: протягом певного часу система працює паралельно зі старими методами моніторингу, щоб верифікувати її точність і надійність, внести виправлення.



Рисунок 2. Ключовий функціонал програмного комплексу ІАС
(створено за допомогою онлайн-інструменту NotebookLM)

5. *Введення в експлуатацію та супровід.* Після успішних випробувань система затверджується до промислової експлуатації наказом по станції, персонал починає використовувати її в щоденній роботі. Дуже важливо організувати навчання персоналу – як інженерів-хіміків, так і екологів, операторів блочного щита, які можуть отримувати від неї сигнали. Система має працювати цілодобово, тому визначаються відповідальні особи за її технічне обслуговування (служба АСУТП чи ІТ). Супровід включає: регулярну перевірку і калібрування датчиків (щоб система давала достовірні показання), оновлення програмного забезпечення (виправлення недоліків, додавання нових функцій), резервне копіювання баз даних, кібербезпекові ревізії.

Інтегрована система моніторингу не є статичною – концепція розвитку передбачає її постійне вдосконалення. Наприклад, з часом можуть додаватися нові контрольовані параметри, нові аналітичні модулі (побудова прогнозів, моделювання поширення домішок), інтеграція з зовнішніми базами даних.

Побудова такої системи ґрунтується на принципах надійності, оперативності, точності і комплексності.

Слід зазначити, що зарубіжний досвід показує успішність поетапного впровадження. Наприклад, у Франції екологічний моніторинг АЕС виконується трьома взаємопов'язаними підсистемами: система аварійного оповіщення (on-line датчики на викидах, гамма-пости, хімічні монітори води на виході з станції), система контрольного моніторингу (регламентовані відбори проб і аналізи згідно з дозволами на скиди) і система аналітичного супроводу (глибокий аналіз проб, моделювання та прогнозування забруднюючих речовин) [10]. Інтегрована інформаційна система повинна охоплювати всі ці рівні та забезпечувати між ними обмін даними.

В Україні у зоні спостереження АЕС функціонують автоматизовані пости гамма-контролю (АСКРО), метеорологічні майданчики, здійснюється регулярний відбір проб води, ґрунту, молока, риби тощо.

Проте актуальним є завдання інтеграції цих даних у єдину систему з метою підвищення ефективності екологічного контролю та забезпечення прозорості інформації для суспільства.

Сучасні рішення та нові технології

Розглянемо сучасний стан інформаційно-аналітичного забезпечення хімічного моніторингу на АЕС у світі та проаналізуємо новітні ідеї та інновації в цій галузі. Одним з трендів є впровадження автоматизованих підсистем хімічного контролю безпосередньо на енергоблоках. Сучасні реакторні установки обладнуються вбудованими системами автоматичного хімічного контролю ВХР: в ключових точках технологічних контурів встановлено датчики і аналізатори, які здійснюють безперервні або періодичні вимірювання хімічних показників (типово – рН, електропровідність, концентрація розчиненого кисню, вміст корозійно-активних аніонів хлориду та сульфату, концентрація борної кислоти у воді першого контуру, вміст розчиненого водню тощо). Дані зі стаціонарних онлайн-аналізаторів збираються в реальному часі і надходять в інформаційну систему хімічної служби блоку. Паралельно здійснюється лабораторний контроль – персонал хімічної лабораторії добирає проби середовищ (питна вода, вода технічна з систем охолодження, теплоносії, масла) і виконує детальні аналізи, включаючи радіохімічні (визначення тритію, стронцію-90, корозійних продуктів активації в теплоносії тощо) та хімічні (спектрометрія домішок, визначення концентрації продуктів корозії, солей) [3, 11, 12]. Для ефективного використання такої множини даних створюються спеціалізовані програмно-апаратні комплекси – інформаційно-аналітичні системи хімічного моніторингу ВХР.

Компанія EDF (Франція) у своїх реакторах має систему, яка стежить за ключовими параметрами хімії теплоносія і подає сигнали операторам через інформаційну систему блоку. У США у ядерній енергетиці для моніторингу та управління хімічними параметрами первинних і вторинних контурів впроваджуються інформаційні системи обробки та інтеграції даних, що аналізують результати лабораторних аналізів і онлайн-моніторингу з метою відслідковування трендів і підтримки прийняття рішень щодо водної хімії та її контролю на АЕС. Такі технології описуються у міжнародних технічних публікаціях про системи обробки даних для водної хімії та контролю корозії на АЕС. Американський регулятор NRC вимагає мати програми контролю водно-хіміч-

ного режиму як частину планів управління старінням обладнання – адже корозія, відкладення солей у парогенераторах чи трубопроводах можуть напряму впливати на безпеку реактора. У цьому контексті автоматизація хімічного контролю сприймається як інструмент профілактики аварій, пов'язаних із деградацією матеріалів.

Окрім безпосередньо систем моніторингу, варто згадати новітні методи аналізу, що впроваджуються для підвищення ефективності хімічного контролю. Одним з таких напрямів є перехід від «ручних» методик до проточних методів аналізу (FIA – Flow Injection Analysis). Натомість проточні аналізатори дозволяють автоматизувати хімічний аналіз проб, зменшити об'єм реагентів і відходів та забезпечити безпечніші умови (оператор менше контактує з радіоактивними матеріалами). Перехід від періодичних batch-аналізів до безперервного або частого on-line аналізу дозволяє раніше помітити появу небажаних домішок. Таким чином, одним з інноваційних напрямів є впровадження в системах моніторингу сучасних аналітичних приладів – автоматичних титраторів, лазерних спектрометрів для контролю гідразину чи аміаку, проточних радіохімічних аналізаторів на основі сцинтиляційних детекторів тощо. Інший важливий технологічний тренд – використання систем дистанційного спостереження та раннього виявлення. Наприклад, для контролю довілля навколо АЕС застосовуються автоматизовані станції, що передають дані по радіоканалу в центр. В Литві на Ігналінській АЕС (на етапі зняття з експлуатації) працює система моніторингу, де всі викиди в атмосферу контролюються автоматичними приладами одночасно на вміст радіоактивних і хімічних компонентів [13].

Новітні ІАС можуть також включати геоінформаційні системи (GIS-модулі), які відображають екологічну обстановку на електронній карті місцевості в околицях АЕС. Це наочно показує, де саме може виникнути перевищення нормативів, і дозволяє простежити просторовий розподіл забруднення (наприклад, шлейф нагрітої води у водоймі-охолоджувачі чи напрямок поширення викидів при певному вітрі). Деякі сучасні системи також інтегрують моделі розповсюдження домішок: при надходженні даних про перевищення, одразу ж запускається розрахунок прогнозу – куди поширяться забруднення через 1, 2, 6 годин

тощо, щоб можна було вчасно попередити населення.

Зі зростанням ролі штучного інтелекту з'являються пропозиції використовувати машинне навчання в аналізі екологічних даних АЕС. Алгоритми можуть навчитися розпізнавати складні закономірності – наприклад, виявляти вплив режимів роботи реактора на вміст корозійних продуктів, або прогнозувати заздалегідь сезонні коливання хімпоказників у водоймах (цвітіння води, зміни вмісту розчиненого кисню) і давати рекомендації по оптимізації роботи охолоджувальних систем. Хоча поки такі AI-рішення ще знаходяться в стадії досліджень, їх потенціал великий: від підвищення точності прогнозів до зменшення фальшивих тривог у системі (алгоритм може фільтрувати шум вимірювань і реагувати лише на статистично значущі зміни).

Таким чином, сучасні ІАС хімічного моніторингу АЕС розвиваються у напрямку більшої автоматизації, інтеграції та інтелектуалізації. Світовий досвід (Франція, США, Японія, Румунія та ін.) демонструє позитивні ефекти від впровадження таких систем: зниження впливу людського фактору, своєчасне виявлення відхилень, скорочення часу реагування на потенційні проблеми та прозору екологічну інформацію для усіх зацікавлених сторін.

Висновок

У статті обґрунтовано, що розвиток інтегрованих інформаційно-аналітичних систем хімічного моніторингу атомних електростанцій є ключовою передумовою підвищення рівня екологічної безпеки та сталого функціонування ядерної енергетики в сучасних умовах. Показано, що ефективний екологічний контроль діяльності АЕС повинен базуватися на комплексному підході, який поєднує радіаційний і хімічний моніторинг, а також враховує технологічні, природоохоронні та інформаційні аспекти експлуатації об'єктів ядерної енергетики.

Проаналізовано міжнародні та національні нормативно-правові вимоги у сфері моніторингу довілля на АЕС і встановлено, що сучасні рекомендації МАГАТЕ, директиви ЄС та національне законодавство орієнтовані на інтеграцію різномірних даних, підвищення автоматизації

контролю та забезпечення прозорості екологічної інформації. Визначено, що гармонізація національних підходів з міжнародними стандартами потребує впровадження єдиних інформаційних платформ, здатних підтримувати повний життєвий цикл даних моніторингу – від вимірювання до аналітичної обробки і звітності.

Запропоновано концептуальні етапи побудови інтегрованої інформаційно-аналітичної системи хімічного моніторингу АЕС, що охоплюють аналіз вимог, проєктування архітектури, розробку програмного забезпечення, впровадження, введення в експлуатацію та подальший супровід. Показано, що поетапне впровадження таких систем із забезпеченням надійності, кіберзахисту та сумісності з існуючими автоматизованими системами АЕС є оптимальним шляхом модернізації екологічного контролю.

Узагальнення світового досвіду підтвердило ефективність використання сучасних технологічних рішень, зокрема онлайн-аналізаторів, проточних методів аналізу, дистанційних постів спостереження, геоінформаційних систем і елементів інтелектуального аналізу даних. Доведено, що такі рішення сприяють своєчасному виявленню відхилень у водно-хімічному режимі та параметрах довкілля, зменшенню екологічних ризиків і підвищенню оперативності управлінських рішень у штатних і позаштатних режимах роботи АЕС.

Зроблено висновок, що впровадження інтегрованих інформаційно-аналітичних систем хімічного моніторингу є не лише технічним, а й організаційно-нормативним завданням, яке потребує координації між експлуатуючими організаціями, регуляторними органами та науковими установами. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення методів інтелектуального аналізу даних, прогнозування екологічних показників та оцінювання ефективності інтегрованих систем моніторингу з урахуванням специфіки національних АЕС і вимог міжнародних стандартів.

Список використаних джерел

1. Soto G.H., Martinez-Cobas X. Nuclear energy generation's impact on the CO₂ emissions and ecological footprint among European Union countries. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 945. 173844. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173844>
2. Попов О.О. Вплив АЕС на екологічну безпеку прилеглих територій. Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. 2014. Вип. 70. С. 11–20.
3. Huang Y.J., Sun X.F., Guo G.Y. et al. Review of potential online monitoring technologies for environmental tritium around nuclear power plant. *J Radioanal Nucl Chem*. 2025. Vol. 334. P. 4433–4456. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-025-10192-1>
4. Kuznietsov P.; Biedunkova O.; Pryshchepa A.; Yaroshchuk O. Evaluation of Water Quality's Influence on the Water Discharge of a Nuclear Power Plant (Non-Radiative Impact Factor). *Eng. Proc*. 2024. Vol. 67. 3. DOI: <https://doi.org/10.3390/engproc2024067003>
5. International Atomic Energy Agency, Publications advanced search, 2025. URL: <https://www.iaea.org/publications/search/topics/safety-standards>
6. Nuclear Regulatory Commission. Backgrounder on Environmental Monitoring at Nuclear Power Plants. 2021. URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/env-monitoring>
7. Radiation Monitoring for Protection of the Public and the Environment. DRAFT SAFETY GUIDE DS505. 2024. Vienna: International Atomic Energy Agency. URL: <https://surli.cc/ieqvg>
8. General Safety Guide No. GSG-8: Radiation Monitoring for Protection of the Public and the Environment. Vienna: International Atomic Energy Agency. 2018. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1781_web.pdf
9. Akkuyu to have real-time discharge water monitoring system. 2025. URL: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/akkuyu-to-have-real-time-discharge-water-monitoring-system>
10. Fourth National Report on Compliance with the Joint Convention Obligations. 2011. URL: <https://www.iaea.org/sites/default/files/france-jointconventionnationalreport2012.pdf>
11. Metrohm AG. Online analysis of boric acid in the cooling water of pressurized water reactors. URL: <https://surli.cc/miyrjr>
12. Innovation, Advances and Developments in the Water Chemistry Monitoring of Nuclear Power Plants, Vienna: International Atomic Energy Agency. 2025. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE-2099web.pdf>
13. Decommissioning of the Ignalina NPP. Lithuania. 2025. URL: <https://surli.cc/drwojl>

ПЕРСПЕКТИВИ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

Коцюбинський А. О., Линник Д. О., Грицуляк Г. М.,
Запухляк Н. М., Качала С. В., Фомічова О. В.
Івано-Франківський національний
університет нафти і газу

Збільшення обсягів викидів парникових газів у світі спричиняє посилення кліматичних змін і формує глобальний запит на декарбонізацію економіки. Промисловий сектор залишається одним із головних джерел антропогенного навантаження на атмосферу, що зумовлює необхідність впровадження низьковуглецевих технологій виробництва. Для України, яка характеризується високою енергоємністю економіки та значною часткою промислових викидів, перехід до декарбонізованих моделей розвитку є не лише екологічною вимогою, а й стратегічною умовою інтеграції у європейський економічний простір. Водночас наявність потужного потенціалу відновлюваної енергетики, вигідне географічне положення та розвинена інфраструктура створюють перспективи для формування в Україні конкурентоспроможного водневого сектору як складової енергетичної трансформації.

У статті досліджено перспективи розвитку водневої енергетики як ключового інструменту декарбонізації промисловості. Проаналізовано потенціал України щодо виробництва «зеленого» водню з використанням відновлюваних джерел енергії та можливості інтеграції у європейський водневий ринок.

Проведено SWOT-аналіз впровадження водневих технологій у промисловому секторі, що дозволило визначити основні конкурентні переваги, обмеження, ризики та можливості формування національного водневого сектору. Встановлено, що впровадження водневих технологій забезпечує значний потенціал скорочення викидів CO₂ та може бути економічно доцільним для окремих галузей.

Ключові слова: викиди, воднева енергетика, зелений водень, декарбонізація, промисловість, оцінка.

PROSPECTS FOR HYDROGEN ENERGY IN THE DECARBONIZATION OF UKRAINE'S INDUSTRY

Kotsyubynsky A. O., Lynnyk D. O., Hrytsulyak G. M.,
Zapukhliak N. M., Kachala S. V., Fomichova O. V.

Ivano-Frankivsk National
University of Oil and Gas

The increase in global greenhouse gas emissions is causing climate change to intensify and creating a global demand for the decarbonization of the economy. The industrial sector remains one of the main sources of anthropogenic pressure on the atmosphere, which necessitates the introduction of low-carbon production technologies. For Ukraine, which is characterized by a highly energy-intensive economy and a significant share of industrial emissions, the transition to decarbonized development models is not only an environmental requirement but also a strategic condition for integration into the European economic space. At the same time, the availability of powerful renewable energy potential, a favorable geographical location, and developed infrastructure create prospects for the formation of a competitive hydrogen sector in Ukraine as part of the energy transformation. The article explores the prospects for the development of hydrogen energy as a key tool for decarbonizing industry. It analyzes Ukraine's potential for producing «green» hydrogen using renewable energy sources and the possibilities for integration into the European hydrogen market. A SWOT analysis of the implementation of hydrogen technologies in the industrial sector was conducted, which made it possible to identify the main competitive advantages, limitations, risks, and opportunities for the formation of a national hydrogen sector. It has been established that the introduction of hydrogen technologies offers significant potential for reducing CO₂ emissions and may be economically viable for certain industries.

Keywords: emissions, hydrogen energy, green hydrogen, decarbonization, industry, assessment.

Постановка проблеми

Глобальна енергетична система перебуває на етапі фундаментальної трансформації, зумовленої необхідністю досягнення кліматичної нейтральності та радикального скорочення викидів парникових газів. Промисловий сектор, що генерує значну частку світових викидів CO₂, потребує глибокої декарбонізації, особливо в галузях, які важко піддаються електрифікації. У цьому контексті водень розглядається як один із ключових енергоносіїв майбутнього, здатний забезпечити перехід важкої промисловості на низьковуглецеві технології. Європейський Союз визначив розбудову водневої економіки як стратегічний пріоритет у рамках реалізації Європейського зеленого курсу. Україна володіє унікальним поєднанням факторів, що створюють сприятливі передумови для становлення потужного водневого сектору: значний потенціал відновлювальної енергетики, розвинута газотранспортна інфраструктура для транспортування водню, та наявність великих промислових споживачів у металургійному, хімічному та нафтопереробному секторах. Водночас українська промисловість залишається однією з найбільш енергоємних та вуглецевомістких в Європі. Прийняття Україною кліматичних зобов'язань та впровадження механізму транскордонного вуглецевого коригування створюють необхідність системної трансформації промислового виробництва. Модернізація застарілих технологій з впровадженням водневих альтернатив дозволить не лише виконати кліматичні зобов'язання, а й забезпечити технологіч-

ний прорив та залучення інвестицій у рамках повоєнного відновлення економіки. За цих умов набуває актуальності комплексна наукова оцінка перспектив використання водневої енергетики для декарбонізації різних секторів української промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Глобальна зміна клімату, спричинена масштабними викидами парникових газів, визначає критичну необхідність декарбонізації та трансформації енергетичних систем.

Стратегічний курс на відмову від викопних енергоносіїв стає пріоритетом національних кліматичних політик, спрямованих на досягнення сталого розвитку. Європейський Союз та Україна імплементують комплексні стратегії зі скорочення емісій парникових газів, у яких водневі технології розглядаються як ключовий інструмент енергетичної трансформації. [3].

Водневі паливні елементи характеризуються екологічною чистотою та високими показниками енергоефективності, проте їх широкомасштабне впровадження обмежується викликами технологічного масштабування та розбудови відповідної інфраструктури. Критичним фактором розвитку водневої енергетики є забезпечення безпеки на всіх етапах життєвого циклу, що охоплює контроль займистості, системи детектування витоків та розробку протоколів аварійного реагування. Водень як енергоносіє знаходить різноманітне застосування в економіці: від довгострокового зберігання надлишкової енергії та зниження промислових викидів до стабілізації електричних мереж [6].

Водень посів ключове місце у світових стратегіях досягнення вуглецевої нейтральності завдяки своїй багатофункціональності, можливості масштабування та здатності інтегруватися в різні енергетичні системи. Як екологічно чистий енергоносіє, він дає змогу розмежувати генерацію енергії з відновлюваних джерел і її споживання, може використовуватися в складних для декарбонізації галузях – зокрема у важкій промисловості та авіації – а також виступає ефективним засобом довготривалого накопичення енергії [4,5]. Прогнозується суттєве зростання обсягів виробництва водню в найближчі десятиліття: до 2030

року вони перевищать 30 млн т, а до 2050 року сягнуть понад 100 млн т в обох розглянутих сценаріях. Водночас підтверджується багатофункціональна роль водню у процесах декарбонізації європейської енергетичної системи, зокрема для секторів транспорту й промисловості, що важко піддаються зниженню викидів. Виробництво водню в Європі ґрунтуватиметься на різноманітному технологічному поєднанні, яке охоплює як відновлювані, так і низьковуглецеві рішення [7]. Наразі в Україні виробляється близько 360 тис. тонн водню на рік, який переважно використовується для синтезу аміаку. Це становить лише приблизно 0,5 % від світового попиту. Водночас за умови технологічного розвитку та залучення інвестицій Україна має потенціал суттєво наростити обсяги виробництва водню. [1].

Центральні директиви Європи, зокрема «Енергетична системна інтеграція. Водень» Європейської комісії та «Зелений водень для Європейської зеленої угоди: Ініціатива 2x40 ГВт», визначають Україну як стратегічного партнера в розвитку відновлюваного водню. Ці стратегічні документи передбачають будівництво до 10 ГВт електролізних потужностей в Україні до 2030 р., що призначені для виробництва відновлюваного водню. Близько 1,8 ГВт цієї потужності припадає на внутрішній ринок, переважно для виробництва зеленого аміаку, критичного товару для агропромислового комплексу. У цих документах [30, 31] Україна вважається пріоритетним партнером. Дорожня карта передбачає будівництво до 2030 року електролізерних потужностей на 40 ГВт у країнах Північної Африки, зокрема в Україні [9,31].

Вона пропонує створити 7,5 ГВт потужностей для внутрішнього ринку, в основному призначених для виробництва зеленого аміаку, та 32,5 ГВт для експортного ринку – переважно для трубопровідного експорту до країн Європейського Союзу, близько 3 млн тонн або 118 ТВт·год водню у 2030 році, що становить 17% від загального ринку водню в ЄС у 2030 році.

У зазначених вище документах [30, 31] підкреслюється та висвітлюється роль України у досягненні цілей Європейського зеленого курсу. У них згадується можливість побудови до 10 ГВт встановленої потужності електролізерів для виробництва відновлюваного водню, з яких 1,8 ГВт

призначені для внутрішнього ринку України, зокрема для виробництва зеленого аміаку [2].

Пріоритетні напрямки технологічного розвитку зеленого водню охоплюють чотири ключові сфери: вдосконалення електролізних методів виробництва (лужний, мембранний PEM, твердооксидний) з акцентом на підвищення ефективності конверсії та зниження капітальних витрат; дослідження альтернативних виробничих технологій, включаючи термохімічну деструкцію, фотокаталітичні процеси, біологічну ферментацію та низькоемісійний піроліз метану; розробку інноваційних рішень для акумулювання та логістики через компресійні системи, кріогенне скраплення та хімічні носії типу аміаку або рідких органічних сполук; диверсифікацію кінцевого застосування у важкій індустрії, хімічному синтезі, транспортному секторі та розподіленій генерації. [8].

Визначення цілей статті (постановка завдання)

Мета дослідження – оцінити перспективи впровадження водневих технологій у ключових секторах промисловості України.

Завдання дослідження:

- 1) проаналізувати потенціал розвитку водневої енергетики в Україні в контексті європейських ініціатив;
- 2) виконати SWOT-аналіз конкурентних переваг та бар'єрів для становлення водневого сектору;

3) здійснити порівняльну економічну оцінку собівартості виробництва в основних галузях промисловості при використанні традиційних та водневих технологій.

Виклад основного матеріалу дослідження

Реалізація водневого потенціалу України як інструменту декарбонізації промисловості вимагає комплексного наукового обґрунтування, що охоплює як стратегічні передумови, так і конкретні техніко-економічні параметри трансформації окремих виробничих секторів.

Україна володіє унікальним поєднанням природних, географічних та інфраструктурних передумов для становлення потужного водневого сектору та інтеграції у європейську водневу економіку.

Впровадження зеленого водню в промисловості України має значний потенціал для скорочення викидів вуглекислого газу, що є критичним для досягнення національних кліматичних зобов'язань та інтеграції у європейський екологічний простір. Заміщення традиційних викопних енергоносіїв зеленим воднем у ключових промислових секторах дозволить скоротити сумарні викиди CO₂ на понад 65 млн тонн на рік, що становить близько 83% від поточного рівня емісій досліджуваних галузей (Рис.1).

Горизонтальний стовпчиковий графік візуалізує абсолютний потенціал скорочення викидів

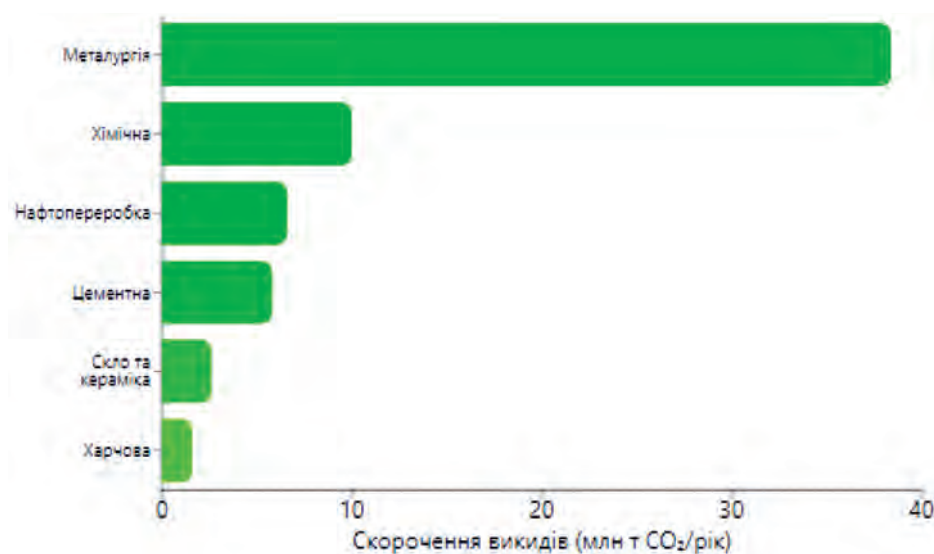


Рисунок 1. Скорочення викидів CO₂ при впровадженні технологій зеленого водню

*Джерело: розроблено авторами

CO₂ (млн т/рік) у шести ключових галузях промисловості України при впровадженні водневих технологій. Металургія демонструє найбільший потенціал декарбонізації на рівні близько 38-39 млн т CO₂/рік, що становить понад 60% від сумарного ефекту всіх представлених секторів, тоді як хімічна промисловість (10 млн т), нафтопереробка (6-7 млн т) та цементна галузь (5-6 млн т) займають наступні позиції. Виробництво скла та кераміки (2-3 млн т) і харчова промисловість (1-2 млн т) мають найменші абсолютні показники скорочення.

Стратегічне розташування України на перехідній енергетичних коридорів між Європою та Азією, поєднане зі значним потенціалом відновлювальної енергетики, створює сприятливі умови для розвитку водневого виробництва та транзиту. Україна має всі необхідні передумови для трансформації від імпортера енергоресурсів до експортера "зеленого" водню, що відкриває можливості для технологічної модернізації економіки та зміцнення енергетичної незалежності. Поєднання потужного відновлювального потенціалу, існуючої індустріальної бази та європейської інтеграційної перспективи робить Україну природним кандидатом на роль регіонального водневого хабу у Східній Європі. На рисунку 2 відображено структуру відновлюваної енергетики України.

Станом на 2023-2024 рік відновлювальні джерела енергії складають приблизно 12-15% від

загальної встановленої потужності електроенергетики України. Сонячна енергетика (СЕС) домінує у структурі відновлювальної енергетики України, займаючи 52-55% від загальної потужності ВДЕ, тоді як вітрова енергетика (ВЕС) посідає друге місце з часткою 30-33%, переважно зосереджена у прибережних та степових регіонах. Гідроенергетика (10-12%) та біомаса (3-5%) представлені значно меншими частками, що відображає їх обмежений розвиток порівняно з сонячною та вітровою генерацією.

Водночас реалізація водневого потенціалу України стримується комплексом внутрішніх обмежень та зовнішніх викликів, що вимагають системного підходу до їх подолання. У таблиці 1 наведено SWOT-аналіз перспективи впровадження водневих технологій та використання зеленого водню у промисловості України.

SWOT-аналіз виявляє, що Україна володіє суттєвими конкурентними перевагами для становлення водневої економіки завдяки природним умовам для генерації відновлювальної електроенергії, наявності транспортних магістралей та промислових споживачів, а також вигідному географічному розташуванню щодо європейських ринків збуту; водночас країна стикається з критичною залежністю від імпортних технологій, значним розривом у собівартості порівняно з традиційними методами та необхідністю масштабної модернізації виробничих потужностей; перспективи пов'язані з можливістю інтеграції у

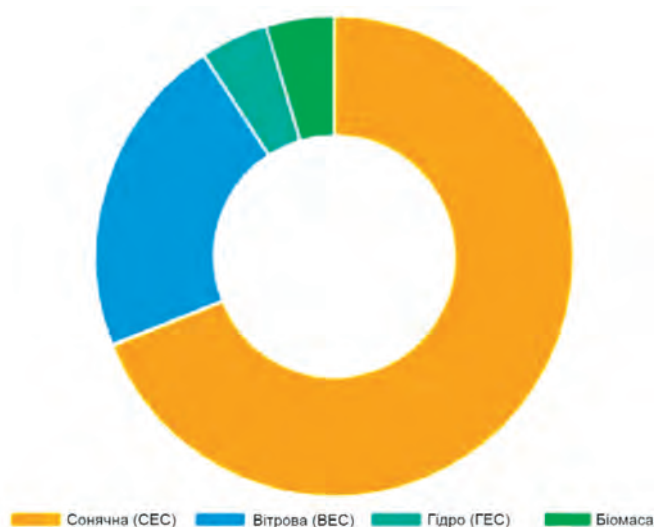


Рисунок 2. Структура відновлюваної енергетики України

*Джерело: розроблено авторами

Таблиця 1

SWOT-аналіз зеленого водню у промисловості України

Сильні сторони: 1. Значний потенціал відновлювальної енергетики для виробництва "зеленого" водню методом електролізу; 2. Промисловий потенціал та існуюче споживання водню; 3. Розвинута газотранспортна система 4. Прямий доступ доєвропейського ринку; 5. Уникнення вуглецевого податка 6. Зменшення викидів CO₂.	Слабкі сторони: 1. Відсутність власного виробництва обладнання; 2. Висока вартість 3. Потреба адаптації інфраструктури 4. Застаріла промислова база
Можливості: 1. Ринкові перспективи; 2. Декарбонізація промисловості 3. Енергетична незалежність 4. Технологічний розвиток.	Загрози: 1. Зруйнована інфраструктура; 2. Швидке застарівання обладнання; 3. Повільне прийняття законодавства; 4. Потреба значного фінансування по початкових етапах.

*Джерело: розроблено авторами

європейський енергетичний простір, трансформацією важкої індустрії та формуванням нового високотехнологічного сектору економіки; ключові ризики зумовлені воєнними обставинами, що руйнують базову інфраструктуру, недосконалістю правового середовища та глобальною конкуренцією за інвестиційні ресурси й технологічне лідерство.

Для визначення економічної доцільності впровадження водневих технологій було здійснено порівняльний аналіз собівартості виробництва в основних галузях промисловості України при використанні традиційних енергоносіїв та зеленого водню з урахуванням відповідних екологічних платежів та вуглецевого оподаткування (Рис. 3).

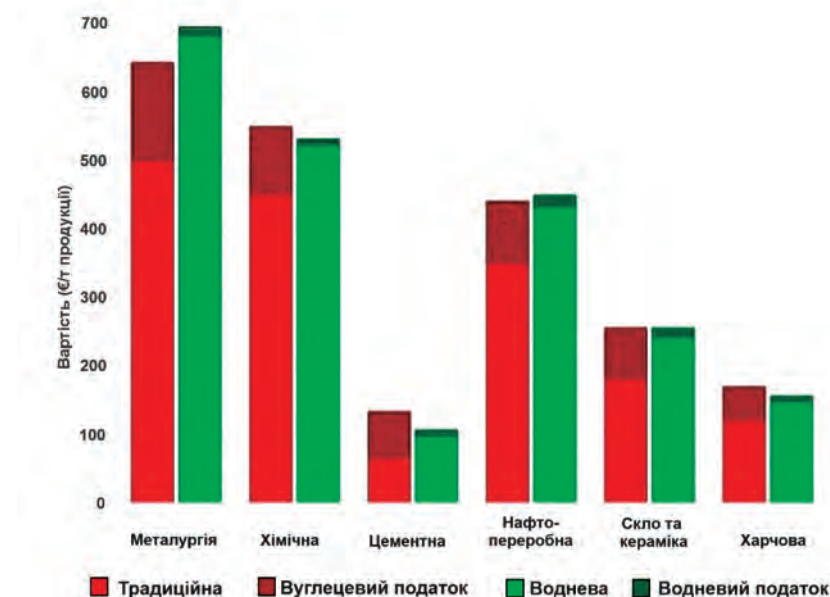


Рисунок 3. Собівартість виробництва промисловості України

*Джерело: розроблено авторами

На графіку представлено порівняльний аналіз собівартості виробництва в основних галузях промисловості України при використанні традиційних технологій та водневих альтернатив з урахуванням відповідних податків. Найбільші витрати спостерігаються в металургійному секторі, де собівартість традиційного виробництва становить близько 640 млн євро на рік, а з урахуванням вуглецевого податку зростає до 680 млн євро. При переході на воднеї технології вартість дещо збільшується до 700 млн євро включно з водневим податком. Хімічна промисловість демонструє другий за величиною показник із собівартістю близько 560 млн євро для традиційних технологій та 540 млн євро для водневих, що свідчить про певну економічну привабливість водневої альтернативи. Найбільший економічний потенціал для декарбонізації виявляється в цементній промисловості, де перехід на водневі технології дозволяє знизити собівартість зі 130 млн до 110 млн євро на рік. Нафтопереробна галузь показує приблизно однакові показники для обох технологій на рівні 450-460 млн євро, тоді як виробництво скла та кераміки (260-250 млн євро) і харчова промисловість (170-160 млн євро) також демонструють незначну економічну перевагу водневих технологій.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Проведене дослідження підтверджує значний потенціал країни для розвитку водневої економіки та інтеграції у європейський водневий простір. Україна володіє унікальним поєднанням сприятливих факторів, що створюють основу для становлення потужного водневого сектору: значний технічний потенціал відновлювальної енергетики, розвинена газотранспортна інфраструктура, існуюче промислове споживання водню та стратегічне географічне розташування. SWOT-аналіз виявив, що конкурентні переваги країни дозволяють розглядати Україну як потенційного регіонального водневого хабу, здатного забезпечити значну частку європейського попиту на «зелений» водень.

Економічний аналіз собівартості виробництва в ключових галузях промисловості демонструє диференційовану, але загалом позитивну карти-

ну доцільності впровадження водневих технологій з урахуванням вуглецевого оподаткування.

Оцінка екологічного ефекту виявляє значний потенціал скорочення викидів парникових газів через впровадження водневих технологій у промисловості. Металургія забезпечує найбільший абсолютний внесок у декарбонізацію, що підкреслює критичну важливість цього сектору для досягнення національних кліматичних цілей. Високий та стабільний відсоток можливого скорочення викидів у всіх досліджуваних галузях підтверджує універсальну ефективність водневих технологій як інструменту промислової трансформації. Водночас реалізація водневого потенціалу стримується комплексом бар'єрів технологічного, економічного та інституційного характеру, що вимагає системної державної політики та міжнародної підтримки.

Список використаних джерел

1. Криль, Я. М., Паюк, С. О., Рєпкін, О. О., Кузьменко, С. О., Паламарчук, В. О., & Свіденко, К. І. (2023). Стан та перспективи використання відновлюваного водню в Україні: вплив на промисловість та шляхи декарбонізації економіки. *Мінеральні ресурси України*, (2), 12-16. <https://doi.org/10.31996/mru.2023.2.12-16>
2. Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 GW Initiative. <https://hydrogen.ua/images/about/Green-Hydrogen-for-a-European-Green-Deal.-A-2x40-GW-Initiative.pdf>
3. Myskiv, G., & Ivanytskyi, R. (2024). DECARBONIZATION AS A KEY TO SUSTAINABLE DEVELOPMENT: CHALLENGES AND PROSPECTS OF THE EU AND UKRAINE. *Financial & Credit Activity: Problems of Theory & Practice*, 3(56). <https://doi.org/10.55643/fcaptop.3.56.2024.4397>
4. Vogar, M., El-Sagerd, A., & Al-Khalid, N. (2025). *Hydrogen Energy: Pathways, Technologies, and Global Prospects for a Decarbonized Future. Energy Conversions, 2025 – Volumes 4.*
5. Ameli, H., Strbac, G., Pudjianto, D., & Ameli, M. T. (2024). A review of the role of hydrogen in the heat decarbonization of future energy systems: Insights and perspectives. *Energies*, 17(7), 1688. <https://doi.org/10.3390/en17071688>
6. Shukla, A. K., Gautam, R., Chaudhary, S., Srivastava, A. K., Kumar, A., Singh, S., & Maurya, P.

K. (2024). Hydrogen energy: Addressing challenges and exploring future prospects. In *Hydrogen Energy* (pp. 34-45). CRC Press.

7. Seck, G. S., Hache, E., Sabathier, J., Guedes, F., Reigstad, G. A., Straus, J., ... & Cabot, C. (2022). Hydrogen and the decarbonization of the energy system in europe in 2050: A detailed model-based analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112779. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112779>

8. Franco, A. (2025). Green Hydrogen and the Energy Transition: Hopes, Challenges, and Realistic Opportunities. *Hydrogen*, 6(2), 28. <https://doi.org/10.3390/hydrogen6020028>

9. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. (2024). Статистичні дані про розвиток відновлювальної енергетики в Україні <https://saee.gov.ua/>

References

1. Kryl, Ya. M., Paiuk, S. O., Riepin, O. O., Kuzmenko, S. O., Palamarchuk, V. O., & Svidenko, K. I. (2023). Stan ta perspektyvy vykorystannia vidnovliuvanoho vodniu v Ukraini: vplyv na promyslovist ta shliakhy dekarbonizatsii ekonomiky. *Mineralni resursy Ukrainy*, (2), 12-16. <https://doi.org/10.31996/mru.2023.2.12-16>

2. Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 GW Initiative. <https://hydrogen.ua/images/about/Green-Hydrogen-for-a-European-Green-Deal.-A-2x40-GW-Initiative.pdf>

3. Myskiv, G., & Ivanytskyi, R. (2024). DECARBONIZATION AS A KEY TO SUSTAINABLE

DEVELOPMENT: CHALLENGES AND PROSPECTS OF THE EU AND UKRAINE. *Financial & Credit Activity: Problems of Theory & Practice*, 3(56). <https://doi.org/10.55643/fcaptop.3.56.2024.4397>

4. Vogar, M., El-Sagerd, A., & Al-Khalid, N. (2025). *Hydrogen Energy: Pathways, Technologies, and Global Prospects for a Decarbonized Future. Energy Conversions*, 2025 – Volumes 4.

5. Ameli, H., Strbac, G., Pudjianto, D., & Ameli, M. T. (2024). A review of the role of hydrogen in the heat decarbonization of future energy systems: Insights and perspectives. *Energies*, 17(7), 1688. <https://doi.org/10.3390/en17071688>

6. Shukla, A. K., Gautam, R., Chaudhary, S., Srivastava, A. K., Kumar, A., Singh, S., & Maurya, P. K. (2024). Hydrogen energy: Addressing challenges and exploring future prospects. In *Hydrogen Energy* (pp. 34-45). CRC Press.

7. Seck, G. S., Hache, E., Sabathier, J., Guedes, F., Reigstad, G. A., Straus, J., ... & Cabot, C. (2022). Hydrogen and the decarbonization of the energy system in europe in 2050: A detailed model-based analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112779. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112779>

8. Franco, A. (2025). Green Hydrogen and the Energy Transition: Hopes, Challenges, and Realistic Opportunities. *Hydrogen*, 6(2), 28. <https://doi.org/10.3390/hydrogen6020028>

9. Derzhavne ahentstvo z enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennia Ukrainy. (2024). Statystychni dani pro rozvytok vidnovliuvalnoi enerhetyky v Ukraini <https://saee.gov.ua/>

МАЛІ МОДУЛЬНІ ЯДЕРНІ РЕАКТОРИ В УКРАЇНІ: ЕКОЛОГІЧНИЙ КОНТЕКСТ

Редька І. М., Волошина Н. О.

Український державний університет

імені Михайла Драгоманова

вул. Пирогова, 9 м. 01601 Київ

VoloshynaNatali@gmail.com

24prf.i.redka@std.udu.edu.ua

Анотація

В роботі наведено аналіз технічних та екологічних переваг щодо перспективного використання малих модульних реакторів (ММР), як елемента заміни інших видів генерації електроенергії в кризових умовах енергетичного дефіциту в Україні. Пошук шляхів енергонезалежності ґрунтується на кліматичних цілях ЄС, Паризькій угоді та місії проєкту Green deal Ukraina.

Малі модульні реактори сьогодні визначають як один із перспективних напрямів розвитку ядерної енергогенерації, зокрема, в умовах повного відновлення, значного попиту на електроенергію, зростання запиту на енергетичну безпеку і низьковуглецеву енергетику в контексті заходів щодо боротьби зі змінами клімату.

Представлено базовий сценарій розгортання малих модульних станцій по роках із сукупною потужністю від 0,3 ГВт у 2030 р. до 8,4 ГВт у 2050 р.

Проведено оцінку «кліматичного дивіденду» та розрахунок уникнення викидів CO₂ на період до 2050 року, та досягнення показника в 57144,7 млн т CO₂/рік.

Визначено переваги використання ММР: менший розмір, «модульна» структура, більша гнучкість щодо регулювання потужності, високий рівень пасивної безпеки, швидкість у будівництві та введенні в експлуатацію, маневреність обладнання, децентралізація енергосистеми, які дозволяють розглядати ММР як додаткові варіанти енергогенерації в Україні.

Висвітлено екологічні аспекти, як розширення переліку місць потенційного розташування ММР з урахуванням фізико-географічних зон України, цінних для збереження природоохоронних територій, рекреаційних зон та соціальної інфраструктури, визначення зони впливу проєктованого об'єкту, розробка ефективної системи моніторингу та контролю експлуатації ММР, поводження з відходами.

Окреме питання залишається за законодавчим унормуванням впровадження ММР, зокрема, процедури оцінки впливу на довкілля, післяпроєктного моніторингу, оцінювання кумулятивних впливів нової діяльності.

Ключові слова: малий модульний реактор, атомна електростанція, викиди CO₂.

SMALL MODULAR NUCLEAR REACTORS IN UKRAINE: ENVIRONMENTAL CONTEXT

Redka I. M., Voloshyna N. O.
Ukrainian State University named
after Mykhaylo Drahomanov

Abstract

The paper provides an analytical assessment of the technical and environmental advantages associated with the prospective deployment of Small Modular Reactors (SMRs) as a complementary alternative to traditional electricity-generation technologies under crisis conditions of energy scarcity in Ukraine. The search for pathways toward energy independence is grounded in the EU climate objectives, the Paris Agreement, and the mission of the Green Deal Ukraine initiative.

Small Modular Reactors (SMRs) are currently recognised as one of the most promising directions in the development of nuclear power generation, particularly in the context of post-war recovery, rapid growth in electricity demand, increasing requirements for energy security, and the expansion of low-carbon energy solutions amid global climate-change mitigation efforts.

A baseline scenario for the deployment of small modular nuclear plants across Ukraine is presented, projecting a cumulative installed capacity from 0.3 GW in 2030 to 8.4 GW in 2050.

A «climate dividend» assessment and CO₂-emission-avoidance estimation were conducted for the period up to 2050, indicating a potential reduction of 57,144.7 million tonnes of CO₂ per year.

The advantages of using SMRs have been identified: smaller size, modular design, greater flexibility in power regulation, a high level of passive safety, faster construction and commissioning, equipment maneuverability, and power system decentralization, which make it possible to consider SMRs as additional electricity generation options in Ukraine.

Environmental aspects are examined through an expanded spatial assessment of potential SMR siting locations, taking into account Ukraine's diverse physiographic zones, the need to preserve protected natural areas, recreational territories, and social infrastructure. The paper also highlights considerations related to impact-zone delineation, the design of effective monitoring and operational control systems, and the management of radioactive waste.

A separate set of challenges concerns the legislative and regulatory framework for SMR deployment, including environmental-impact assessment procedures, post-project monitoring obligations, and the evaluation of cumulative impacts arising from new nuclear activities.

Keywords: small modular reactor, nuclear power plant, CO₂ emissions

Складна ситуація з енергозабезпеченням в Україні, яка виникла внаслідок російської агресії, спрямувала зусилля дослідників на пошук альтернативних варіантів задля забезпечення енергонезалежності, стабільної генерації та розподілення електроенергії [1, 394-399]. В основі пошуку нових підходів з енергозабезпечення лежить оновлена стратегія низьковуглецевого розвитку (СНВР) України до 2050 року, яка включає більш актуальні політики, заходи та інструменти для забезпечення «зеленого» відновлення економіки з урахуванням викликів пов'язаних з війною та відповідає кліматичним цілям ЄС та Паризькій угоді.

Європейський «зелений курс» (Green deal) має на меті досягнення кліматичної нейтральності. Зокрема, проєкт Green deal Ukraine (GDU), який

розпочався у 2023, визначив місії серед яких стала реконструкція енергетичної системи України і декарбонізація енергетичної системи та економіки України.

З метою досягнення кліматичної нейтральності економіки України було розроблено 3 сценарії декарбонізації, а саме:

1. WEM (With Existing Measures – з існуючими заходами) (оновлений сценарій Національного плану з енергетики та клімату – NECP);

2. WAM (With Additional Measures – з додатковими заходами) (оновлений сценарій NECP);

3. Сценарій NZE (Net Zero Emissions – чистий нульовий викид) (новий сценарій) [2, С. 34-42].

Малі модульні реактори (ММР) або (SMR) (англ. Small Modular Reactors) сьогодні розглядають як один із перспективних варіантів заміщення вугільних ТЕС, що здатні знизити системні витрати резервування відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), забезпечити комунальне та промислове тепло, а також надати гнучкість для електронасичених регіонів [3, 4]. Тож, доцільно дослідити екологічний контекст і наслідки для навколишнього середовища будівництва і введення в експлуатацію ММР, аналізуючи їх вплив на два компоненти навколишнього середовища: викиди CO₂ та екологічний слід.

Матеріали і методи

В роботі використовувались методи аналізу джерел науково-технічної літератури, законодавчої бази України, присвяченій забезпеченню енергонезалежності енергосистеми за допомогою малих модульних реакторів, та результати комп'ютерного моделювання, оцінку кліматичного дивіденду.

Оцінку «кліматичного дивіденду» виконано для заміщення вугілля/газу з урахуванням CF та поступової деградації факторів. Базова формула: $\text{Avoided} = \text{Generation} \times (\text{EF}_{\text{ref}} - \text{EF}_{\text{SMR}})$, де $\text{Generation} = \text{Capacity} \times \text{CF} \times 8760$. Для довідки взято EF_{ref}: вугілля 0,8–1,1 тCO₂/МВт·год; газ 0,35–0,5; для SMR/AEC – 0,005–0,02 (LCA).

Результати дослідження

Визначені стратегією Європейського «зеленого курсу», скорочення викидів парникових газів

та вирішення екологічних проблем, визначають ядерну енергетику як таку, що сприяє пом'якшенню вуглецевої залежності [5]

Малими модульними реакторами згідно з визначенням МАГАТЕ, вважаються ядерні реактори з вихідною електричною потужністю від 10 МВт(е) до 300 МВт(е) [6].

За класифікацією ММР поділяють на легководні (NuScale, BWRX-300, SMR-160); високотемпературні газоохолоджувані (HTGR); швидкі (SFR/LFR); розплавлено-сольові (MSR). Їх об'єднують характеристики пасивної безпеки – природна циркуляція, гравітаційне відведення тепла, довготривале утримання реактивності без зовнішнього живлення. Підземне або захищене розміщення та спрощена конфігурація систем мінімізують ризики аварій зі значним радіусом контамінації навколишніх територій [1, 394-399].

Серед переваг ММР відзначають: невелику потужність і модульний характер установки. Це дозволяє задовольнити попит на енергію у найвіддаленіших місцях. Терміни будівництва і введення в експлуатацію ММР складають 3-5 років, а терміни служби – 40-80 років. Стабільність та гнучкість енергопостачання забезпечується здатністю інтегруватися в існуючі енергетичні мережі України [1, 394-399].

Передбачається, що ММР можуть стати екологічно прийнятним та чистим джерелом електроенергії. Станом на 2025 рік у різних країнах відсутній досвід масового промислового застосування ММР. Більшість проектів знаходяться на стадії розробки, відтак, інформація про потенційні чи реальні наслідки їхньої експлуатації для довкілля залишаються невідомі [2, 34-42].

Виробництво ядерної енергії відносять до видів діяльності, що спричинює значний вплив на довкілля, відповідно, такі об'єкти проходять процедуру оцінки впливу на довкілля. Атомні електростанції та інші ядерні реактори, включаючи будівництво, виведення (зняття) з експлуатації таких електростанцій або реакторів (крім дослідницьких установок для виробництва і конверсії ядерного палива та сировини для одержання вторинного ядерного палива, матеріалів, що діляться та відтворюються, потужність яких не перевищує 1 кіловат постійного теплового навантаження відносять до першої категорії видів планованої діяльності та об'єктів, які можуть мати значний

вплив на довкілля і підлягають оцінці впливу на довкілля) (ст. 3 п. 2 пп. 2 Закону України «Про оцінку впливу на довкілля») [7].

ММР, як і АЕС працюють на радіоактивному паливі. Тому, важливим залишається питання управління радіоактивними відходами. Вдосконалені конструкції реакторів як малі модульні реактори та реактори IV покоління пропонують покращену безпеку, паливну ефективність та можливості управління відходами.

Через складнощі із управлінням ядерними відходами або «аварійне» надходження речовин в навколишнє середовище деякі країни вважають ядерну енергетику небезпечною. Враховуючи це окремі європейські держави взяли курс на повну відмову від ядерної енергетики (Німеччина, Іспанія). Наслідком безпекових заходів стала переорієнтація економік на альтернативні джерела енергії, посилення державного регулювання енергопостачання та формування вищих стандартів безпеки і управління ресурсами. В той же час, інші країни як Франція зосередилася на диверсифікації енергетики та її подальшому використанні і сьогодні є другою за величиною країною у світі з ядерними реакторами, де ядерна енергетика становить близько 70 % виробництва електроенергії в країні [5].

Залишається не з'ясовним питання впливу ММР на флору і фауну, природні оселища, природні екосистеми. Враховуючи, що ММР менші за традиційні реактори, територія їх розташування та зона впливу будуть суттєво меншими порівняно з АЕС. Відповідно, кількість вироблених ядерних відходів, які необхідно зберігати або утилізувати також буде меншою. Окремі моделі ММР передбачають взагалі безвідходне виробництво. Окремо розглядаються варіанти щодо можливості встановлення ММР на промайданчиках майданчиків АЕС і створення програми їх впровадження на заміну енергоблокам АЕС, які виводяться з експлуатації [9, 42-43].

На думку Барбашева С.В. існує значна ймовірність того, що ММР можуть мати значний вплив на навколишнє середовище, зокрема, порушувати стійкість екосистем [2, 34-42].

Інші дослідники оцінюють зростання вуглецевого сліду від ММР, які можна буде розміщувати окремо, але вони формуватимуть мережу з порівняно більшої кількості реакторів та установок [8].

Крім того, розширенням переліку місць потенційного розташування ММР (підземних, підводних, плавучих) потребують розробку критеріїв щодо ділянок для їх розміщення з урахуванням потенційні небезпеки для довкілля та встановлення зони впливу, так звана *emergency planning zone* (EPZ) – зона планування надзвичайної ситуації (за термінологією МАГАТЕ).

Дослідники звертають увагу на врахування природно-кліматичних особливостей різних фізико-географічних зон України та необхідність розробки уніфікованих вимог до зон впливу ММР. За основу може бути взятий директивний підхід або оцінка ризиків. Також, важливим є розташування поруч з ділянкою розміщення ММР рекреаційно-оздоровчих територій, територій і об'єктів природно-заповідного фонду, вразливих об'єктів соціальної інфраструктури тощо [9, 42-43].

До дорожньої карти провадження ММР входять: адаптація класифікації SSC (конструкції, системи та компоненти) і категорій безпеки для ММР; випуск методичних документів для пасивних систем (природна циркуляція, гравітаційне заливання), кіберзахисту й захищеності; узгодження процедур ОВД із регуляторними етапами (попередня оцінка майданчика → звіт із безпеки → дозвіл на будівництво → дозвіл на введення в експлуатацію); рамка взаємовизнання серійних модулів за ідентичним серійним номером дизайну.

Ліцензування ММР потребує гармонізації національних норм із рекомендаціями МАГАТЕ (SSR-2/1, SSG-2, SSG-30), а також обміну досвідом з регуляторами країн-партнерів (NRC/CSA/ONR), унормування згідно з Конвенцією про ядерну безпеку, будуть потрібні додаткові процесуальні дії щодо інтерпретації визначення видів діяльності в рамках Конвенції про оцінку впливу на навколишнє середовище в транскордонному контексті (Конвенція Еспо) та Конвенції про доступ до інформації, щодо участі громадськості в процесі прийняття рішень та доступі до правосуддя з питань, що стосуються довкілля (Орхуська конвенція) [2, 34-42].

Розрахунки проводили беручи за основу викиди CO₂ від теплової генерації. За базовим сценарієм при 8,4 ГВт і CF≈90% уникнені викиди в 2050 р. становлять понад 30 млн тCO₂/рік у разі заміщення вугілля. Паралельно зменшуються ло-

Таблиця 1

Базовий сценарій розгортання малих модульних станцій по роках

Рік	Сукупна потужність, ГВт	Річне введення, ГВт	Еквівалент модулів (300 МВт)
2030	0.3	0.3	1
2035	2.2	0.6	7
2040	5.6	1.0	19
2045	7.6	0.6	25
2050	8.4	0.2	28

Таблиця 2

Розрахунок уникнення викидів CO₂ за роками

Рік	Генерація, ТВт·год	Уникнені викиди, млн т CO ₂ /рік
2030	10.4	9155.3
2035	28.5	25086.2
2040	49.9	43941.4
2045	61.3	53938.6
2050	64.9	57144.7

кальні забрудники (SO_x/NO_x/пил), водний слід і земельне навантаження завдяки компактності майданчиків.

Фазування розгортання враховує «ефект першого блока»: перший модуль найдорожчий і найдовший, наступні – швидше й дешевше через навчання та стандартизацію. Після виходу на серійність основним обмеженням стають мережеві вузли і резерви персоналу. Рисунки 1–2 демонструють S-динаміку розгортання; визначальні умови прискорення: гармонізація регуляторики, пільгові кредити/ЕКА та надійний ланцюг постачання.

«Кліматичний дивіденд» формується як добуток згенерованої низьковуглецевої енергії на різницю LCA-факторів між заміщуваною та новою генерацією. Для вугілля (800–1100 кг CO₂-екв/

МВт·год) і SMR (5–20) отримаємо 30+ млн т/рік уникнених викидів у 2050-му при 8,4 ГВт і CF≈90%. Паралельно зменшуються локальні забрудники (SO_x/NO_x/пил) і водний слід.

Висновок

Малі модульні реактори визначено перспективною опорною технологією української енергетичної безпеки, які можуть замінити вугільні теплоелектростанції, здатні знизити системні витрати резервування відновлювальних джерел енергії, забезпечити комунальне та промислове тепло, а також гнучкість для електронасичених регіонів.

Серед екологічних переваг виділяють зменшення вуглецевого сліду, викидів CO₂ порівняно з тепловою генерацією, досягнення кліматичної

нейтральності економіки України. Водночас, залишаються дискусійними багато питань пов'язаних з визначенням локацій для розташування ММР, розрахунком зони впливу, управління радіоактивними відходами, оцінкою впливу на біологічне різноманіття та природні екологічні системи.

Екологічні переваги підтверджено в межах LCA: 5–20 кг CO₂-екв/МВт·год, мінімальні локальні забрудники, компактний земельний і водний слід. Водночас необхідно завчасно планувати управління РАВ/ВЯП і фонди виведення з експлуатації з прозорими програмами моніторингу та участю громад.

Регуляторний блок має бути гармонізований із рекомендаціями МАГАТЕ (SSR-2/1, SSG-2, SSG-30) і практиками NRC/CSA/ONR, включно з ризик-інформованими підходами, взаємовизнанням серійних компонентів і інтеграцією ОВД (EIA).

Список використаних джерел

1. Малогулко Ю., Бандура І., Сліденко М. Дослідження використання малих модульних реакторів в Україні. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2023 № 329 (6). С. 394-399. DOI : [10.31891/2307-5732-2023-329-6-394-399](https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-329-6-394-399).
2. Барбашев С.В. Про впровадження технології малих модульних реакторів в Україні: проблеми, у т.ч. екологічні, та шляхи їх вирішення // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: зб. наук. статей XIX Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 14-15 вересня 2023 р.). Харків: УКРНДІЕП., 2023. С. 34-42.
3. Energoatom. Annual Report 2025. Kyiv: NNEGC Energoatom, 2024. <https://energoatom.com.ua/en/publicna-zvitnist>.
4. IEA. Power System Flexibility for the Energy Transition. Paris: IEA, 2025. <https://www.cdautomation.com/>
5. Soto G.N., Martinez-Cobas X. Nuclear energy generation's impact on the CO₂ emissions and ecological footprint among European Union countries. Science of The Total Environment 2024 Vol. 945. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173844>
6. IAEA. Status of Small Modular Reactors and Microreactors. Vienna: IAEA, 2023 <https://www.iaea.org/search/google?keys=> .
7. Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» Верховна Рада України, 23.05.2017 № 2059-VIII URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2059-19>
8. Vinoya C. L., Ubando A. T., Culaba A. B. Life cycle analysis of a network of small modular reactors International Conference on Sustainable Energy and Green Technology. 2023 Sci. 1372. DOI : 10.1088/1755-1315/1372/1/012059
9. Забулонов Ю.Л. Перспективи впровадження малих модульних реакторів в Україні Вісн. НАН України, 2023, № 6. – С. 35-46. doi: <https://doi.org/10.15407/visn2023.06.034>

ЕКОЛОГІЧНІ ПЕРЕВАГИ ВПРОВАДЖЕННЯ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ У КОНТЕКСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ

Фаррахов О. В., Хапко Ю. Б., Куценко В. О.,
Мартинюк І. Д., Чимбай М. В.

Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення
моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України,
03142, м. Київ, пр. Академіка Палладіна, 34а,
ORCID ID: 0000-0003-4988-126X, farrakhov@ukr.net

Анотація

Статтю присвячено аналізу екологічних переваг впровадження малих модульних реакторів (ММР) у контексті модернізації атомної енергетики України та зниження негативного впливу енергетики на довкілля. Актуальність дослідження зумовлена посиленням вимог до декарбонізації, підвищенням надійності електропостачання, відновленням інфраструктури та потребою забезпечення екологічної безпеки в умовах зростання антропогенного навантаження. У дослідженні здійснено огляд світових тенденцій розвитку ММР і підходів міжнародних організацій до їх координації та підтримки. Розглянуто експлуатовані в Україні реакторні технології (ВВЕР-440, ВВЕР-1000) та окремі параметри нових установок, що плануються до впровадження, з акцентом на масштабність споруд, вимоги до майданчиків і інфраструктури.

Проаналізовано класифікацію ММР за підходами МАГАТЕ та узагальнено ключові групи: одномодульні й багатомодульні легководні установки, мобільні ММР і проєкти четвертого покоління.

Показано, що модульність, уніфікація та заводське виготовлення компонентів скорочують строки реалізації, зменшують матеріаломісткість і пов'язані будівельні впливи (пил, шум, транспортне навантаження, утворення відходів).

Обґрунтовано, що найбільш відчутний екологічний ефект ММР пов'язаний із заміщенням викопної генерації та скороченням викидів CO₂ і традиційних забруднювачів, характерних для ТЕС. Компактність ММР і менші майданчики розміщення обмежують вилучення земель та фрагментацію природних територій, що є важливим для України в умовах відновлення та потреби гнучкого розміщення потужностей. Окремо висвітлено водний фактор: альтернативні схеми охолодження в частині проєктів ММР потенційно зменшують термічне навантаження на водні об'єкти та чутливість до дефіциту води. Інтегральне компонування, пасивні системи безпеки та можливість підземного/напівпідземного розміщення підвищують стійкість до зовнішніх впливів і знижують імовірність сценаріїв із суттєвими екологічними наслідками.

Зроблено висновок, що ММР є перспективним інструментом екологічно орієнтованої модернізації енергетики України за умови прозорих регуляторних процедур, належної підготовки персоналу та оцінювання впливу на довкілля протягом усього життєвого циклу, включаючи поводження з відпрацьованим паливом і радіоактивними відходами.

Ключові слова: малі модульні реактори, атомні електростанції, декарбонізація, екологічна безпека, вплив на довкілля, викиди.

ENVIRONMENTAL ADVANTAGES OF THE IMPLEMENTATION OF SMALL MODULAR REACTORS IN THE CONTEXT OF MODERNIZATION OF UKRAINE'S NUCLEAR POWER INDUSTRY

Oleksandr Farrakhov, Khapko Yuriy, Kutsenko Volodymyr,
Martyniuk Iryna, Chymbai Maryna

Center for Information-analytical and Technical Support
of Nuclear Power Facilities Monitoring of the NAS
of Ukraine, 34a Palladin Ave., Kyiv, 03142, Ukraine

Abstract

The article is devoted to the analysis of the environmental benefits of the introduction of small modular reactors (SMR) in the context of the modernization of the nuclear power industry of Ukraine and the reduction of the negative impact of the energy sector on the environment. The relevance of the study is due to the increased requirements for decarbonization, increased reliability of electricity supply, infrastructure restoration and the need to ensure environmental safety in the context of increasing anthropogenic load. The study reviews global trends in the development of SMR and approaches of international organizations to their coordination and support. The reactor technologies operated in Ukraine (VVER-440, VVER-1000) and individual parameters of new plants planned for implementation are considered, with an emphasis on the scale of structures, site requirements and infrastructure. The classification of SMR according to the IAEA approaches is analyzed and key groups are summarized: single-module and multi-module light water plants, mobile SMR and fourth-generation projects. It is shown that modularity, unification and factory production of components shorten implementation times, reduce material consumption and related construction impacts (dust, noise, transport load, waste generation).

It is substantiated that the most noticeable environmental effect of MMR is associated with

the replacement of fossil generation and the reduction of CO₂ emissions and traditional pollutants typical of TPPs. The compactness of MMR and smaller placement sites limit land extraction and fragmentation of natural areas, which is important for Ukraine in the context of restoration and the need for flexible capacity placement. The water factor is separately highlighted: alternative cooling schemes in some MMR projects potentially reduce the thermal load on water bodies and sensitivity to water shortages. Integrated layout, passive safety systems and the possibility of underground/semi-underground placement increase resistance to external influences and reduce the likelihood of scenarios with significant environmental consequences.

It is concluded that SMR is a promising tool for environmentally-oriented modernization of the Ukrainian energy sector, provided that transparent regulatory procedures, proper personnel training, and environmental impact assessment throughout the entire life cycle, including spent fuel and radioactive waste management, are in place.

Keywords: small modular reactors, nuclear power plants, decarbonization, environmental safety, environmental impact, emissions

Актуальність дослідження

Сучасний етап трансформації енергетики характеризується одночасним посиленням вимог до декарбонізації, підвищенням надійності

електропостачання та необхідністю мінімізувати негативний вплив енергетичних об'єктів на довкілля. Для України ці виклики є особливо актуальними з огляду на потребу модернізації генеруючих потужностей, відновлення інфраструктури та забезпечення екологічної безпеки в умовах зростання антропогенного навантаження. У цьому контексті малі модульні реактори (ММР) розглядаються як перспективний технологічний напрям, здатний поєднати низьковуглецеву генерацію з підвищеною гнучкістю розміщення та експлуатації.

Аналіз основних досліджень та публікацій

В результаті аналізу інформаційних та літературних джерел досліджено сучасний стан та перспективи використання ММР в різних країнах світу. Систематизація досвіду розробки та будівництва ММР у таких країнах, як: Канада, США, Аргентина, Австралія, ПАР, Китай та Великобританія показала, що на сьогоднішній день в світі представлено понад 50 різних проєктів та концепцій ММР [1-3]

Однак більшість цих проєктів ще перебуває на різних стадіях розробки і ліцензування, і лише декілька проєктів мають бути побудовані у найближчі роки, зокрема в Китаї та Аргентині. МАГАТЕ здійснює координацію проєктів спрямованих на розробку різних типів ММР та виконує заохочувальну політику у своїх країнах-членах з метою сприяння впровадженню ММР [4].

За результатами аналізу зроблено такі узагальнення щодо ММР: вони є конструктивним варіантом, що забезпечує задоволення потреб у гнучкому виробництві електроенергії для різних користувачів і застосувань; мають унікальні характеристики з точки зору ефективності, екологічної безпеки, економічності та гнучкості; встановлюються на одноблочних або багатоблочних станціях, відкривають можливості поєднання ядерних з альтернативними джерелами енергії, включаючи відновлювані джерела [5-6].

Особливу увагу слід приділяти підготовці персоналу для експлуатації та управління ММР. Водночас їх модульність забезпечує скорочення строків виготовлення й монтажу, а отже – спрощує подальшу заміну або модернізацію. ММР можуть ефективно працювати у поєднанні з від-

новлюваними джерелами енергії, підвищуючи стабільність і результативність гібридних енергосистем. У підсумку такі установки здатні відігравати важливу роль у переході до екологічно чистої енергетики та сприяти досягненню цілей сталого розвитку [7-10].

Мета роботи

Проаналізувати екологічні переваги впровадження ММР у контексті модернізації атомної енергетики України та обґрунтувати їх потенціал зі зменшення негативного впливу енергетики на довкілля через скорочення викидів парникових газів і традиційних забруднювачів, а також зниження земельного та водного навантаження

Викладення основного матеріалу

Технічні характеристики ядерних енергетичних установок України

На сьогодні в Україні експлуатуються водо-водяні енергетичні реактори двох типів: ВВЕР-440 та ВВЕР-1000 [11].

ВВЕР-440. Усього побудовано 21 реактор цього типу. Перші енергоблоки введено в експлуатацію у 1971 році.

Теплова потужність реактора становить 1375 МВт, електрична – 440 МВт, ККД – до 32 %. Тиск у першому контурі дорівнює 125 атм, температура теплоносія – від 269 до 300 °С. Активна зона має діаметр 2,88 м і висоту 2,5 м [12].

Активна зона складається з 349 шестигранних паливних касет, кожна з яких містить 126 ТВЕЛів діаметром 9,1 мм.

Паливо – двоокис урану зі збагаченням 3,5 %, загальне завантаження урану – 42 т. Корпус реактора виготовлений зі сталі та захищений водним і сталевим екранами для зменшення радіаційного впливу [13].

Система управління і захисту (СУЗ) включає 37 аварійних регулюючих касет і систему борного регулювання.

Реактор працює у двоконтурній схемі: у першому контурі циркулює вода під тиском, а в другому утворюється пара для обертання турбін потужністю 2×220 МВт [14]. Енергоблок займає площу приблизно 113×56 м, висота – до 47 м.

ВВЕР-1000. Реакторів цього типу побудовано 37 одиниць, перший введено в експлуатацію у 1980 році. Теплова потужність – 3000 МВт, електрична – 1000 МВт, ККД – до 31,7 %. Тиск у першому контурі становить 160 атм, температура теплоносія – від 289 до 319 °С. Активна зона має діаметр 3,12 м і висоту 3,5 м [15].

Активна зона містить 163 безоболонкові тепловиділяючі збірки, кожна з яких складається з 312 ТВЕЛів. Кампанія палива триває 4,5–5 років із частковими перевантаженнями. Збільшення потужності досягнуто за рахунок зростання об'єму активної зони, витрати теплоносія та енергонапруженості (рис.1) [16].

Кількість циркуляційних петель зменшена до чотирьох, що призвело до збільшення потужності основного обладнання і діаметра трубопроводів [17]. Будівля енергоблоку складається з реакторного відділення розміром 60×60×56 м і машинного залу довжиною 120 м.

Реактор AP1000. У 2021 році Україна ухвалила рішення про будівництво 14 енергоблоків AP1000 компанії Westinghouse. AP1000 – двоконтурний реактор покоління III+ з електричною потужністю 1,1 ГВт і тепловою – 3400 МВт.

Він використовує 157 паливних збірок та має два вертикальні парогенератори [18].

Проект відзначається спрощеною конструкцією, зменшеною кількістю компонентів і будівельних матеріалів, що знижує вартість і підвищує безпеку [19].

Термін експлуатації реактора становить 60 років.

Ядерні енергетичні установки в Україні є масштабними інженерними спорудами з розмірами до 120 м у довжину, 60 м у ширину та 56 м у висоту.

Охоронювана зона одного енергоблоку сягає близько 1 км², а атомної електростанції – кількох квадратних кілометрів.

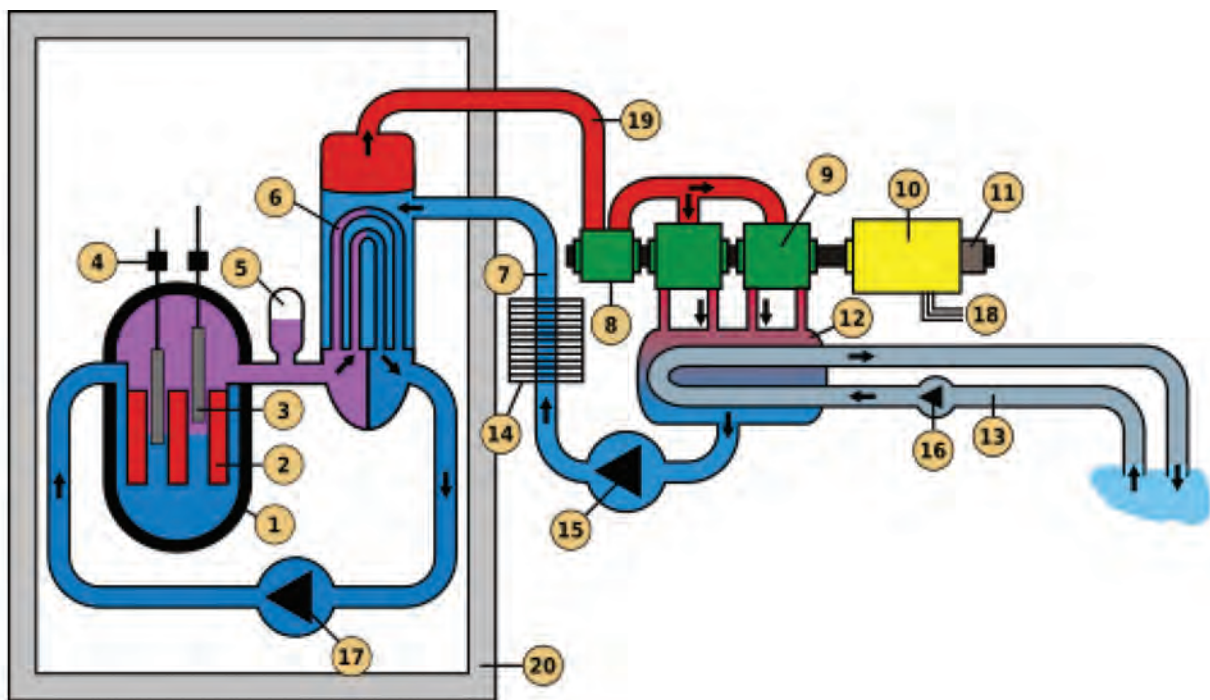


Рисунок 1. Умовна схема енергоблоку з водо-водяним реактором.

- 1 – реактор, 2 – паливо, 3 – регулюючі стрижні, 4 – приводи СУЗ, 5 – компенсатор тиску, 6 – теплообмінні трубки парогенератора, 7 – подача живильної води в парогенератор, 8 – циліндр високого тиску турбіни, 9 – циліндр низького тиску турбіни, 10 – генератор, 11 – збудник, 12 – конденсатор, 13 – система охолодження конденсаторів турбіни, 14 – підігрівачі, 15 – турбоживильючий насос, 16 – циркуляційний насос, 17 – головний циркуляційний насос, 18 – підключення генератора до мережі, 19 – подача пари на турбіну, 20 – гермооболонка

Технічні параметри малих модульних ядерних енергетичних установок, що існують у світі

Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ) визначає енергоблоки потужністю менше ніж 300 МВт як «малі», а до 700 МВт – як «середні» (рис. 2) [20]. Разом вони іменуються МАГАТЕ як малі та середні реактори (Small Medium Reactor – SMR). Однак найчастіше абревіатура SMR використовується для позначення «малогабаритного реактора», призначеного для серійного будівництва. Також існує підкатегорія дуже малих реакторів – vSMR – це установки потужністю менше ніж 15 МВт, які призначені для використання у віддалених районах [21]. Їх також прийнято поділяти на одномодульні та багатомодульні легководні малі модульні реактори (ММР), мобільні ММР та ММР четвертого покоління. Розглянемо деякі з цих ММР.

Одномодульні легководні ММР

Одномодульні легководні ММР, за класифікацією МАГАТЕ, ґрунтуються на перевірених технологіях легководного реактора (ЛВР) і призначені для автономної роботи в розподіленій генерації

або для заміни малих вугільних і газових енергоблоків. Їх вирізняють компактність, модульність, високий рівень безпеки та скорочені строки будівництва [22,23].

SMR-160 (США, Holtec) – підземний реактор потужністю 160 МВт із повністю пасивними системами безпеки та повітряним або водяним охолодженням.

Він не використовує насоси й борне регулювання, здатний автоматично переходити в безпечний стан за будь-яких аварій і може експлуатуватися до 80–100 років. Площа розміщення мінімальна, строки будівництва – 2,5–3 роки. Реактор придатний для виробництва електроенергії, тепла та опріснення води.

SMR Rolls-Royce (Велика Британія) – реактор потужністю близько 470 МВт, орієнтований на серійне заводське виробництво та швидкий монтаж (близько 500 днів). Проєкт спрямований на забезпечення енергетичної безпеки країни та заміщення викопних джерел енергії. Консорціум планує розгорнути до 16 установок до 2035 року.

BWRX-300 (GE Hitachi, Канада/Японія) – киплячий водяний реактор потужністю 300 МВт, створений на базі технологій реакторів великої потужності. Вирізняється спрощеною конструкцією, широкою уніфікацією палива й обладнан-



Рисунок 2. Типи реакторів в залежності від їх потужності

ня та пасивною системою відведення тепла (ICS), що забезпечує безпеку без зовнішнього енергопостачання. Проєкт обрано для будівництва в Канаді, Польщі та низці інших країн як заміну вугільних ТЕС.

SMART (Республіка Корея) – інтегральний реактор з водою під тиском тепловою потужністю 330 МВт (до 100 МВт електричних), орієнтований на виробництво електроенергії та опріснення води.

Проєкт сертифікований, але тривалий час не реалізовувався через відсутність замовлень; нині просувається спільно із Саудівською Аравією.

АСР-100 «Ліньлун-1» (Китай) – підземний інтегральний реактор потужністю 125 МВт із пасивними системами безпеки. Це перший ММР, що пройшов комплексну перевірку МАГАТЕ. Будівництво демонстраційного блоку розпочалося у 2021 році; установка призначена для виробництва електроенергії, тепла та опріснення води.

CAREM (Аргентина) – інтегральний одномодульний реактор малої потужності (близько 30 МВт електричних) з природною циркуляцією теплоносія. Призначений для виробництва енергії, опріснення води та дослідницьких завдань. Проєкт слугує демонстраційною платформою для подальшого масштабування до 100–200 МВт.

Основні специфічні властивості одномодульних ЛВ ММР:

- серійне та уніфіковане заводське виробництво;
- компактні розміри та зручне транспортування;
- малі майданчики розміщення без потреби у водоймах-охолоджувачах;
- скорочені строки будівництва (1,5–4,5 року);
- висока безпека завдяки пасивним системам і природній циркуляції;
- багатофункціональність (електроенергія, тепло, пара, опріснення, дослідження);
- можливість підключення до наявних локальних мереж;
- тривалий строк експлуатації (до 100 років);
- збільшені інтервали перезавантаження палива;
- висока екологічність порівняно з ТЕС.

Отже, одномодульні легководні ММР є компактним, безпечним і екологічно ефективним рішенням для децентралізованої енергетики та заміщення викопних джерел.

Багатомодульні легководні ММР

Багатомодульні легководні ММР ґрунтуються на технологіях ЛВР і можуть використовуватися як для розподіленої генерації, так і для заміни енергоблоків середньої потужності. Їх ключова особливість – інтегральна конструкція, за якої основні компоненти першого контуру розміщені всередині корпусу реактора, що зменшує габарити, матеріаломісткість і ризики аварій [24,25].

NuScale (США) – модульний реактор потужністю 77 МВт із пасивними системами безпеки та можливістю транспортування готових модулів. Реактори розміщуються у підземних охолоджувальних басейнах.

Попри переваги (прискорення будівництва, зниження вартості та підвищення безпеки), експерти зазначають потенційні ризики, пов'язані з борним регулюванням і вібраціями парогенератора. NuScale пропонує масштабовані станції серії VOYGR (від 4 до 12 модулів). Перший комерційний проєкт планується в Айдахо.

NUWARD (Франція) – двомодульна установка загальною потужністю 340 МВт, заснована на проєкті NP-300 і французьких морських ядерних технологіях. Реактор використовує інтегральне компонування, пасивні системи безпеки, виключає борне регулювання та розміщується напівпідземно, що підвищує стійкість до аварій і зовнішніх впливів.

Основні властивості багатомодульних ЛВ ММР:

- інтегральна конструкція та можливість розміщення кількох модулів в одній будівлі;
- серійне й заводське виготовлення з подальшими випробуваннями;
- зручне транспортування модулів;
- малі майданчики розміщення та відсутність потреби у великих водоймах-охолоджувачах;
- скорочені строки будівництва (3–4 роки);
- підвищена безпека завдяки пасивним системам;
- тривалий строк служби (≈50 років і більше);
- збільшені інтервали між перезавантаженнями палива (5–6 років).

Таким чином, інтегральна й модульна архітектура робить ММР безпечнішими, гнучкішими та економічно привабливішими порівняно з традиційними великими АЕС.

Мобільні ММР

Мобільні ММР ґрунтуються на легководній технології та призначені для переміщення між майданчиками.

До них належать плавучі атомні електростанції, що забезпечують енергопостачання віддалених і острівних районів, морських платформ і прибережної інфраструктури.

АСPR50S (Китай) – судновий реактор потужністю близько 60 МВт, розроблений компанією CGN для розміщення на баржах. Призначений для виробництва електроенергії, тепла й опріснення води, а також для енергопостачання островів і нафтогазових платформ.

Проект враховує морські ризики (шторми, цунами, зіткнення суден), використовує активні й пасивні системи безпеки, укорочені трубопроводи та морську воду як кінцевий поглинач тепла. У разі успіху демонстраційного проекту планується серійне будівництво таких станцій.

Специфічні характеристики мобільних ЛВ ММР:

- розміщення на спеціально сконструйованих плавучих платформах (самохідних або буксированих);
- потреба в обладнаних причалах і захищених місцях стоянки;
- використання технологій судових і криголамних ядерних реакторів;
- багатofункціональність (електроенергія, тепло, опріснення, подвійне призначення);
- використання морської води як кінцевого поглинача тепла;
- серійне виробництво та уніфікація компонентів;
- тривалий строк служби (до 40 років);
- підвищена безпека завдяки активним і пасивним системам;
- висока екологічність порівняно з традиційними ТЕС.

Отже, мобільні легководні ММР є гнучким та екологічно ефективним джерелом енергії для важкодоступних і прибережних регіонів [26-28].

ММР четвертого покоління

ММР четвертого покоління відрізняються від класичних водо-водяних реакторів насамперед

технологічною безпекою, компактністю та ефективністю. Їхні специфічні характеристики [29-31]:

1. Низький робочий тиск або робота за атмосферного тиску – ланцюгова реакція відбувається без високого тиску, що знижує ризик аварій.
2. Тип теплоносія: використовуються газ (гелій), розплавлені метали (натрій, свинець) або розплавлені сольові розчини, які не потребують високого тиску та забезпечують пасивне охолодження.
3. Паливо: низькозбагачений уран-235; застосовуються нові компоновки – кульові елементи (TRISO, «галька») або сольові стрижні.
4. Пасивні системи безпеки: базуються на природних процесах теплообміну без використання програмного забезпечення чи зовнішнього електроживлення.
5. Високі робочі температури: значно вищі, ніж у водо-водяних реакторів, що підвищує ефективність виробництва електроенергії та тепла.
6. Тривалий паливний цикл: до 20 років, що зменшує частоту дозаправлення та експлуатаційні витрати.
7. Високий ступінь локалізації обладнання: компактні установки, можливість розміщення під землею або на обмеженій території.
8. Акумуляування енергії: тепло може зберігатися до восьми годин після вимкнення живлення, що дозволяє інтегрувати ММР у «зелені» системи генерації.
9. Інтеграція в комплексні енергосистеми: спільна робота з вітровими, сонячними та іншими відновлюваними джерелами.
10. Серійне виробництво модулів: заводське складання та випробування дають змогу швидко доставляти й встановлювати ММР на майданчику [32,33].

Зниження екологічного навантаження при впровадженні ММР

Проведений аналіз свідчить, що ММР можуть розглядатися як технологічний інструмент зменшення сумарного впливу енергетики на довкілля за умови дотримання вимог ядерної та радіаційної безпеки і належного поводження з відпрацьованим паливом. Найбільш очевидний екологічний ефект ММР проявляється через заміщення

викопних джерел генерації та зниження викидів забруднювачів, характерних для ТЕС (CO_2 , оксиди сірки та азоту, пил, важкі метали).

Це дозволяє зменшувати як внесок енергосектору у зміну клімату, так і локальне навантаження на атмосферне повітря, що є критичним для промислових регіонів, де традиційно концентруються великі джерела викидів.

Важливою екологічною ознакою ММР є їхня компактність і зменшені майданчики розміщення, що обмежує масштаб вилучення земель та фрагментацію природних територій.

Для України це особливо актуально у контексті відновлення інфраструктури та потреби у більш гнучкому розміщенні потужностей ближче до центрів споживання без надмірного розширення промислових зон.

Модульність і заводське виготовлення компонентів також знижують матеріаломісткість і тривалість будівельних робіт на майданчику, а отже – пов'язані з ними тимчасові впливи: шум, пил, інтенсивний рух транспорту, утворення будівельних відходів.

Окремої уваги заслуговує водний фактор. Частина проєктів ММР передбачає системи охолодження, що не потребують великих водойм-охолоджувачів, або допускає альтернативні схеми відведення тепла.

Це потенційно зменшує термічне навантаження на водні об'єкти та ризики, пов'язані з дефіцитом води у посушливі періоди. Для багатьох регіонів, де водні ресурси обмежені або піддаються антропогенному тиску, така особливість може бути екологічною перевагою порівняно з традиційними великими блоками, чутливими до гідрологічних умов.

Зменшення екологічних ризиків також підтримується конструктивними рішеннями ММР: інтегральним компонуванням першого контуру, пасивними системами безпеки та можливістю напівпідземного/підземного розміщення окремих проєктів.

У сукупності це підвищує стійкість до зовнішніх впливів та зменшує ймовірність сценаріїв, здатних призвести до істотних наслідків для навколишнього середовища.

Нарешті, багатофункціональність ММР (виробництво електроенергії, тепла, пари, опріснення) може підвищувати ресурсну ефективність і

сприяти декарбонізації теплопостачання, що у багатьох країнах є одним із найскладніших секторів для «озеленення».

Отже, ММР мають потенціал зменшити екологічне навантаження через скорочення викидів забруднювачів, зниження земельного та водного впливу, підвищення технологічної безпеки та підтримку інтеграції з відновлюваними джерелами енергії в гібридних енергосистемах.

Це робить їх перспективним напрямом для екологічно орієнтованої модернізації енергетики за наявності прозорих регуляторних процедур і повного життєвого циклу оцінки впливу на довкілля.

Висновки

Проведений аналіз засвідчив, що ММР можуть розглядатися як перспективний напрям екологічно орієнтованої модернізації атомної енергетики України за умови суворого дотримання вимог ядерної та радіаційної безпеки і належного поводження з відпрацьованим паливом.

Ключова екологічна перевага ММР полягає у здатності заміщувати викопну генерацію та істотно скорочувати викиди CO_2 і супутніх забруднювачів (NO_x , SO_x , пил, важкі метали), що зменшує як кліматичний вплив енергосектору, так і локальне навантаження на атмосферне повітря.

Компактність, модульність і заводське виготовлення компонентів знижують земельне вилучення, фрагментацію територій та тимчасові впливи під час будівництва (шум, пил, транспортні потоки, будівельні відходи).

Частина проєктів ММР передбачає альтернативні схеми охолодження, потенційно зменшуючи термічне навантаження на водні об'єкти та чутливість до дефіциту водних ресурсів.

Інтегральне компонування, пасивні системи безпеки та можливість підземного/напівпідземного розміщення підвищують стійкість до зовнішніх впливів і знижують імовірність аварійних сценаріїв із суттєвими екологічними наслідками. Багатофункціональність ММР (електроенергія, тепло, пара) також відкриває можливості для декарбонізації теплопостачання та ефективної інтеграції з ВДЕ у гібридних енергосистемах.

Список використаних джерел / References

1. Locatelli, G., Bingham, C., & Mancini, M. (2020). Emerging small modular nuclear power reactors: A critical review. *Physics Open*, 3, 100038. <https://doi.org/10.1016/j.physo.2020.100038>
2. Amin, M. R., Hossain, M. S., & Rahman, M. M. (2023). A review on the future of SMR reactors in nuclear energy. *Emerging Technology and Engineering*, 4, Article 737. <https://doi.org/10.38208/ete.v4.737>
3. Lee, J., Kim, S., & Park, H. (2024). Review of small modular reactors: Challenges in safety and economy to success. *Korean Journal of Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s11814-024-00207-0>
4. Kim, Y., Lee, H., & Choi, J. (2025). Comprehensive review of small modular reactor development focusing on challenges in the backend nuclear fuel cycle. *Nuclear Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.net.2025.104000>
5. Brown, N., Smith, J., & Wilson, A. (2023). Physics-driven cost optimization and advanced R&D strategies for small modular reactors (SMRs). arXiv preprint. <https://arxiv.org/abs/2307.12989>
6. Abdulla, A., Azevedo, I. L., & Morgan, M. G. (2013). Expert assessments of the cost of light water small modular reactors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(24), 9686–9691. <https://doi.org/10.1073/pnas.1300195110>
7. Ingersoll, D. T. (2009). Deliberately small reactors and the second nuclear era. *Progress in Nuclear Energy*, 51(4–5), 589–603. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2009.01.002>
8. International Atomic Energy Agency. (2024). Small modular reactors: Advances in SMR developments 2024. IAEA. <https://doi.org/10.61092/iaea.3o4h-svum>
9. Rosner, R., & Goldberg, S. (2011). Small modular reactors – Key to future nuclear power generation in the U.S. *Energy Policy*, 39(12), 7560–7569. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.041>
10. System Research of Energy Problems. (2023). Prospects of implementation of small modular reactors in the power system of Ukraine. *System Research in Energy*, 3, 39–48. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.039>
11. Duderstadt, J. J., & Hamilton, R. (2019). *Nuclear reactors: Technology and safety*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15473-1>
12. Lamarsh, J. R., & Baratta, A. J. (2018). *Introduction to nuclear engineering* (4th ed.). Pearson. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-03858-0>
13. Todreas, N. E., & Kazimi, M. S. (2021). *Nuclear systems volume I: Thermal hydraulic fundamentals* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429506618>
14. Stacey, W. M. (2018). *Nuclear reactor physics* (3rd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527812663>
15. Ingersoll, D. T. (2009). Deliberately small reactors and the second nuclear era. *Progress in Nuclear Energy*, 51(4–5), 589–603. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2008.11.002>
16. Carelli, M. D., Ingersoll, D. T., Oriani, L., et al. (2010). The design and safety features of the IRIS reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 230(1–3), 151–167. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2003.11.022>
17. Locatelli, G., Bingham, C., & Mancini, M. (2014). Small modular reactors: A comprehensive overview of their economics and strategic aspects. *Progress in Nuclear Energy*, 73, 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.01.010>
18. WorldNuclear Association. (2020). Economics of small nuclear reactors. *Energy Policy*, 144, 111676. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111676>
19. Pioro, I. L., Duffey, R. B., & Kirillov, P. L. (2016). Generation IV nuclear reactors as a basis for future nuclear power. *ASME Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, 2(2), 020801. <https://doi.org/10.1115/1.4031472>
20. GIF. (2019). Generation IV nuclear energy systems roadmap update. *Energy Strategy Reviews*, 26, 100406. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100406>
21. Buongiorno, J., Ballinger, R., Driscoll, M., et al. (2018). The future of nuclear energy in a carbon-constrained world. *Energy Policy*, 118, 552–565. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.03.020>
22. Ashraf, A., Hassan, M., & El-Genk, M. (2019). Review of small modular reactor concepts. *Nuclear Engineering and Design*, 340, 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.10.019>
23. Abdalla, A., Ahn, J., & Blanchard, A. (2020). Passive safety systems in small modular reactors. *Annals of Nuclear Energy*, 142, 107414. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107414>

-
24. Zhou, Y., Rachamin, R., & Qvist, S. (2018). Deployment strategy of SMRs. *Energy*, 152, 578–589. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.125>
25. Ma, X., Wang, C., & Zhang, D. (2021). Design features of ACP100 small modular reactor. *Nuclear Engineering and Technology*, 53(6), 1905–1914. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.12.022>
26. Park, J. Y., Kim, K. S., & Kim, M. H. (2017). SMART reactor design and safety analysis. *Nuclear Engineering and Design*, 313, 146–161. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.12.017>
27. Reyes, J. N. (2016). NuScale plant safety in response to extreme events. *Nuclear Technology*, 196(2), 139–156. <https://doi.org/10.13182/NT16-24>
28. Qvist, S. A., & Brook, B. W. (2015). Environmental and health impacts of SMRs. *Energy Policy*, 84, 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.04.033>
29. OECD/NEA. (2016). SMR deployment and licensing. *Nuclear Engineering and Technology*, 48(6), 1095–1104. <https://doi.org/10.1016/j.net.2016.10.002>
30. Pioro, I. L. (2020). Current status of Gen-IV reactors. *Progress in Nuclear Energy*, 124, 103318. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103318>
31. International Atomic Energy Agency. (2018). Advances in SMR technology developments. IAEA Nuclear Energy Series, NP-T-1. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.12.004>
32. Rosner, R., Goldberg, S., & O'Connor, P. (2011). Small modular reactors – Key to future nuclear power? *Bulletin of the Atomic Scientists*, 67(4), 37–45. <https://doi.org/10.1177/0096340211415890>
33. Zhang, D., Wu, Y., & Cheng, X. (2019). Lead-cooled fast reactors for Gen-IV. *Annals of Nuclear Energy*, 132, 360–370. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.04.028>
-
-

КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ АПАРАТ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ШТУЧНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Машков О. А., Маркіна Л. М., Присяжний В. І., Оводенко Т. С.
Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління,
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, Київ
mashkov_oleg_52@ukr.net

Досліджується можливість кількісної оцінки функціональної стабільності розподілених інформаційних і контрольних систем. Введені поняття ознак, критерії та межі функціональної стійкості, які базуються на визначенні параметрів графа, що описує структуру досліджуваної системи цього класу. У статті запропонуються ознаки та індикатори функціональної стійкості структури екологічного комплексу. Підтверджені критерії та показники функціональної стабільності критичної інфраструктури та штучних небезпечних об'єктів. Обговорюється поняття функціональної стабільності. Введені концепції дозволяють оцінити, наскільки стан екологічного комплексу (критична інфраструктура та штучно небезпечні об'єкти) знаходиться від межі стабільності, тобто стану екологічного комплексу.

Яка межа його функціональної стабільності? Цю межу також можна визначити через координату структури. У такому випадку вона характеризується низкою відмов (розрив ребер або руйнування вершин), що може призвести до переходу комплексної структури в нестабільний стан. Розроблено методи кількісної оцінки функціональної стабільності за допомогою введених індикаторів. Переваги цього підходу полягають у здатності кількісно оцінити функціональну стабільність поточної структури екологічного комплексу на основі зовнішніх ознак. На основі таких оцінок можна давати рекомендації щодо будівництва споруди або розробити обґрунтовані

вимоги до системи управління екологічною безпекою та системи підтримки прийняття рішень у сфері екологічного управління. Проведені дослідження дозволяють обґрунтувати вимоги до системи управління екологічною безпекою критичних інфраструктурних об'єктів і техногенно небезпечних об'єктів на етапі проектування, розв'язати задачі синтезу оптимальної структури екологічного комплексу за критерієм максимальної функціональної стабільності з обмеженням вартості будівництва та експлуатації ліній зв'язку, а також підтвердити можливість збільшення структури системи під час експлуатації.

Ключові слова: екологічний комплекс, межа функціональної стабільності, критерії та межі функціональної стабільності, об'єкти критичної інфраструктури, система підтримки екологічних рішень, система управління екологічною безпекою, техногенно небезпечні об'єкти, функціональна стабільність.

Концептуальний апарат функціональної стабільності об'єктів критичної інфраструктури та техногенних небезпечних об'єктів.
А. А. Машков, Л. М. Маркіна, В. І. Присяжний, Т. С. Оводенко.

Досліджується можливість кількісної оцінки функціональної стабільності розподілених інформаційних і контрольних систем. Введені поняття ознак, критерії та межі функціональної стійкості, які базуються на визначенні параметрів

графа, що описує структуру досліджуваної системи цього класу. У статті пропонуються ознаки та показники функціональної стійкості структури екологічного комплексу.

Обґрунтовані критерії та індикатори функціональної стабільності об'єктів критичної інфраструктури та техногенно небезпечних об'єктів.

Розглядається поняття функціональної стабільності. Впроваджені концепції дозволяють оцінити, наскільки стан екологічного комплексу (об'єкти критичної інфраструктури та техногенно небезпечні об'єкти) знаходиться від межі стабільності, тобто Яка межа її функціональної стабільності? Цю межу також можна визначити через зв'язність структури.

У цьому випадку він характеризується низкою відмов (руйнування ребер або вершин), що може призвести до нестабільного стану структури комплексу.

Розроблено методи кількісної оцінки функціональної стабільності за допомогою введених індикаторів.

Переваги цього підходу полягають у здатності кількісно оцінити функціональну стабільність поточної структури екологічного комплексу на основі зовнішніх ознак.

На основі таких оцінок можна надати рекомендації щодо будівництва споруди або сформулювати обґрунтовані вимоги до системи управління екологічною безпекою та системи підтримки прийняття рішень у сфері екологічного управління. Проведені дослідження дозволяють обґрунтувати вимоги до системи управління екологічною безпекою критичних інфраструктурних об'єктів і техногенетично небезпечних об'єктів на етапі проектування, розв'язати задачі синтезу оптимальної структури екокомплексу за критерієм максимальної функціональної стабільності з обмеженням вартості будівництва та експлуатації ліній зв'язку, а також підтвердити можливість будівництва конструкції системи під час експлуатації.

Ключові слова: екологічний комплекс, резерв функціональної стабільності, критерій і резерв функціональної стабільності, об'єкти критичної інфраструктури, система підтримки прийняття рішень у сфері екологічного управління, система управління екологічною безпекою, техногенетично небезпечні об'єкти, функціональна стабільність.

Створемо проблему

Проблемна ситуація, що призвела до появи наукового напрямку забезпечення функціональної стабільності, пов'язана з розвитком наприкінці XX століття складних автономних штучних систем, що працюють у екстремальних умовах (штучно небезпечні об'єкти, об'єкти критичної інфраструктури). Їхня висока вартість і потенційна небезпека вимагали належного рівня надійності та безпеки використання. Водночас традиційні методи на основі багаторазового резервування, впровадження вбудованих систем керування та елементів з підвищеною надійністю, що погіршувало технічні та економічні характеристики розроблених систем, але не завжди призводило до необхідного зниження ймовірності виникнення небезпечних ситуацій. Необхідність впровадження додаткової апаратної резервності для забезпечення надійності системи стала важливим обмеженням цього підходу. Тому було запропоновано враховувати аномальні стани системи, спричинені збоями, як допустимі та формувати адекватне (функціонально стабільне) управління, спрямоване на регулювання наслідків відмов і підтримку виконання функцій системи. Завдяки такому управлінню забезпечується перерозподіл ресурсів системи для досягнення основної мети, навіть у разі збоїв. Вперше у публікаціях, присвячених розв'язанню конкретних задач керування складними автономними динамічними об'єктами, були наведені поняття «функціональної стабільності», його визначення та основні принципи забезпечення функціональної стабільності.

Було встановлено, що важливою умовою забезпечення цієї якості є можливість перерозподілу доступних ресурсів у системі (комплекс).

Проблема аналітичної оцінки функціональної сталості екологічної системи виникає при вирішенні проблеми забезпечення екологічної безпеки регіонів та об'єктів критичної інфраструктури. Розподілені інформаційні та контрольні системи (RICS), які містять засоби автоматизованої обробки інформації, розподілені в просторі на територіальній основі для вирішення проблем накопичення, обробки, зберігання та передачі інформації та енергії. Такі системи належать до класу складних організаційних систем і будуються на основі технологій корпоративних комп'ю-

терних мереж для прийняття управлінських екологічних рішень. Він складається з комутаційних вузлів і каналів зв'язку (ліній) між окремими елементами системи. Основна вимога RICS – виконувати основну функцію – надання корпоративним абонентам мережі потенційної можливості отримати доступ до розподіленої інформації та енергетичних ресурсів, об'єднаних в один комплекс. Всі інші вимоги, такі як ефективність, продуктивність, надійність, точність, сумісність, керованість, надійність, розширювність і обсяг проектування, залежать від якості цього базового завдання. У сучасних умовах RICS негативно впливають внутрішні (невдачі, невдачі, помилки персоналу та працівників) та зовнішні (активний або пасивний вплив зовнішнього середовища) фактори. Тому проблема забезпечення можливості безпечної (безпомилкової експлуатації RICS) з можливим впливом негативних факторів є актуальною і ще не сформульована аналітично.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз досліджень і публікацій для забезпечення стабільності функціонування складних систем. Низка наукових статей присвячена розв'язанню проблеми забезпечення стабільності функціонування складних технічних систем [1-4]. Однак, на нашу думку, основна увага в них зосереджена на вирішенні часткових задач, а саме на створенні резервних інформаційних і контрольних систем, відмовостійких систем керування, адаптивних систем керування.

У [3] та в [6,7] вперше було введено поняття функціональної стійкості комплексних динамічних об'єктів, описаних системою диференціальних рівнянь, а в [6,7] воно було розроблено. Запропонований підхід базується на принципах комплексного спостереження, керованості та ідентифікації динамічних об'єктів. Однак такий пристрій є неприйнятним для RICS. У теорії надійності визначення індикаторів надійності базується, перш за все, на приведенні структури системи до відповідної схеми у вигляді послідовних і паралельних зв'язків модифікованих елементів. Цей підхід також не можна застосувати до складних організаційних систем із великою кількістю перехресних зв'язків (постійних і випадкових), враховуючи взаємний вплив одних елементів на

інші, тобто Для систем із випадковою структурою та зв'язками.[5]

Метою цієї статті є кількісна оцінка функціональної стабільності динамічно змінних споруд критичних інфраструктурних об'єктів та техногенно небезпечних об'єктів, запропонованих авторами математичного апарату.

Результати досліджень

У традиційних автоматичних системах керування автономними об'єктами, розділених на окремі канали, що складаються з датчиків, комп'ютерів і приводів, ресурси (енергія, обчислення, інформація), виділені для керування, жорстко фіксовані між відповідними каналами. Водночас неможливість перерозподілу ресурсів між каналами обмежує можливість формування функціонально стабільного управління. Технологічною основою забезпечення функціональної стабільності стало створення бортових інформаційних і контрольних комплексів, що дозволяло інтегрувати ресурси системи та їх перерозподіляти. Лише інтеграція всіх каналів автоматичних систем керування в один інформаційно-контрольний комплекс, де підсистема інформації та вимірювання включатиме всі джерела інформації, пристрої транскодування та зв'язку, обчислювальну систему – всі комп'ютери, а енергетична підсистема – всі активатори та джерела енергії, забезпечить її функціональну стабільність. Слід пам'ятати, що можливість інтегрованого використання ресурсів і забезпечення функціональної стабільності систем обмежена умовами стабільності динамічної системи, її керованістю та спостережуваністю за Кальманом. На сьогодні досить повне дослідження умов забезпечення функціональної стабільності проведено лише для лінійних стаціонарних моделей динамічних систем, які не стагнують.

А. Критерії та показники функціональної стабільності критичної інфраструктури та техногенних небезпечних об'єктів

Функціональна стабільність розглядатиметься як здатність об'єктів виконувати свої функції протягом певного періоду часу у разі серії операційних збоїв, навмисних пошкоджень, перешкод

обміну та обробці інформації й енергії, а також у разі технічних помилок персоналу [5, 7].

Функціональна стабільність складного екологічного комплексу (об'єкти критичної інфраструктури та штучні небезпечні об'єкти) поєднує властивості надійності, стійкості до помилок, живучості та характеризує здатність екологічного комплексу відновлювати робочий стан шляхом використання надлишкових ресурсів.

Математична модель структури екологічного комплексу (об'єкти критичної інфраструктури та техногенно небезпечні об'єкти) має форму неорієнтованого графа $G(V, E)$, $v_i \in V$, $e_{ij} \in E$, $i, j = 1, \dots, n$, яка описується матрицею суміжності

$$A = \|a_{ij}\|, i, j = 1, \dots, n, a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при } e_{ij} \in E; \\ 0 & \text{при } e_{ij} \notin E \end{cases}$$

Множина вершин V відповідає множині комутаційних вузлів n і множини ребер E – множині ліній зв'язку між комутаційними вузлами. Припускаємо, що RICS виконує базову функцію обміну даними, якщо існує принаймні один спосіб передачі інформації між будь-якою парою комутаційних вузлів. Таким чином, вимога графової зв'язності дає підстави для кількісної оцінки функціональної стабільності розподіленої інформації та Системи керування.

Ми розглянемо якість виконання основних функцій, яка описується часом затримки повідомлення при перенаправленні. Ми також приймаємо, що канали зв'язку мають пропускну здатність, яка дозволяє передавати довільно великий потік інформації.

У технічній кібернетиці, а саме в теорії автоматичного керування, вводиться класична теорія стійкості динамічних систем, засновником якої є А. М. Ляпунов. У цій теорії стабільність можна оцінити не шляхом розв'язання системи диференціальних рівнянь, що описують об'єкт, а за допомогою простих знаків, умов і критеріїв стійкості, розроблених І. Вишеградським, А. Гурвіцем, А. Михайловим, Г. Ньюкістом та іншими. [3]. За аналогією з класичною теорією стабільності пропонується оцінювати функціональну стійкість відповідно до параметрів графа, що описує структуру екологічного комплексу.

Виходячи з типу графа та його параметрів, можна визначити, чи буде система функціонально стабільною, нестабільною чи нейтральною.

Ознака функціональної стабільності структури екологічного комплексу. Структура екологічного комплексу є функціонально стабільною, якщо граф структури є однокомпонентним і не має мостів і вузлів з'єднання. Обернене визначення дозволяє визначити функціональну нестабільність структури.

Ознака функціональної нестабільності конструкції. Структура екологічного комплексу є функціонально нестабільною, якщо його граф багатокомпонентний і не пов'язаний.

Таким чином, на основі аналізу зовнішнього вигляду графа, а саме за кількістю компонентів, наявністю мостів і вузлів графового з'єднання, можна зробити висновок про функціональну стійкість структури, тобто про її власну здатність уникати руйнування та пошкодження. Однак для графів з високими гілками та багатoverшинами важко зробити оцінку на основі зовнішнього вигляду. Тому для кількісної оцінки ступеня функціональної стійкості ми введемо *Індикатори функціональної стійкості структури екологічного комплексу*:

А. Індекс зв'язку $\chi(G)$ вершин – це найменша кількість вершин, видалення яких разом із випадковими ребрами призводить до утворення некогерентного або одновршинного графа.

Б. Індикатор зв'язку ребер $\lambda(G)$ – це найменша кількість ребер, видалення яких призводить до незв'язного графа.

В. Ймовірність комунікації $P_{ij}(t)$ – це ймовірність того, що повідомлення з вузла i до вузла j буде передано за час не більше t .

Аналіз цих показників дозволяє виділити такі характеристики:

– З'єднання вершин і ребер характеризує лише поточну структуру, незалежно від надійності комутаційних вузлів або ліній зв'язку;

– $\chi(G)$ індикатори та $\lambda(G)$ отримання цілих значень і пов'язаних коефіцієнтів

$$\chi(G) \leq \lambda(G) \leq \min_{v_i \in V} \{\deg(v_i)\};$$

– Ймовірність зв'язку $P_{ij}(t)$ дозволяє враховувати надійність комутаційного обладнання, тип фізичного каналу для передачі інформації, наявність резервних каналів і маршрутів, а також підключення розподіленої структури. Водночас розрахунок $P_{ij}(t)$ значень є складним і складним завданням;

– Ймовірність зв'язку характеризує зв'язок лише однієї пари вершин. Щоб охарактеризувати зв'язок усіх пар вершин, необхідно працювати з матрицею ймовірностей зв'язку $P = \|P_{ij}\|$, $i, j = 1, \dots, n$.

На основі запропонованих ознак і показників можна розробити *критерії функціональної стійкості структури екологічного комплексу*:

1. *Структурний критерій*. Структура екологічного комплексу буде функціонально стабільною, якщо значення вершинних і реберних зв'язок відповідні

$$\chi(G) \geq 2 \cup \lambda(G) \geq 2.$$

2. *Ймовірнісний критерій*. Структура екологічного комплексу буде функціонально стабільною, якщо надійність зв'язку кожної пари вершин не менша за задану

$$P_{ij}(t) \geq P_{ij}^c, \quad i \neq j, \quad i, j = 1, \dots, n$$

де n – кількість вершин графа $G(V, E)$.

Сформульовані критерії дозволяють на основі точних розрахунків визначити функціональну стійкість поточної структури екологічного комплексу.

Б. Межі та сфери функціональної стабільності розподілених інформаційних і контрольних систем

На межі зон стабільності та нестабільності існує певна зона, в якій тема системи не є функціонально стабільною і водночас не є функціонально нестабільною. Таке поле, за аналогією з теорією стійкості динамічних систем [3], називається межею функціональної стійкості структури.

Ознака функціональної стабільності. Поточна структура знаходиться на межі функціональної стабільності, якщо граф структури узгоджений, має мости ($NE \geq 1$) або вузли з'єднання ($NV \geq 1$)

$$\{K = 1\} \wedge [\{N_V \geq 1\} \vee \{N_E \geq 1\}],$$

де K – кількість компонентів графа, а умова $K = 1$ означає, що граф зв'язний, NV (NE) – кількість вузлів з'єднання (мостів) графа.

Міст – це ребро зв'язаного графа, яке з'єднує два підграфи, після чого граф перетворюється з однокомпонентного на двокомпонентний граф. У деяких працях з теорії графів міста називають перешийком. Вузол з'єднання називається такою вершиною зв'язаного графа, після видалення якого разом із випадковими ребрами граф перетворюється з однокомпонентного на двокомпонентний граф.

Наявність мосту або вузла, який з'єднує два підграфи в структурі, означає, що всі маршрути передачі інформації від вершин одного підграфа до верхньої частини іншого містять цей міст або вузол з'єднання. Це суттєво знижує надійність споруд і функціональну стабільність RICS. Тому, щоб забезпечити функціонально стабільний стан системи, щоб уникнути мостів або вузлів з'єднання, рекомендується вводити в її структуру резервні лінії зв'язку. Водночас існує кілька незалежних і альтернативних способів передачі інформації.

Аналіз структур показує, що коли система перебуває на межі стабільності, вона працює і виконує необхідну кількість функцій. Однак, якщо хоча б один міст або вузол з'єднання виходить з ладу, система переходить у нестабільний стан.

Області функціональної стійкості та нестійкості можна відобразити у декартовому просторі за координатами $\lambda(G)$, $\chi(G)$ (рис. 1). Точка на площині, що характеризує стан системи, визначається значеннями параметрів $\lambda(G)$, $\chi(G)$ графа структури системи.

У графічному представленні межею функціональної стійкості екологічного комплексу буде геометричне розташування точок, що лежать на двох прямих $\chi(G) = 1$ та $\lambda(G) = \chi(G)$ (див. рис. 1).

Межа функціональної стабільності екологічного комплексу

Впроваджені концепції дозволяють оцінити, наскільки стан екологічного комплексу (критична інфраструктура та штучно небезпечні об'єкти) знаходиться від межі стабільності, тобто Яка межа її функціональної стабільності? Цю межу також можна визначити через координацію структури. У такому випадку вона характеризується низкою відмов (розрив ребер або руйнування вершин), що може призвести до переходу комплексної структури в нестабільний стан.

Межу функціональної стабільності екологічного комплексу можна кількісно оцінити за допомогою наступних показників:



Рисунок 1. Геометрична інтерпретація областей функціональної стабільності та нестабільності

А. Стійкість ребер ребер дорівнює значенню Z_E , яке дорівнює відстані від точки з координатами $(\chi(G), \lambda(G))$ у області функціональної стійкості до прямої $\lambda(G) = 1$

$$Z_L = \lambda(G) - 1$$

Б. Вертикальна межа стійкості – це значення Z_V , яке дорівнює відстані від точки з координатами $(\chi(G), \lambda(G))$ у області функціональної стійкості до прямої $\chi(G) = 1$

$$Z_V = \chi(G) - 1.$$

Також можливо обчислити функціональну межу стабільності як різницю між поточним P_{ij} і заданим P_{ij}^c із значеннями ймовірності зв'язку. Очевидно, що в цьому випадку межа буде визначена квадратичною матрицею

$$\mathbf{Z}_P = \|z_{ij}\|, \quad z_{ij} = P_{ij} - P_{ij}^c.$$

Таким чином, після знаходження запропонованих параметрів за допомогою ознак функціональної стабільності можна визначити, чи перебуває екологічний комплекс у функціонально стабільному чи нестабільному стані.

Межу функціональної стабільності, яка визначає ступінь цієї стійкості, можна знайти як аналітично на основі запропонованих формул, так

і графічно (див. рис. 1). Проведені дослідження дозволяють навіть на етапі проектування обґрунтувати вимоги до системи екологічної безпеки критичної інфраструктури та штучно небезпечних об'єктів.

Об'єкти розв'язують задачі синтезу оптимальної структури екологічного комплексу за критерієм максимальної функціональної стабільності з обмеженням вартості будівництва та експлуатації ліній зв'язку, а також обґрунтовують можливість збільшення структури системи під час експлуатації.

Висновки

У статті пропонуються ознаки та індикатори функціональної стійкості структури екологічного комплексу. Вперше введено поняття меж і меж функціональної стійкості екологічного комплексу. Розроблено методи кількісної оцінки функціональної стійкості за допомогою введених індикаторів.

Переваги цього підходу полягають у здатності кількісно оцінити функціональну стійкість поточної структури РІКС на основі простих зовнішніх ознак. побудова структури або розвиток розумного.

Вимоги до системи управління екологічною безпекою та системи екологічної підтримки прийняття рішень.

Список використаних джерел

1. Нільс Дж. Нільссон. Пошук штучного інтелекту. – 1. - Cambridge University Press, 2019. – 578 с. – ISBN 978-0521116398.
2. Стюарт Дж. Рассел, Пітер Норвіг. Штучний інтелект: сучасний підхід. – 3. – Пірсон, 2015. – ISBN 978-9332543515.
3. Барабаш О. В., Козелков С. В., Машков О. А. Концептуальний апарат функціональної стабільності розподілених інформаційних і керуючих систем // Збірка наукових праць Національного центру ВПС Збройних сил України. - 7 Т.№ 2005. – С.87 – 95.
4. Бондар О. І., Машков О. А., Присяжний В. І., Аваденко Т. С., Печений В. Л. Парадигма обробки інформації в інтелектуальній інформаційній системі для підтримки прийняття рішень у сфері екологічної безпеки / екологічних наук: науково-практичний журнал. Нью-Йорк: DEA, випуск 4(49), 2023, с. 144-152.
5. Концепція створення інтелектуальної інформаційної системи для підтримки прийняття рішень у сфері екологічної безпеки. Бондар О. І., Машков О. А., Присяжний В. І., Аваденко Т. С., Печений В. Л. / Екологічні науки: Науково-практичний журнал. Нью-Йорк: DEA, випуск 3(48), 2023, стор. 7-16.
6. Машков О. А., Машков В. А. Забезпечення стійкості до відмов складних систем на основі їх самодіагностики за принципом блукаючого ядра // Кібернетика та обчислювальні технології, випуск 1998. 116.- с. 103-111.
7. Машков О. А., Машков В. А. Принципи функціональної стабільності складних систем // Наука і оборона, 1995.- № 2.- С. 37-44.

У504.064.4:338.45

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202508-20>

ІНТЕГРОВАНІ СТРАТЕГІЇ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНИМИ РИЗИКАМИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КЛІМАТИЧНОЇ НЕЙТРАЛЬНОСТІ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

Коцюбинський А. О., Линник Д. О., Грицуляк Г. М.,
Запухляк Н. М., Качала С. В., Фомічова О. В.
Івано-Франківський національний університет нафти і газу

Антропогенна зміна клімату є однією з найактуальніших глобальних проблем сучасності. Інтенсифікація промислового виробництва супроводжується зростанням обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря. Викиди парникових газів від промислових підприємств посилюють парниковий ефект, негативно впливаючи на кліматичну систему планети.

У статті представлено методологію формування інтегрованої стратегії зниження екологічних ризиків промислових об'єктів з метою досягнення їх кліматичної нейтральності. Дослідження базується на застосуванні системно-динамічного моделювання для прогнозування результативності впровадження комплексних технологічних

рішень у процесах декарбонізації виробництва. Математичне моделювання в умовах українського промислового сектору показало, що реалізація запропонованої стратегії дозволяє досягти суттєвого зменшення викидів парникових газів до 2048 року при показнику рентабельності інвестицій на рівні 25,8%.

Отримані результати підтверджують технічну та економічну доцільність декарбонізації українських промислових підприємств за умови системної впровадження розробленої комплексної стратегії.

Ключові слова: декарбонізація, викиди, забруднюючі речовини, промисловість, кліматична нейтральність, стратегія.

INTEGRATED STRATEGIES FOR DECARBONIZATION AND ENVIRONMENTAL RISK MANAGEMENT TO ENSURE CLIMATE NEUTRALITY OF INDUSTRIAL FACILITIES

Kotsyubynsky A. O., Lynnyk D. O., Hrytsulyak G. M.,
Zapukhliak N. M., Kachala S. V., Fomichova O. V.
Ivano-Frankivsk National University of Oil and Gas

Anthropogenic climate change is one of the most pressing global issues of our time. The intensification of industrial production is accompanied by an increase in the volume of pollutant emissions into the atmosphere. Greenhouse gas emissions from industrial enterprises exacerbate the greenhouse effect, negatively impacting the planet's climate system. The article presents a methodology for developing an integrated strategy to reduce the environmental risks of industrial facilities in order to achieve their climate neutrality. The study is based on the use of system-dynamic modeling to predict the effectiveness of implementing comprehensive technological solutions in the processes of decarbonization of production. Mathematical modeling in the Ukrainian industrial sector has shown that the implementation of the proposed strategy will allow for a significant reduction in greenhouse gas emissions by 2048 with a return on investment of 25.8%. The results confirm the technical and economic feasibility of decarbonizing Ukrainian industrial enterprises, provided that the developed comprehensive strategy is implemented systematically.

Keywords: decarbonization, emissions, pollutants, industry, climate neutrality, strategy.

Постановка проблеми

На фоні загальної екологічної кризи яскраво виділяється проблема зміни клімату. Підвищення глобальної температури порівняно з доіндустріальним періодом вже призводить до катастрофічних наслідків: екстремальні погодні явища завдають щорічних збитків, підвищення рівня моря загрожує прибережним територіям, а змі-

ни в кліматичних зонах руйнують екосистеми та загрожують продовольчій безпеці мільярдів людей. Промислові об'єкти є основними споживачами енергії та джерелами викидів забруднюючих речовин та стоять перед необхідністю комплексного переосмислення своїх виробничих процесів. Екологічні ризики, пов'язані з промисловою діяльністю, охоплюють широкий спектр впливів – від прямих викидів парникових газів до забруднення водних ресурсів, деградації ґрунтів та порушення екологічної рівноваги територій. Ці ризики не лише загрожують довкіллю, але й створюють значні фінансові, репутаційні та регуляторні виклики для підприємств.

Концепція кліматичної нейтральності передбачає досягнення балансу між викидами парникових газів та їх поглинанням чи компенсацією, що вимагає від промислових об'єктів впровадження інноваційних технологій, оптимізації енергоспоживання та кардинальної зміни бізнес-моделей.

Перехід до кліматично нейтрального виробництва не є лише екологічним імперативом, а й стратегічною необхідністю для забезпечення довгострокової конкурентоспроможності підприємств в умовах посилення екологічного регулювання та зростання споживчих вимог до екологічності продукції. У цьому контексті розробка та впровадження ефективних стратегій декарбонізації та мінімізації екологічних ризиків стає критично важливою для забезпечення сталого майбутнього як для окремих підприємств, так і для людства загалом. Комплексний підхід до вирішення цих викликів вимагає інтеграції технологічних інновацій, управлінських рішень та економічних механізмів. Успішна трансформація промислових

об'єктів може стати переломним моментом у боротьбі зі зміною клімату та забезпечити основу для створення вуглецево-нейтральної економіки майбутнього.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Людська діяльність спричинила значні трансформації глобальної кліматичної системи, що пов'язано з порушенням природної рівноваги та інтенсивним накопиченням парникових газів в атмосферному повітрі. До найбільш значущих парникових газів належать водяна пара, двоокис вуглецю, метан, озон та перфторвуглецеві сполуки. Результатом посилення парникового ефекту стало прогресуюче підвищення середньо планетарної температури та зростання вмісту CO₂ в атмосфері понад рівень 400 ppm [1,4].

Парникові гази, зокрема діоксид вуглецю (CO₂), метан (CH₄) та закис азоту (N₂O), характеризуються здатністю до поглинання та утримання теплової енергії у межах атмосферного шару Землі. Механізм парникового ефекту реалізується через процеси абсорбції та повторного випромінювання довгохвильової інфрачервоної радіації цими газоподібними речовинами. Така взаємодія з тепловим випромінюванням зумовлена особливостями молекулярної структури CO₂, CH₄ та N₂O, які дозволяють цим сполукам взаємодіяти з електромагнітним випромінюванням у специфічних спектральних областях. Основним антропогенним фактором емісії діоксиду вуглецю є спалювання викопного палива – вугілля, нафти та природного газу – у секторах енергетики, промислового виробництва та транспортної галузі [3,5,7].

Глобальна індустріалізація та надмірна залежність від невідновлюваних джерел енергії призвели зміни клімату, що вимагає стратегій впровадження циркулярної економіки в усіх секторах, щоб скоротити викиди вуглецю [9]. В різних країнах зростає кількість досліджень та політик, спрямованих на пошук та впровадження стратегій вирішення проблем зміни клімату. Країнами з найбільшою кількістю досліджень у цій галузі є Китай, Індія, Сполучені Штати, Велика Британія та Австралія [1].

Глобальна стратегія протидії промислового забрудненню базується на комплексній модерні-

зації виробничих процесів з орієнтацією на екологічну сумісність та зниження рівня шкідливих викидів. Ефективність такого підходу досягається через комплексний моніторинг потенційних забруднювачів та імплементацію превентивних механізмів, спрямованих на мінімізацію екологічного навантаження. Ключовими напрямками цієї трансформації є розвиток екологічно чистих виробничих методологій, зменшення кількості використання шкідливих хімічних сполук та впровадження безвідходних технологічних циклів, що забезпечують скорочення промислових забруднень [6]. Також до основних аспектів досягнення нульових викидів парникових газів, належать ефективність кінцевого використання та електрифікацію, постачання чистої електроенергії, постачання чистого палива, «уловлювання, зберігання та використання парникових газів», покращення поглинання земельними ресурсами, скорочення викидів, відмінних від CO₂ [2].

Уловлювання та зберігання вуглецю в енергетичній промисловості вимагають наукових та технологічних інновацій. Полігенерація, хімічне циклічне спалювання та технології, що поєднують викопне паливо та відновлювані джерела енергії для уловлювання CO₂ є новим етапом для виробництва. Перетворення CO₂ на паливо та хімічні речовини є перспективною є перспективним напрямком для підприємств. Технічні методи уловлювання CO₂ включають уловлювання після згоряння, уловлювання перед згорянням та киснево-паливне спалювання. Уловлювання після згоряння відділяє CO₂ від відпрацьованого газу та є одним із найпростіших способів рекуперації CO₂ в енергетичних системах. Методологія розділення газів, що використовуються в технології уловлювання після згоряння, включає фізичну хімічну абсорбцію, абсорбцію, мембранне розділення. Завдяки великій кількості обробки димових газів після згоряння та низькій концентрації CO₂, метод хімічної абсорбції є найбільш придатною технологією розділення для уловлювання CO₂ після згоряння. Перевагою уловлювання після згоряння є те, що його легко експлуатувати [8]. Проте, технології вловлювання вуглецю на промислових об'єктах є має бути лише елементом комплексної стратегії мінімізації викидів парникових газів.

Технологічні інновації та структурна трансформація промисловості чинять суттєвий вплив

на рівень вуглецевих викидів у виробничих процесах, демонструючи значні синергетичні ефекти при їх взаємодії. Оптимізація промислової структури може ефективно зменшити викиди парникових газів, причому модернізація виробничої структури демонструє більш значний гальмівний ефект, ніж раціоналізація. Водночас, ізольовані технологічні трансформації або їх взаємодія з оптимізацією промислової структури не генерують суттєвого скорочення викидів вуглецю. Проте, інтеграція технологічних змін з комплексною модернізацією промислової структури створює потужний синергетичний ефект, що призводить до значного гальмування процесів вуглецевих викидів [10]. Звідси необхідною є розробка та впровадження комплексної стратегії мінімізації промислових викидів для досягнення кліматичної нейтральності.

**Визначення цілей статті
(постановка завдання)**

Метою дослідження є розробка комплексної стратегії мінімізації екологічних ризиків промислових об'єктів для досягнення кліматичної нейтральності на основі системно-динамічного моделювання та прогнозування ефективності інтегрованих технологічних рішень в умовах українського промислового сектору.

Завдання дослідження:

- 1) Провести аналіз існуючих стратегій декарбонізації промисловості та оцінити їх ефективність;
- 2) Розробити три етапну комплексну стратегію мінімізації екологічних ризиків з поетапним впровадженням;
- 3) Створити прогнозну модель зниження викидів CO₂ для комплексної стратегії зниження екологічних ризиків на період до 2050 року.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для розробки та прогнозування ефективності комплексної стратегії мінімізації екологічних ризиків для досягнення кліматичної нейтральності було використано системно-динамічний підхід. За вихідні данні було взято показники по викидам промислового сектору України станом на 2024 рік. Прогнозне моделювання базувалось на математичних функціях експоненціального та логістичного зростання/спадання. Економічна складова моделювалась через аналіз вартості життєвого циклу (LCC - Life Cycle Cost) кожної технології. Для врахування невизначеностей використовувались елементи стохастичного моделювання.

У ході аналізу було виділено ключові стратегії мінімізації промислових екологічних ризиків для досягнення вуглецевої нейтральності (таблиця 1).

Таблиця 1

Ключові стратегії мінімізації промислових екологічних ризиків

Стратегія	Опис	Потенціал зниження викидів	Термін окупності	Ризики
Енергоефективність	Модернізація обладнання, оптимізація процесів, впровадження систем управління енергією	15–30%	2–5 років	Технологічне застарівання
Перехід на відновлювані джерела енергії	Встановлення сонячних панелей, вітрогенераторів, закупівля «зеленої» електроенергії	40–70%	7–15 років	Складність поставок, залежність від погоди
Електрифікація процесів	Заміна газових/вугільних технологій на електричні	30–60%	5–10 років	Підвищене навантаження на енергосистему

Продовження таблиці 1

Стратегія	Опис	Потенціал зниження викидів	Термін окупності	Ризики
Циркулярна економіка	Переробка відходів, повторне використання матеріалів, замкнуті цикли	20–40%	3–8 років	Якість вторинних матеріалів
Вуглецеве уловлювання (CCS/CCU)	Технології захоплення, використання та зберігання CO ₂	80–95%	10–20 років	Технологічна незрілість, високі операційні витрати
Заміна сировини	Використання біоматеріалів, синтетичних альтернатив з нижчим вуглецевим слідом	25–50%	3–7 років	Доступність альтернатив, якість продукції
Водневі технології	Використання зеленого водню в енергоємних процесах	60–90%	15–25 років	Інфраструктура, безпека, економічна життєздатність

Згідно таблиці 1 найбільш помітною особливістю є обернена кореляція між потенціалом зниження викидів та доступністю технологій. Вуглецеве уловлювання та водневі технології по-

казують найвищий потенціал зниження викидів (80-95% та 60-90% відповідно), але мають найдовші терміни окупності (10-25 років) та найвищі ризики. Натомість енергоефективність, хоча й



Рисунок 1. Елементи та етапи впровадження комплексної стратегії мінімізації екологічних ризиків

*Джерело: розроблено авторами

забезпечує лише 15-30% зниження викидів, окупається за 2-5 років з мінімальними ризиками. Це створює стратегічну дилему для підприємств: чи інвестувати в швидкі, але менш ефективні рішення, чи фокусуватися на довгострокових проривних технологіях з невизначеними результатами. Таблиця демонструє, що не існує універсального рішення для декарбонізації промисловості. Успішна стратегія повинна комбінувати кілька підходів з урахуванням специфіки підприємства, фінансових можливостей та часових рамок. Звідси, розробка та впровадження комплексної стратегії мінімізації екологічних ризиків є найбільш актуальним та економічно доцільним напрямком розвитку підприємств. На рисунку 1 наведено етапи запровадження комплексної стратегії мінімізації екологічних ризиків від промисловості для досягнення кліматичної нейтральності.

Комплексна стратегія базується на три етапному підході до декарбонізації промислового виробництва з інтеграцією технологічних, економічних та організаційних рішень. Стратегія спрямована на досягнення кліматичної нейтральності через послідовне впровадження від простих енергоефективних рішень до технологій уловлювання вуглецю. На рисунку 2 продемонстровано порівняння ефективності традиційної та комплексно.

На рисунк 2 відображено, що традиційна стратегія показує поступове зниження викидів з 48 млн тон CO₂ у 2024 році до приблизно 35 млн тонн у 2050 році, що становить лише 30% загального зниження за 26 років.

Натомість комплексної стратегія демонструє радикально іншу траєкторію з трьома виразними фазами: помірне зниження до 30 млн тон у 2027 році завдяки швидким перемога, різке прискорення до 5 млн тон у 2035 році через структурні зміни, та практично повну декарбонізацію до менше ніж 1 млн тон до 2050 року завдяки проривним технологіям.

Зелені стовпці ілюструють паралельне зростання частки відновлюваної енергії з 15% до 45%, підкреслюючи синергетичний ефект інтегрованого підходу.

Досягнення кліматичної нейтральності вимагає системної трансформації – традиційні методи забезпечують стабільне, але недостатнє зниження викидів, тоді як комплексна стратегія, попри більші початкові інвестиції, досягає ефекту з практично повною декарбонізацією (98% зниження) до 2048 року.

Комплексна стратегія мінімізації промислових ризиків демонструє кардинальну різницю в економічній ефективності від традиційного підходу.

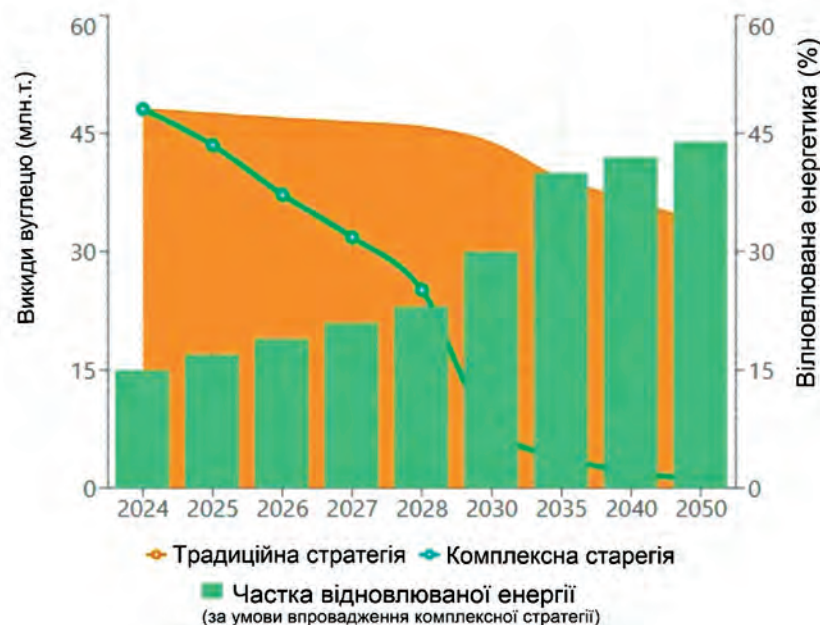


Рисунок 2. Порівняння ефективності стратегій: Викиди CO₂

*Джерело: розроблено авторами



Рисунок 3. Повернення інвестицій

*Джерело: розроблено авторами

На рисунку 3 відображена динаміка повернення інвестицій. Традиційна стратегія показує повільне лінійне зростання ROI від 2.1% у 2027 році до максимальних 5,2% у 2050 році, що свідчить про обмежений потенціал економічного повернення. Натомість комплексна стратегія демонструє експоненціальне зростання – від 4.8% у 2027 році (вдвічі вище за традиційну) до вражаючих 25.8% у 2050 році, що в п'ять разів перевищує традиційний підхід.

Особливо помітним є синергетичний ефект після 2030 року, коли ROI комплексної стратегії різко прискорюється завдяки накопиченій економії від енергоефективності, відновлюваних джерел енергії та зниження витрат на вуглецеві викиди.

Попри значно вищі початкові капіталовкладення, комплексна стратегія забезпечує кардинально кращу довгострокову прибутковість та економічну стійкість, роблячи її єдиним раціональним вибором для досягнення кліматичної нейтральності України.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Зміна клімату є серйозною проблемою сьогодення. Декарбонізація та мінімізація екологічних ризиків промисловості для досягнення кліматичної нейтральності є необхідним кроком для зменшення антропогенного навантаження на довкілля. У ході аналізу існуючих стратегій декарбонізації було виявлено взаємозв'язок між потенціалом

зниження викидів та доступністю технологій. Ця закономірність підтверджує необхідність інтегрованого підходу, що поєднує швидкокоупні рішення з довгостроковими проривними технологіями.

У ході роботи розроблено три етапна комплексна стратегію мінімізації екологічних ризиків промислового сектору, зокрема у сфері викидів. Розроблена стратегія забезпечує оптимальну послідовність впровадження технологій декарбонізації з максимізацією синергетичних ефектів. Перша фаза (2024-2027) прогнозовано забезпечить 25-35% зниження викидів. Друга фаза (2027-2035) включає структурні зміни через масштабне впровадження відновлюваної енергії та електрифікацію процесів, досягне 55-70% зниження викидів. Третя фаза (2035-2050) передбачає впровадження CS/CCU та водневих систем для досягнення практично повної декарбонізації (85-100% зниження викидів).

Прогнозне моделювання на основі українських умов демонструє різницю між традиційним та комплексним підходами до декарбонізації. Традиційна стратегія забезпечує лише 30% зниження викидів до 2050 року, що недостатньо для досягнення кліматичних цілей. Натомість комплексна стратегія досягає 98% зниження викидів з практично повною декарбонізацією до 2048 року.

Розроблена стратегія адаптована до українських умов післявоєнного відновлення та може бути інтегрована в національні програми зеленої трансформації. Результати дослідження підтверджують можливість досягнення кліматичної

нейтральності українськими промисловими об'єктами до 2050 року за умови системного впровадження комплексної стратегії з достатнім фінансуванням та політичною підтримкою.

Список використаної літератури

1. Hsieh, YL., Yeh, SC. The trends of major issues connecting climate change and the sustainable development goals. *Discov Sustain* 5, 31 (2024). <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00183-9>
2. Laharish Guntuka, Prabhjot S. Mukandwal, Emel Aktas, Vamsi Sai Krishna Paluvadi; From carbon-neutral to climate-neutral supply chains: a multidisciplinary review and research agenda. *The International Journal of Logistics Management* 30 April 2024; 35 (3): 916–942. <https://doi.org/10.1108/IJLM-03-2023-0116>
3. Lynnyk, D. O., & Hrytsuliak, G. M. (2023). Analysis of the state of atmospheric air in the city of Ivano-Frankivsk. In 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Vol. 2023, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520140>
4. Mikhaylov, A., Moiseev, N., Aleshin, K., & Burkhardt, T. (2020). Global climate change and greenhouse effect. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 7(4), 2897. [http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4\(21\)](http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4(21))
5. NASA Global Climate Change and Global Warming. (2025). Global surface temperature. NASA's Jet Propulsion Laboratory. <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/?intent=121>
6. Prince U, Ewuzie U, Onwuka C. *Environmental pollution: causes, effects, and the remedies*. Amsterdam: Elsevier; 2020. p. 419–29. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819001-2.00021-8>
7. Filonchyk, M., Peterson, M. P., Zhang, L., Hurynovich, V., & He, Y. (2024). Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO₂, CH₄, and N₂O. *Science of The Total Environment*, 935, 173359. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173359>
8. Wang, F., Harindintwali, J. D., Yuan, Z., Wang, M., Wang, F., Li, S., ... & Chen, J. M. (2021). Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality. *The innovation*, 2(4). DOI: 10.1016/j.xinn.2021.100180
9. Yang, M., Chen, L., Wang, J. et al. Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues. *Environ Chem Lett* 21, 55–80 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01499-6>
10. You, J., Zhang, W., Lin, W. et al. The impact of technological progress and industrial structure optimization on manufacturing carbon emissions: a new perspective based on interaction. *Environ Dev Sustain* 27, 16205–16236 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04531-7>

УДК 628.3:004.8

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202508-021>

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ЧЕРЕЗ ВПРОВАДЖЕННЯ ШІ-СИСТЕМ

Грицуляк Г. М., Коцюбинський А. О., Линник Д. О.,
Качала С. В., Лопушняк В. І.

Івано-Франківський національний університет нафти і газу

Якість водних ресурсів стрімко погіршується внаслідок антропогенного навантаження, ключовим чинником якого є скидання неочищених або недостатньо очищених стоків. У зв'язку з цим постає нагальна потреба у вдосконаленні роботи каналізаційних очисних споруд для мінімізації негативного впливу побутових та промислових стічних вод на водні екосистеми. Інтеграція технологій штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання у системи управління КОС відкриває можливості для прогнозного моделювання ефективності очищення, що сприяє налаштуванню оптимальних технологічних режимів та підвищенню загальної продуктивності станцій. Крім того, використання нейромережових систем для інтерпретації інформації з автоматизованих систем моніторингу забезпечує швидку обробку великих масивів даних, що підвищує

оперативність та обґрунтованість управлінських рішень в експлуатації очисних споруд.

Проведено порівняльний аналіз ефективності традиційних та інтелектуальних методів управління, який продемонстрував суттєве підвищення якості очищення стічних вод та зниження операційних витрат при використанні системи на базі штучного інтелекту. Розроблено технологічну схему інтелектуального управління процесами водоочищення, яка забезпечує збір та аналіз даних у режимі реального часу з можливістю прогнозування навантажень та адаптації до різних умов експлуатації. Створено віртуальну модель малої каналізаційно-очисної споруди з інтегрованою системою штучного інтелекту.

Ключові слова: водні ресурси, забруднення, стічні води, система водоочищення, каналізаційно-очисні станції, штучний інтелект.

IMPROVING THE QUALITY OF WASTEWATER TREATMENT THROUGH THE IMPLEMENTATION OF AI SYSTEMS

Hrytsulyak G. M., Kotsyubynsky A. O., Lynnyk D. O.,
Kachala S. V., Lopushniak V. I.
Ivano-Frankivsk National University of Oil and Gas

The quality of water resources is rapidly deteriorating due to anthropogenic pressure, the key factor of which is the discharge of untreated or insufficiently treated wastewater. In this regard, there is an urgent need to improve the operation of sewage treatment plants to minimize the negative impact of domestic and industrial wastewater on aquatic ecosystems. The integration of artificial intelligence technologies and machine learning algorithms into wastewater treatment plant management systems opens up opportunities for predictive modeling of treatment efficiency, which contributes to the optimization of technological modes and increases the overall productivity of the plants. In addition, the use of neural network systems to interpret information from automated monitoring systems enables rapid processing of large data sets, which increases the efficiency and soundness of management decisions in the operation of treatment facilities.

A comparative analysis of the effectiveness of traditional and intelligent management methods was conducted, which demonstrated a significant improvement in wastewater treatment quality and a reduction in operating costs when using an artificial intelligence-based system. A technological scheme for intelligent management of water treatment processes has been developed, which provides real-time data collection and analysis with the ability to predict loads and adapt to different operating conditions. A virtual model of a small sewage treatment plant with an integrated artificial intelligence system has been created.

Keywords: water resources, pollution, wastewater, water treatment system, sewage treatment plants, artificial intelligence.

Постановка проблеми

Щорічне збільшення споживання води первинним, вторинним та третинним секторами економіки супроводжується відповідним зростанням кількості стічних вод на фоні інтенсифікації водозабору. Скидання стічних вод у поверхневі водні об'єкти відбувається як у очищеному, так і у не очищеному вигляді. У сучасних умовах очищення стічних вод набуває статусу першочергової необхідності. Побутові стічні води безпосередньо потрапляють на каналізаційно-очисні станції для подальшої обробки. Для промислових стічних вод критично важливим аспектом є попереднє очищення на очисних спорудах підприємств, що дозволяє видалити специфічні забруднювачі. Видалення токсичних речовин зі стічних вод реалізується через застосування різноманітних технологій очищення. Подальший розвиток галузі водоочистки пов'язаний із впровадженням штучного інтелекту для оптимізації процесів на КОС, що забезпечує підвищення ефективності водоочистки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасних умовах очищення стічних вод набуває статусу першочергової необхідності. Комunalно-побутові стічні води безпосередньо надходять на каналізаційно-очисні станції для подальшої обробки, тоді як для промислових стічних вод критично важливим є проведення попереднього очищення на локальних очисних спорудах підприємств з метою видалення специфічних забруднювачів. Видалення токсичних

речовин зі стічних вод реалізується через застосування комплексу технологій очищення, що охоплюють механічні методи (фільтрацію та флотацію), фізичні методи (фільтрацію та аерацію), біологічні методи (аеробну та анаеробну обробку) та хімічні методи (дезінфекцію, нейтралізацію та коагуляцію) [8,9,10]. Застосування різноманітних методів очищення забезпечує зниження концентрації забруднюючих речовин у воді та усунення завислих твердих речовин, які після осадження здатні забруднювати водні об'єкти та створювати перешкоди для руху води у каналізаційних системах. Також досягається зменшення вмісту біорозкладних органічних речовин, кількісна оцінка яких здійснюється через показник біологічного споживання кисню (БСК) [11]. Процеси управління та контролю за очищенням стічних вод на КОС характеризуються значною складністю та високими ресурсними витратами. Аналіз основних хімічних показників якості стічних вод – біологічного споживання кисню, хімічного споживання кисню, аміачного азоту, загального азоту та загального фосфору – вимагає значних часових та трудових затрат. Трудомісткість аналітичних процедур значно ускладнює можливість ефективного прогнозування стану каналізаційних систем [1,2].

Інтеграція штучного інтелекту у процеси водоочистки визначає наступний етап еволюції галузі, забезпечуючи комплексну оптимізацію функціонування каналізаційно-очисних станцій. Технології штучного інтелекту на КОС знаходять практичне застосування у широкому спектрі напрямків: від автоматизації технологічних процесів та організації ефективного обслуговування обладнання через аналітичні системи до впровадження постійного моніторингу якості води та оптимізації енергоспоживання, а також включають створення цифрових двійників очисних споруд, реалізацію прогнозних моделей роботи системи та забезпечення комплексного аналізу даних із подальшим формуванням звітної документації [3].

Різнноманітні методи штучного інтелекту знаходять активне застосування у галузі очищення стічних вод для вирішення завдань розпізнавання забруднювачів, оптимізації технологічних режимів та забезпечення раціонального обслуговування устаткування. До поширених методик

відносять метод опорних векторів (SVM), дерева рішень, штучні нейронні мережі, алгоритм випадкового лісу та технології глибокого навчання. Експериментальні дані свідчать про найвищу прогностичну точність штучних нейронних мереж ($R = 0,9958$), мереж довгої короткострокової пам'яті LSTM ($R = 0,9939$) та методу опорних векторів ($R = 0,9957$), які значно випереджають інші підходи за показниками точності прогнозування та моделювання водоочисних процесів [4,7].

Підхід глибокого навчання у сфері водоочищення, заснований на об'єднанні багатоджерельних даних.

Дослідження продемонструвало високу прогностичну ефективність алгоритмів глибокого навчання, зокрема рекурентних нейронних мереж (RNN), мереж довгої короткострокової пам'яті (LSTM) та керованих рекурентних блоків (GRU). Особливо відзначилася архітектура GRU, яка показала найкращі результати у прогнозуванні хімічних параметрів якості води та характеризується прискореним процесом навчання порівняно з іншими методами. Глибоке навчання у поєднанні з інтернетом речей та м'яким зондування утворюють ефективну систему контролю та управління [5, 6].

Визначення цілей статті (постановка завдання)

Метою дослідження є розробка та впровадження інтелектуальної системи оптимізації процесів водоочищення на каналізаційно-очисних спорудах на основі алгоритму Random Forest для підвищення ефективності очищення стічних вод та зниження операційних витрат.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для вивчення функціонування КОС з оптимізацією процесів водоочищення на основі методів штучного інтелекту було створено віртуальну модель малої КОС. Для створення моделі використано комбінований підхід з кількох методів штучного інтелекту: Random Forest як основний алгоритм для прогнозування, LSTM (Long Short-Term Memory) для часових залежностей, One-Class SVM для виявлення аномалій, Q-Learning для адаптивного управління. Основою та джере-

Модуль прогнозування

Вхідні дані	Модель	Прогноз	Горизонт
Історичні витрати	LSTM + RF	Добові піки	24 години
Календарні дані	Prophet	Сезонність	7 днів
Метеорологічні дані	XGBoost	Дощові навантаження	48 годин
Міські події	Регресійна модель	Туристичні піки	72 години

*Джерело: розроблено авторами

лом вихідних даних для віртуальної КОС, таких як: навантаження, потужність, очисні процеси, специфіка сезонності було обрано малу КОС з потужністю 145,000 м³ на добу. Станція здійснює повне біологічне очищення господарсько-побутових стічних вод та включає комплекс основних споруд: приймальну камеру, пісколовки, первинні відстійники, аеротенки, вторинні відстійники, контактні резервуари, мулові майданчики та повітродувні станції. Для КОС такої потужності та комплектації Random Forest є найкращим підходом для III оптимізації.

Random Forest представляє собою ансамбл-алгоритм машинного навчання, що поєднує множину дерев рішень для створення більш точної та стабільної моделі прогнозування.

Алгоритм базується на принципі колективного прийняття рішень, де кожне дерево в лісі навчається на випадковій підвибірці тренувальних даних через bootstrap sampling та використовує тільки випадково обрану підмножину ознак у кожному вузлі дерева.

Загальна структура ансамблю описується формулою 1:

$$\hat{y} = (1/B) \times \sum_{b=1}^B T_b(x) \quad (1)$$

де B – кількість дерев у лісі,

$T_b(x)$ – прогноз b -го дерева для входу x ,

$\hat{y}$ – фінальний прогноз ансамблю.

Оптимізовано КОС складається з основних блоків очисних споруд з накладеною мережею датчиків та контролерів, що забезпечують збір

даних в режимі реального часу від усіх технологічних процесів. Система штучного інтелекту отримує інформацію про параметри роботи кожної споруди та надає конкретні рекомендації для оптимізації процесів очищення, створюючи замкнений цикл інтелектуального управління від збору даних до прийняття рішень.

Цей подвійний рівень випадковості значно зменшує перенавчання та покращує узагальнюючу здатність моделі, а автоматичне обчислення важливості ознак та оцінки надійності прогнозів через out-of-bag помилку робить Random Forest одним з найпрактичніших алгоритмів для реальних завдань управління технологічними процесами. Запропонована система демонструє високу адаптивність до сезонних змін та різних типів стоків через автоматичне налаштування параметрів управління відповідно до поточних умов експлуатації. У таблиці 1 відображено моделі закладені у модуль прогнозування.

Взимку Random Forest автоматично збільшує час утримання, підвищує інтенсивність аерації та корегує вік активного мулу для компенсації зниженої біологічної активності при низьких температурах. Влітку система оптимізується під високі температури та активно управляє процесом денітрифікації для підтримання якості очищення.

Під час дощових періодів система адаптується до розбавлених стоків та попереджає можливі переливи через прогнозування гідравлічних навантажень. Для різних типів стоків система також змінює стратегію управління: для комунально-побутових вод акцент робиться на стабільність біопроцесів, для промислових домішок

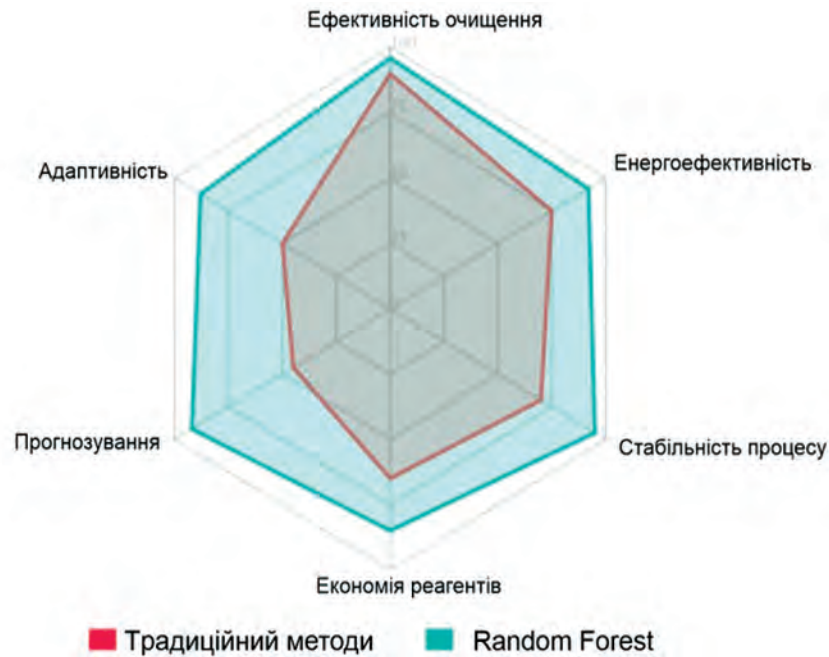


Рисунок 1. Багатокритеріальне порівняння методів

*Джерело: розроблено авторами

забезпечується швидка реакція на токсичні речовини, а для зливових вод здійснюється ефективне управління гідравлічними піками.

Багатокритеріальне порівняння методів управління (Рис.1) у вигляді радарної діаграми демонструє суттєві переваги Random Forest системи над традиційними методами управління за шістьма ключовими критеріями.

Система показує значно вищі показники в ефективності очищення (традиційний 90% проти 96% у Random Forest), енергоефективності (75% проти 92%), стабільності процесу (70% проти 95%), економії реагентів (65% проти 85%), можливостях прогнозування (45% проти 92%) та адаптивності до умов (50% проти 88%). Особливо вражає різниця в можливостях прогнозування,

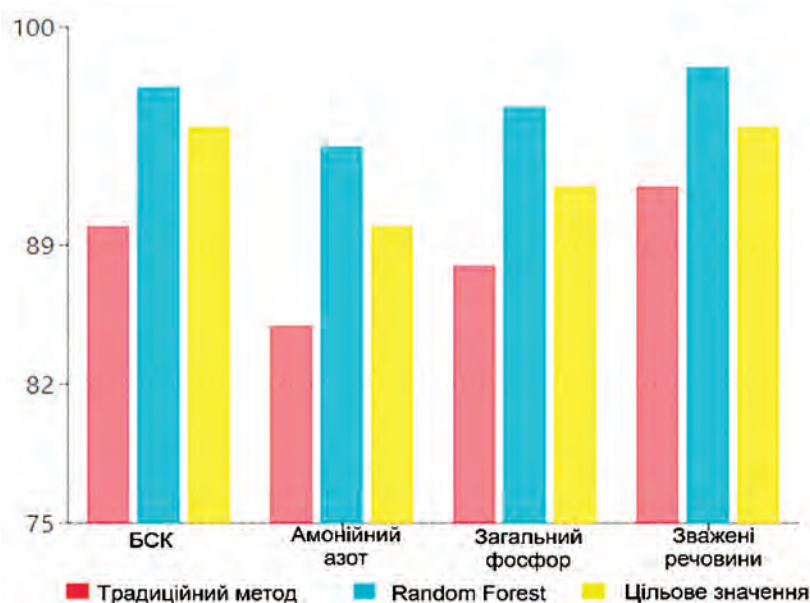


Рисунок 2. Ефективність очищення за параметрами

*Джерело: розроблено авторами

де Random Forest демонструє більш ніж подвійну перевагу, що є критично важливим для превентивного управління складними технологічними процесами.

На рисунку 2 наведено результати аналізу ефективності очищення за ключовими параметрами. Діаграми показує послідовні покращення Random Forest системи порівняно з традиційними методами управління по всіх контрольованих показниках якості води. Для БСК очищення ефективність зростає з 90% до 97%, для азоту амонійного з 85% до 94%, для загального фосфору з 88% до 96%, а для завислих речовин з 92% до 98%. Всі ці показники перевищують цільові значення та відповідають найсуворішим європейським стандартам якості очищення стічних вод, що підтверджує високу ефективність запропонованого підходу для практичного застосування на реальних об'єктах водоочищення.

Впровадження Random Forest системи на малій КОС призведе до кардинальних технологічних покращень у всіх аспектах роботи очисної споруди. Стабілізація БСК з поточних 12-15 мг/л до прогнозованих 6-8 мг/л означає не просто покращення якості очищення, а перехід до стабільного дотримання най-суворіших екологічних стандартів. Підвищення загальної ефективності очищення з 92% до 96-97% та зменшення варіабельності процесу в 2,5-3 рази створить умови для надійної та передбачуваної роботи КОС навіть в умовах змінних навантажень. Попередження аварійних ситуацій на 70-85% кардинально змінить характер експлуатації споруди, переводячи її з режиму постійного реагування на проблеми в режим планової профілактичної роботи.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Отже, якісна очистка стічних води є ключовим кроком для збереження водних ресурсів та уникнення ризику отруєння споживачів. Підбір оптимальної технологічної схеми та методик очистки відіграє вирішальну роль у процесі очищення стоків. Прогнозування та контроль за станом стічних води на очисних сподах є основою для прийняття управлінських рішень у сфері водоочищення. Впровадження системи на базі Random Forest демонструє економію операційних витрат

на рівні 20-30% за умови одночасного зростання ефективності очищення на 15-25% та стабільного дотримання екологічних стандартів, що формує оптимальний баланс між економічною вигодою та екологічною безпекою. Інтеграція інтелектуальної системи управління прогнозовано підвищить продуктивність малих КОС завдяки превентивному характеру роботи, що включає прогнозування потенційних проблем, постійну автоматичну оптимізацію ресурсів, самостійну адаптацію до змінних експлуатаційних умов та здатність до самонавчання на основі операційного досвіду. Подібне впровадження означає трансформаційний перехід від традиційних підходів до якісно нового рівня управління водоочисними технологіями, що поєднує високі екологічні стандарти з економічною ефективністю.

Список використаної літератури

1. Jiang, Y., Li, C., Sun, L., Guo, D., Zhang, Y., & Wang, W. (2021). A deep learning algorithm for multi-source data fusion to predict water quality of urban sewer networks. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128533. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128533>
2. Martínez, R., Vela, N., el Aatik, A., Murray, E., Roche, P., & Navarro, J. M. (2020). On the Use of an IoT Integrated System for Water Quality Monitoring and Management in Wastewater Treatment Plants. *Water*, 12(4), 1096. <https://doi.org/10.3390/w12041096>
3. Lau, B. P. L., Marakkalage, S. H., Zhou, Y., Hassan, N. U., Yuen, C., Zhang, M., & Tan, U. X. (2019). A survey of data fusion in smart city applications. *Information Fusion*, 52, 357-374.
4. Narayanan, D., Bhat, M., Paul, N. S., Khatri, N., & Saroliya, A. (2024). Artificial intelligence driven advances in wastewater treatment: Evaluating techniques for sustainability and efficacy in global facilities. *Desalination and Water Treatment*, 320, 100618. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100618>
5. Wang, G., Jia, Q.S., Zhou, M. et al. Artificial neural networks for water quality soft-sensing in wastewater treatment: a review. *Artif Intell Rev* 55, 565–587 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10462-021-10038-8>
6. Miao, S., Zhou, C., AlQahtani, S. A., Alrashoud, M., Ghoneim, A., & Lv, Z. (2021). Applying

machine learning in intelligent sewage treatment: A case study of chemical plant in sustainable cities. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103009. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103009>

7. Bo, Y. C., & Zhang, X. (2018). Online adaptive dynamic programming based on echo state networks for dissolved oxygen control. *Applied Soft Computing*, 62, 830-839. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.09.015>

8. Afolalu, S. A., Ikumapayi, O. M., Ogedengbe, T. S., Kazeem, R. A., & Ogundipe, A. T. (2022). Waste pollution, wastewater and effluent treatment methods—an overview. *Materials Today: Proceedings*, 62, 3282-3288. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.231>

9. Lynnyk, D. O., Hrytsuliak, H. M., Kotsyubynsky, A. O., Marych, T. M., & Bodnarchuk, O. V. (2025, April). Assessment of Water Quality Indicators on the Territory of the Oil Products Storage Base.

In 18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Vol. 2025, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineer doi.org/10.3997/2214-4609.2025510139

10. Wu, H., Gai, Z., Guo, Y., Li, Y., Hao, Y., and Lu, Z. N. (2020). Does Environmental Pollution Inhibit Urbanization in China? A New Perspective through Residents' Medical and Health Costs. *Environ. Res.* 182 (Mar.), 109128–109128.9. [doi:10.1016/j.envres.2020.109128](https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109128)

11. S. Gopikumar, J. Rajesh Banu, Y. Harold Robinson, S. Raja, S. Vimal, Danilo Pelusi & M Kaliappan. (2023) Geo Spatial Based Real Time Monitoring on Eutrophic Evaluation of Porunai River Basin for Pollution Risk Assessment. *European Journal of Remote Sensing* 56:1. <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1723782>

ОЦІНКА ВПЛИВУ АНТРОПОГЕННОЇ ДІЯЛЬНОСТІ НА БІОРІЗНОМАНІТТЯ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ ІВАНО-ФРАНКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Линник Д. О., Марич В. М., Калин Т. І.,
Коцюбинський А. О., Заріцький В. Б.

Івано-Франківський національний університет нафти і газу

У статті розглядається актуальна проблема впливу антропогенної діяльності на біорізноманіття лісових екосистем Івано-Франківської області в контексті глобальних екологічних викликів та кризи біорізноманіття. Проаналізовано комплекс чинників антропогенного впливу, що призводять до деградації та трансформації лісових екосистем, включаючи вирубку лісів, фрагментацію та руйнування природних середовищ існування, зміну клімату, лісові пожежі різної інтенсивності та частоти, поширення інвазивних видів, процеси урбанізації, розвиток транспортної інфраструктури та інтенсифікацію різних форм господарської діяльності. На основі систематичного аналізу сучасних наукових досліджень встановлено ключові закономірності впливу людської діяльності на структуру та функціонування лісових екосистем у глобально-

му та регіональному масштабах. Показано, що антропогенний тиск призводить до суттєвих змін у видовому складі, зниження біомаси, порушення ґрунтових характеристик, дисбалансу поживних речовин та загального зниження екосистемної стійкості порівняно з непорушеними природними територіями. Особливу увагу приділено регіональним особливостям динаміки біорізноманіття в контексті європейських та глобальних тенденцій. Визначено пріоритетні напрямки збереження та відновлення лісового біорізноманіття на основі інтегрованого підходу, що поєднує природоохоронні стратегії, екологічно орієнтовані практики лісокористування, соціально-економічні ініціативи та залучення місцевих громад.

Ключові слова: біорізноманіття, антропогенна діяльність, ліс, екосистема, забруднення, зміна клімату.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF ANTHROPOGENIC ACTIVITY ON THE BIODIVERSITY OF FOREST ECOSYSTEMS OF THE IVANO-FRANKIVSK REGION

Lynnyk D. O., Marych V. M., Kalyn T. I.,
Kotsyubynsky A. O., Zaritskyi V. B.
Ivano-Frankivsk National University of Oil and Gas

The article discusses the pressing issue of the impact of anthropogenic activity on the biodiversity of forest ecosystems in the Ivano-Frankivsk region in the context of global environmental challenges and the biodiversity crisis. It analyzes a set of anthropogenic factors that lead to the degradation and transformation of forest ecosystems, including deforestation, fragmentation and destruction of natural habitats, climate change, forest fires of varying intensity and frequency, the spread of invasive species, urbanization processes, the development of transport infrastructure, and the intensification of various forms of economic activity.

Based on a systematic analysis of current scientific research, key patterns of human impact on the structure and functioning of forest ecosystems on a global and regional scale have been identified. It has been shown that anthropogenic pressure leads to significant changes in species composition, a decrease in biomass, disruption of soil characteristics, an imbalance of nutrients, and an overall decrease in ecosystem stability compared to undisturbed natural areas.

Particular attention is paid to regional features of biodiversity dynamics in the context of European and global trends.

Priority areas for the conservation and restoration of forest biodiversity are identified based on an integrated approach that combines nature conservation strategies, environmentally oriented forest management practices, socio-economic initiatives, and the involvement of local communities.

Keywords: biodiversity, anthropogenic activity, forest, ecosystem, pollution, climate change.

Постановка проблеми

Лісові екосистеми відіграють критичну роль у підтриманні глобального біорізноманіття та забезпеченні екосистемних послуг. Незважаючи на те, що ліси покривають лише 31% земної поверхні, вони є домівкою для понад 80% наземних видів рослин, тварин та мікроорганізмів і забезпечують середовище існування для 80% видів амфібій, 75% видів птахів та 68% видів ссавців. На сьогодні лісове біорізноманіття перебуває під загрозою внаслідок інтенсифікації антропогенної діяльності. Руйнування та фрагментація природних середовищ існування, надмірна експлуатація ресурсів, поширення інвазивних видів, лісові пожежі та зміна клімату створюють синергетичний негативний ефект, що призводить до деградації лісових екосистем та втрати їхнього видового різноманіття. Івано-Франківська область, розташована в межах Карпатського регіону України, характеризується значним лісовим покривом та високим рівнем біорізноманіття. Однак ці екосистеми зазнають інтенсивного антропогенного тиску. На сьогодні існує потреба в оцінці впливу різних форм антропогенної діяльності на біорізноманіття лісових екосистем регіону для розробки науково обґрунтованих стратегій їхнього збереження та відновлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Втрата біорізноманіття є серйозною загрозою сучасності. Руйнування та фрагментація середовищ існування, надмірна експлуатація,

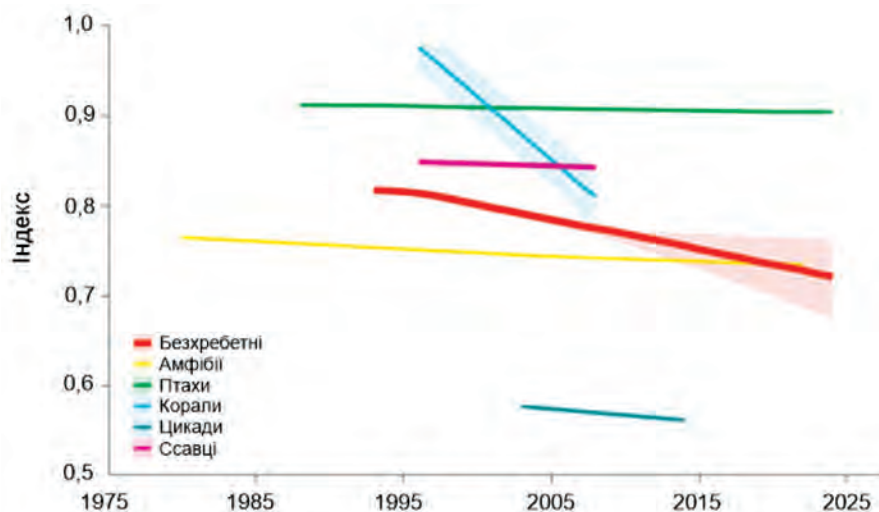


Рисунок 1. Індекс Червоного списку

*Джерело: [2].

інвазивні види та зміна клімату призвести підвищення темпів втрати біорізноманіття [1]. Види, що перебувають під загрозою зникнення, втрачають здатність підтримувати свої екологічні функції, що призводить до порушення стабільності та ефективності функціонування екосистеми в цілому. На рисунку 1 відображено Індекс Червоного списку – показник тенденції ризику вимирання груп видів. Індекс Червоного списку демонструє тенденцію ризику вимирання груп видів. Згідно з Індексом Червоного списку, ризик вимирання зростає у всіх моніторингових групах видів, що означає високу ймовірність втрати видів. Види, що стикаються з вимиранням, можуть не бути здатними виконувати свою звичайну роль в екосистемі, що може знизити функціонування та стійкість екосистеми загалом [2].

Ліси покривають 31% суходолу, є середовищем існування для від 2 мільйонів до 1 трильйона видів організмів і підтримують існування 80% видів амфібій, 75% видів птахів та 68% видів ссавців. Вирубування лісів залишається головною причиною їхнього скорочення – щорічні втрати становлять близько 4,7 млн га. Антропогенна діяльність, включаючи інтенсивну експлуатацію, нераціональне лісокористування, аграрне освоєння, випалювання рослинності, пожежі, урбанізацію та деградацію середовища, спричиняє поступове зникнення флори, фауни й мікроорганізмів. З огляду на те, що з 1751 року в атмосферу викинуто понад 1,5 трильйона тонн CO₂, збереження біорізноманіття в трансформо-

ваних людиною екосистемах є критично важливим для підтримання екосистемних послуг [10].

Ліси належать до найбільш продуктивних, екологічно чутливих і біологічно різноманітних екосистем біосфери. Інтенсифікація індустріалізації та урбанізації у поєднанні зі зростанням чисельності населення суттєво підвищила антропогенний тиск на лісові екосистеми.

Це спричинило масштабне знищення лісів і значне погіршення їхнього екологічного стану. Щорічне скорочення площ лісів негативно позначається на глобальному біорізноманітті. Основними чинниками деградації лісових екосистем є зміна клімату, фрагментація середовища існування, поширення інвазивних видів, надмірна експлуатація та вирубування лісів. Дослідження свідчать, що саме ці фактори визначають коливання рівня різноманіття та багатства видів у лісах світу [4].

Антропогенно трансформовані території характеризуються нижчою біомасою (близько 100 т/га) та меншим видовим різноманіттям (приблизно 20 видів рослин), підвищеною кислотністю ґрунтів (рН 6,5–7) і високим вмістом нітратів та фосфатів. Натомість у мішаних лісах біомаса досягає 200 т/га, кількість видів флори – близько 50, а реакція ґрунтового середовища коливається від помірно кислої до нейтральної (рН 5,5–6) [9].

Одним із суттєвих чинників деградації лісових екосистем є лісові пожежі, зумовлені як біотичними, так і абіотичними факторами. До біотичних належить накопичення рослин, що

підвищують кількість горючих матеріалів та сприяє займистості. Абіотичні чинники включають кліматичні умови, рельєф та тип ґрунтів, які впливають на вологість пального матеріалу та поширення вогню. Хоча за низької частоти пожеж спостерігається підвищення видового різноманіття, збільшення їхньої інтенсивності призводить до скорочення різноманіття та домінування вогнестійких видів [7].

Людський чинник посідає друге місце за значущістю серед факторів, що формують структуру лісів після кліматичних умов (температури та кількості опадів), як у глобальному, так і в регіональному масштабі. Він негативно корелює зі структурною щільністю лісових насаджень та є визначальним фактором регіональних відмінностей у 35,1% світових лісів. Вплив людської діяльності також домінує у формуванні структури лісів у 31,4% та 22,4% лісів у ПТ і НЛЛ відповідно [6]. Антропогенна діяльність часто зумовлена залежністю засобів існування населення та тваринництва від лісових ресурсів унаслідок бідності, безробіття, надмірного випасу худоби, розширення сільськогосподарських угідь і розчищення лісів для альтернативних потреб. Додатковий негативний вплив здійснюють урбанізація, розвиток транспорту й засобів зв'язку, гідроенергетика та туризм. У довгостроковій перспективі ці процеси призводять до зникнення лісових масивів, фрагментації середовищ існування, зниження стійкості екосистем, змін у землекористуванні, трансформації рослинного покриву та видового складу [3,5].

У сучасних умовах особливої ваги набуває врахування питань збереження біорізноманіття у процесі лісовідновлення. Лісистість України становить близько 15,9%. Підвищення температури повітря сприяє поширенню хвороб у лісових екосистемах і може спричинити зміщення зон рослинності, зміну співвідношення форм рельєфу та типів лісу, зниження життєздатності деревостанів і їхньої стійкості до шкідників та хвороб. Наслідками цього є інтенсифікація процесів висихання лісів, масові спалахи чисельності шкідників і зростання частоти та масштабів пожеж, особливо у хвойних лісах.

Зменшення вразливості лісового господарства до кліматичних змін можливе шляхом впровадження стратегічних адаптаційних заходів [8]. Порушення екосистем впливають на біорізнома-

ніття залежно від своєї інтенсивності та просторового поширення, проявляючись у різних часових і просторових масштабах.

Реакція біологічних угруповань на ці порушення визначається також властивостями спільнот і екологічними вимогами окремих видів до умов існування [11].

Визначення цілей статті (постановка завдання)

Мета дослідження – оцінити вплив антропогенної діяльності на біорізноманіття лісових екосистем Івано-Франківської області на основі.

Завдання дослідження:

- 1) Оцінити просторовий розподіл вегетаційного покриву Івано-Франківської області;
- 2) Визначити ключові параметри антропогенного впливу на біорізноманіття лісових екосистем регіону та оцінити рівень їхньої критичності;
- 3) Дослідити часову динаміку екологічних показників.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для оцінки сучасного стану лісових екосистем Івано-Франківської області та рівня антропогенного навантаження було застосовано індексний аналіз і просторове картографування показників рослинності.

Отримані результати дозволяють простежити взаємозв'язок між інтенсивністю господарської діяльності та змінами біорізноманіття. На рисунку 2 відображено просторовий розподіл NDVI в Івано-Франківській області.

NDVI є цінним інструментом для просторової оцінки стану рослинного покриву та ідентифікації потенційних зон екологічної деградації.

Вона дозволяє візуалізувати регіональні закономірності розподілу рослинності, виявити аномальні ділянки та сформулювати гіпотези щодо факторів, що впливають на стан екосистем.

Карта відображає просторовий розподіл нормалізованого різницевого вегетаційного індексу (NDVI) на території Івано-Франківської області за даними супутника Sentinel. Значення індексу варіюють від -1 до $+1$, де вищі позитивні значення свідчать про густу здорову рослинність.

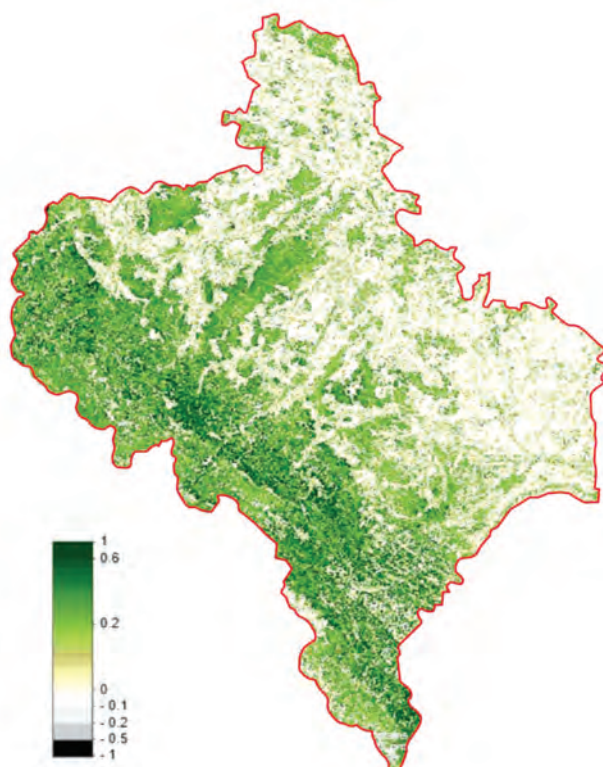


Рисунок 2. Просторовий розподіл NDVI в Івано-Франківській області

*Джерело: розроблено авторами

Просторовий аналіз виявляє чіткий градієнт значень NDVI: південно-західна гірська частина (Карпати) демонструє найвищі показники 0.5-0.6, що відповідає збереженим лісовим масивам. Центральна зона характеризується мозаїчною структурою з NDVI 0.2-0.4 внаслідок чергування сільськогосподарських угідь і лісових фрагментів. Північно-східна частина області має найнижчі значення 0.1-0.3 через інтенсивне агровикористання.

Особливу увагу привертають локальні ділянки з аномально низьким NDVI в районах Долини, Надвірної та Бориславу – історичних центрах нафтогазовидобутку, що може вказувати на техногенну деградацію рослинності.

Білі плями з нульовими або негативними значеннями NDVI позначають урбанізовані території (Івано-Франківськ, Коломия, Калуш, Долина, Болахів) та об'єкти промислової інфраструктури. З метою оцінки загроз біорізноманіттю лісових екосистем розроблено діаграму, що зображена на рисунку 3.

Діаграма відображає шість ключових параметрів оцінки стану лісових екосистем. Червона область діаграми відображає поточний рівень за-

грози для лісових екосистем регіону. Ця область охоплює значну частину простору діаграми, досягаючи показників у діапазоні від 75 до 100 балів за різними параметрами. Найбільші значення спостерігаються за параметрами втрати старовікових лісів, фрагментації лісових масивів та зниження рідкісних видів, що свідчить про інтенсивний антропогенний тиск на ці компоненти екосистем. Дещо нижчі, але все ще критично високі показники характерні для деградації ґрунтів, порушення водного балансу та втрати мертвої деревини. Зелена область на діаграмі представляє цільовий (бажаний) рівень впливу, до якого необхідно прагнути для забезпечення екологічної стабільності та збереження біорізноманіття лісових екосистем. Ця область розташована близько до центру діаграми, формуючи приблизно рівномірний шестикутник з показниками в межах 20-25 балів за всіма параметрами.

На рисунку 4 відображено динаміку зміни показників лісистості, індексу біорізноманіття та температури для Івано-Франківської області.

Графік відображає часову динаміку трьох ключових екологічних показників для Івано-Франківської області за період 1990-2050 років: лі-



Рисунок 3. Загрози біорізноманіттю лісових екосистем Івано-Франківської області

*Джерело: розроблено авторами

систість території (%), індекс біорізноманіття та підвищення середньорічної температури (°C). Для прогнозування використано три методи: 1) лісистість: лінійна екстраполяція з корекційними коефіцієнтами; 2) біорізноманіття: екстраполяція історичного тренду; 3) температура: використано кліматичні моделі IPCC. Графік демонструє екологічний парадокс регіону: лісистість зростає з 42% до прогнозованих 48%, але біорізноманіття падає з 98,4 до 88,6 через заміну корінних лісів монокультурами та зміну клімату, що підтверджується високою оберненою кореляцією між температурою та біорізноманіттям ($r \approx -0,95$). Отримані результати свідчать про наявність чіткої просторово-часової залежності між інтенсивністю антропогенного навантаження та рівнем

деградації лісових екосистем Івано-Франківської області. Виявлені тенденції підтверджують, що сучасний стан біорізноманіття регіону формується під впливом сукупної дії природних і техногенних чинників, що зумовлює необхідність комплексного підходу до його оцінювання та прогнозування.

Покращення стану біорізноманіття лісових екосистем можливе шляхом впровадження екологічно орієнтованих практик лісочористування, розширення природоохоронних територій та відновлення корінних лісових угруповань. Важливу роль відіграє також систематичний моніторинг із використанням методів дистанційного зондування Землі та інтеграція результатів наукових досліджень у регіональні програми сталого розвитку.

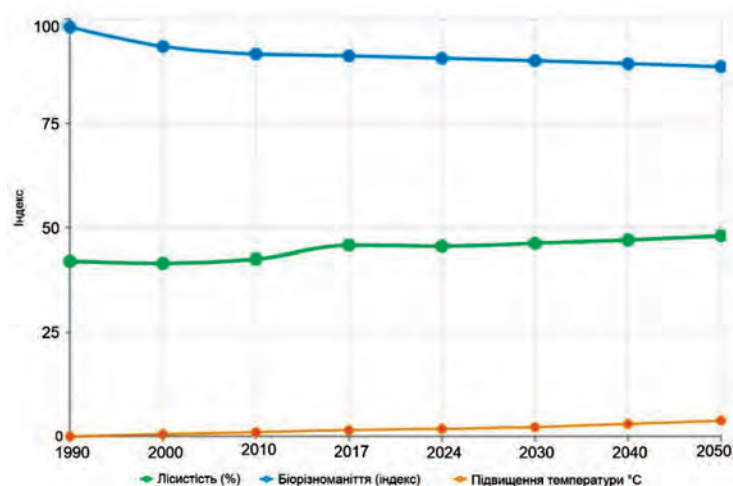


Рисунок 4. Динаміка лісистості та біорізноманіття (1990-2050)

*Джерело: розроблено авторами

Висновки та перспективи подальших досліджень

Комплексний аналіз впливу антропогенної діяльності на біорізноманіття лісових екосистем Івано-Франківської області виявив критичну ситуацію, що характеризується високим рівнем загроз за всіма ключовими параметрами. Просторовий розподіл NDVI демонструє чіткий градієнт деградації рослинного покриву від південно-західних гірських районів (0.5-0.6) до північно-східних рівнинних територій (0.1-0.3), що відображає інтенсифікацію антропогенного тиску. Ідентифіковано локальні зони з аномально низькими значеннями NDVI в історичних центрах нафтогазовидобутку (Долина, Надвірна, Борислав), що свідчить про довготривалий вплив техногенного забруднення на стан лісових екосистем та потребує першочергових заходів екологічної реабілітації.

Оцінка ключових загроз біорізноманіттю показала критично високі рівні впливу за параметрами втрати старовікових лісів, фрагментації лісових масивів та зниження чисельності рідкісних видів порівняно з цільовими показниками (20-25 балів), що вказує на необхідність термінової реалізації комплексних природоохоронних програм. Збереження та відновлення біорізноманіття лісових екосистем Івано-Франківської області потребує реалізації інтегрованої стратегії. Перспективними напрямками подальших досліджень є детальний аналіз просторово-часової динаміки NDVI для виявлення зон активної деградації та відновлення рослинного покриву, а також дослідження кореляційних зв'язків між показниками NDVI та конкретними видами антропогенної діяльності, зокрема нафтогазовидобутком, лісозаготівлею та урбанізацією.

Список використаної літератури

1. Prakash, S., & Verma, A. K. (2022). Anthropogenic activities and Biodiversity threats. *International Journal of Biological Innovations, IJBI*, 4(1), 94-103.
2. WWF. (2024). Living Planet Report 2024: A system in peril. <https://www.worldwildlife.org/publications/living-planet-report-2024>
3. Himshikha, Dobhal, S., Ayate, D., Lal, P. (2022). Influence of Anthropogenic Activities on the Biological Diversity of Forest Ecosystem. In: Rani, M., Chaudhary, B.S., Jamal, S., Kumar, P. (eds) *Towards Sustainable Natural Resources*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06443-2_12
4. Dar, S.A., Nabi, M., Dar, S.A., Ahmad, W.S. (2022). Influence of Anthropogenic Activities on the Diversity of Forest Ecosystems. In: Rani, M., Chaudhary, B.S., Jamal, S., Kumar, P. (eds) *Towards Sustainable Natural Resources*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06443-2_3
5. Spicer, M.E., Radhamoni, H.V.N., Duguid, M.C. et al. Herbaceous plant diversity in forest ecosystems: patterns, mechanisms, and threats. *Plant Ecol* 223, 117–129 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11258-021-01202-9>
6. Li, W., Guo, WY., Pasgaard, M. et al. Human fingerprint on structural density of forests globally. *Nat Sustain* 6, 368–379 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01020-5>
7. Bargali, H., Calderon, L. P. P., Sundriyal, R. C., & Bhatt, D. (2022). Impact of forest fire frequency on floristic diversity in the forests of Uttarakhand, western Himalaya. *Trees, Forests and People*, 9, 100300. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100300>
8. Iliuk, N., Serhiichuk, N., & Lozinska, T. (2024). Analyzing the Relationship Between Biodiversity and the Restoration of Forest Ecosystems in Ukraine. *The Science of Tomorrow: Innovative Approaches and Forecasts*. (pp. 163-168). Futurity Research Publishing. <https://futurity-publishing.com/the-science-of-tomorrowinnovative-approaches-and-forecasts-archive/>
9. Skliar, V., Skliar, Y., Sherstiuk, M., Smoliar, N., & Kanivets, O. (2024). Use of environmental indicators to assess the state of forest ecosystems. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 3(15), 25-42. <https://doi.org/10.31548/forest/3.2024.25>
10. Bhatt, R. P. (2022). Impact on Forest and vegetation due to human interventions. In *Vegetation dynamics, changing ecosystems and human responsibility*. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.105707
11. Viljur, M. L., Abella, S. R., Adámek, M., Alencar, J. B. R., Barber, N. A., Beudert, B., ... & Thorn, S. (2022). The effect of natural disturbances on forest biodiversity: an ecological synthesis. *Biological Reviews*, 97(5), 1930-1947. <https://doi.org/10.1111/brv.12876>

УДК 504.06:519.876.5

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202508-23>

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ В УПРАВЛІННІ ЕКОЛОГІЧНИМИ РИЗИКАМИ

Грицуляк Г. М., Качала С. В., Лопушняк В. І.,
Фомічова О. В., Коцюбинський А. О.

Івано-Франківський національний університет нафти і газу

У статті обґрунтовано доцільність застосування методів системного аналізу для кількісної оцінки та управління екологічними ризиками на локальному рівні. Об'єктом дослідження є рекреаційна територія с. Брусниця Чернівецької області, що характеризується підвищеною чутливістю природних компонентів до антропогенного впливу в умовах сезонного рекреаційного навантаження. Для оцінювання екологічних ризиків використано матричний підхід, заснований на інтегральному показнику ризику як добутку ймовірності настання небезпечної події та тяжкості її наслідків. Проведено ідентифікацію та ранжування шести пріоритетних ризикових подій, пов'язаних зі станом поверхневих і підземних вод, ґрунтів, поводженням з відходами, рекреаційним навантаженням і транспортними викидами. Встановлено, що найвищий рівень

екологічного ризику характерний для поверхневих вод унаслідок скидання недостатньо очищених побутових стічних вод, тоді як найменший – для атмосферного повітря. За результатами досліджуваного аналізу показано, що реалізація комплексу природоохоронних заходів (модернізація систем водовідведення, удосконалення поводження з відходами, захист прибережної смуги) дає змогу знизити сумарний рівень екологічного ризику на 23–30 %. Отримані результати підтверджують ефективність системного підходу як інструменту обґрунтування управлінських рішень у сфері екологічної безпеки рекреаційних територій локального

Ключові слова: екологічні ризики, системний аналіз, метод оцінювання ризику, екологічна безпека, рекреаційні території, методи та технології захисту навколишнього середовища.

APPLICATION OF SYSTEMS ANALYSIS METHODS IN ENVIRONMENTAL RISKS MANAGEMENT

Hrytsulyak G. M., Kachala S. V. Lopushniak V. I.
Fomichova O. V., Kotsyubynsky A. O.

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

The article substantiates the expediency of applying methods of system analysis for quantitative assessment and management of environmental risks at the local level. The object of the research is the recreational area of the village. Blackberry of Chernivtsi region, which is characterized by increased sensitivity of natural components to anthropogenic influence in conditions of seasonal recreational load.

A matrix approach based on the integrated risk indicator as a product of the probability of occurrence of a dangerous event and the severity of its consequences is used to assess environmental risks. The identification and ranking of six priority risk events related to the state of surface and underground water, soil, waste management, recreational load and transport emissions was carried out. It was established that the highest level of environmental risk is characteristic of surface water due to the discharge of insufficiently treated domestic wastewater, while the lowest level is for atmospheric air.

According to the results of the researched analysis, it is shown that the implementation of a complex of environmental protection measures (modernization of drainage systems, improvement of waste management, protection of the coastal strip) makes it possible to reduce the total level of environmental risk by 23–30%.

The obtained results confirm the effectiveness of the system approach as a tool for justifying management decisions in the field of environmental safety of recreational areas at the local level

Keywords: environmental risks, system analysis, risk assessment method, environmental safety, recreational areas, methods and technologies of environmental protection.

Постановка проблеми

В умовах зростання антропогенного навантаження на довкілля та посилення наслідків зміни клімату проблема управління екологічними ризиками набуває особливої актуальності. Території з рекреаційно-санаторною спеціалізацією характеризуються підвищеною чутливістю природних компонентів до впливу господарської діяльності, оскільки якість довкілля безпосередньо визначає їх лікувально-оздоровчий потенціал та соціально-економічну привабливість.

Сучасні підходи до екологічної безпеки ґрунтуються на необхідності переходу від фрагментарного контролю окремих факторів впливу до комплексного аналізу системи «природне середовище – господарська діяльність – населення». У цьому контексті особливого значення набуває застосування методів системного аналізу, які дозволяють враховувати взаємозв'язки між компонентами довкілля, імовірність настання небезпечних подій та тяжкість їх наслідків.

Актуальність дослідження посилюється для малих населених пунктів рекреаційного типу, де сезонне зростання кількості відвідувачів спричиняє пікові навантаження на системи водовідведення, поводження з відходами та використання природних ресурсів. Відсутність належного управління такими процесами призводить до формування локальних екологічних ризиків, що загрожують водним екосистемам, ґрунтовому покриву та санітарно-гігієнічному стану території.

У зв'язку з цим виникає необхідність застосування кількісних інструментів оцінювання екологічних ризиків, які б дозволяли визначати пріоритетні проблеми та обґрунтовувати управлінські

рішення. Одним із таких інструментів є матричні методи оцінювання ризику, що поєднують імовірність виникнення небезпечної події та тяжкість її наслідків у межах системного підходу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У науковій літературі питання екологічного ризику та управління екологічною безпекою територій розглядаються як ключовий інструмент переходу від реагування на наслідки до попередження небезпечних подій. У сучасних дослідженнях екологічний ризик найчастіше трактується як поєднання ймовірності виникнення небезпечної події та тяжкості її можливих наслідків для компонентів довкілля і населення.

Саме тому значну увагу приділяють кількісним та напівкількісним підходам оцінювання, що дозволяють порівнювати ризики між собою, встановлювати пріоритетність та планувати заходи мінімізації [1, 5].

Окремий блок публікацій присвячений застосуванню методів системного аналізу в екології та природокористуванні. Системний підхід розглядає територію як складну систему з взаємопов'язаними підсистемами (водні ресурси, ґрунти, атмосфера, біота, техногенні об'єкти, соціально-економічні чинники), у якій зміни одного елемента здатні запускати «ланцюгові» ефекти. Відповідно, системний аналіз дає змогу:

- структурувати джерела ризику та «точки вразливості»;
- виділяти причинно-наслідкові зв'язки між впливами й станом компонентів довкілля;
- формувати сценарії розвитку ситуації та оцінювати ефективність управлінських рішень.

У практично орієнтованих дослідженнях широко застосовують матричні методи оцінки ризику, оскільки вони зрозумілі для впровадження на локальному рівні, не потребують надмірної кількості вхідних даних і водночас забезпечують ранжування загроз. Типовим є використання інтегрального показника R , що визначається як добуток ймовірності настання події (P) та тяжкості наслідків (S). Такий підхід лежить в основі оцінювання екологічних ризиків, реалізованого і в даному дослідженні: застосовано матричну модель $R = P \times S$ із експертним шкалюванням показників P і S у діапазоні 1–4 [2, 4, 10].

Перевагою матричних методів є можливість виділення зон критичності, побудови карти/матриці ризиків і подальшого переходу до управлінських рішень.

Значна кількість публікацій присвячена оцінюванню ризиків у зонах інтенсивного антропогенного навантаження: промислових агломераціях, територіях впливу енергетичних об'єктів, транспортних вузлах. Вітчизняні дослідження демонструють ефективність комплексного аналізу екологічного стану для виявлення чинників ризику та формування заходів екологічної безпеки. Зокрема, здійснено оцінку екологічної ситуації в зоні впливу Бурштинської ТЕС, що підкреслює важливість інтегрального бачення ризиків та необхідність їх управління на основі обґрунтованих показників [3, 8, 11].

Разом із тим, аналіз сучасних публікацій свідчить, що локальні рекреаційні території (особливо малі населені пункти з сезонним зростанням навантаження) нерідко залишаються поза достатньо деталізованим кількісним аналізом. Для таких територій характерні специфічні ризики, пов'язані з піковими обсягами водовідведення, локальними джерелами забруднення, поведінням з побутовими відходами, рекреаційним тиском та викидами транспорту. У представленому дослідженні саме ці фактори були закладені в основу визначення пріоритетних ризикових подій (водокористування, ґрунти, відходи, рекреаційне навантаження, транспорт), що відповідає сучасній логіці ризик-орієнтованого управління територіями [4, 9, 12].

Окремої уваги заслуговує напрям досліджень, пов'язаний з аналізом у системі управління ризиками: порівняння «базового» сценарію з альтернативними сценаріями впровадження природоохоронних заходів, оцінка очікуваного ефекту та пріоритетності інвестицій.

У даній роботі сценарний підхід демонструє практичну цінність: показано, що за умови реалізації комплексу заходів (модернізація водовідведення, контроль відходів, захист прибережної смуги) сумарний рівень ризику може бути знижений з 63 до 48 умовних одиниць (тобто орієнтовно на 23–30%). Це підсилює аргументацію щодо необхідності системного аналізу не лише для «діагностики» проблем, а й для обґрунтування управлінських рішень [6, 9, 14].

Таким чином, попри наявність значної кількості праць щодо екологічних ризиків і системних методів їх оцінювання, залишається актуальним завдання адаптації цих підходів до умов рекреаційних територій локального рівня, де ризики формуються настику «водокористування–стоки–сезонне навантаження – чутливість природних об’єктів». Саме ця науково-прикладна прогалина й зумовлює необхідність проведення дослідження із застосуванням матричного підходу та елементів сценарного аналізу для обґрунтування пріоритетів екологічної безпеки території.

Визначення цілей статті (постановка завдання)

Метою статті є обґрунтування доцільності застосування методів системного аналізу для кількісної оцінки та управління екологічними ризиками на локальному рівні на прикладі рекреаційної території с. Брусниця Чернівецької області. Для досягнення поставленої мети передбачено ідентифікацію пріоритетних джерел і факторів екологічного ризику для основних компонентів довкілля досліджуваної території, здійснення їх кількісної оцінки з використанням матричного

підходу, що базується на визначенні імовірності настання ризикової події та тяжкості її наслідків, проведення ранжування виявлених ризиків за рівнем небезпеки, а також виконання досліджуваного аналізу впливу природоохоронних заходів на зміну сумарного рівня екологічного ризику з метою обґрунтування пріоритетних управлінських рішень щодо зниження екологічної небезпеки території.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для кількісної оцінки екологічних ризиків у с. Брусниця Чернівецької області застосовано матричний підхід, що базується на добутку імовірності настання події (P) та тяжкості її наслідків (S). Оцінювання проведено для шести пріоритетних ризикових подій, пов’язаних із водокористуванням, станом ґрунтів, поведінням з відходами, рекреаційним навантаженням та транспортними викидами. Значення показників P і S варіювалися в діапазоні від 1 до 4 відповідно до експертної шкали. З урахуванням гідрографії (наявність річки) та рекреаційно-санаторного профілю (мінеральні води, лікування) було виділено 6 пріоритетних ризиків:

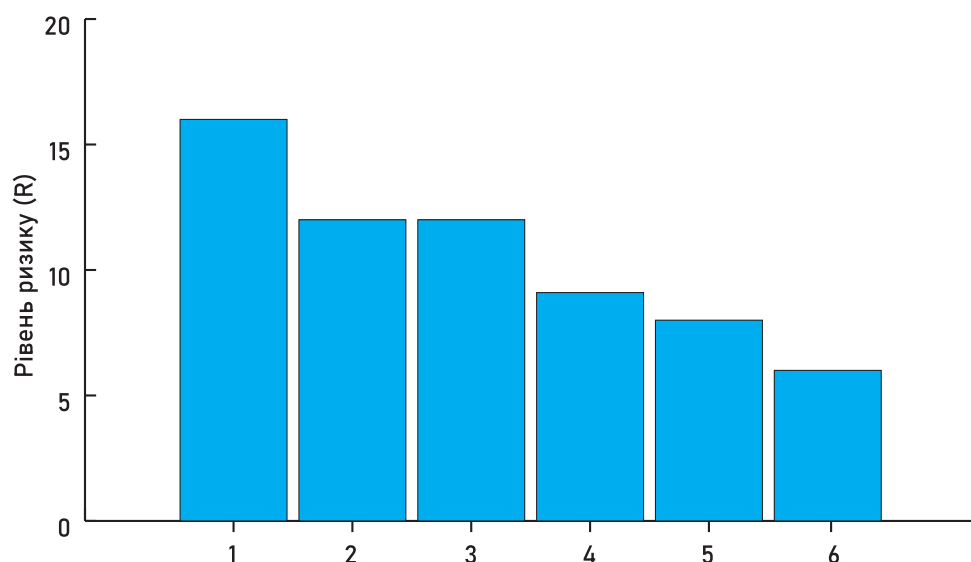


Рисунок 1. Рівні екологічного ризику за основними компонентами довкілля с. Брусниця.

Примітка:

1. Викиди автотранспорту
2. Надмірне використання мінеральних вод
3. Ерозія берегів та замулення
4. Незаконне накопичення відходів
5. Забруднення ґрунтів і підземних вод
6. Скидання недостатньо очищених стічних вод у річку

Таблиця 1

Матриця екологічних ризиків (с. Брусниця)

№	Ризикова подія/фактор	Компонент довкілля	P	S	R=P×S	Рівень
1	Потрапляння недостатньо очищених/ побутових стоків у водотоки (сезонний пік)	вода (р. Брусниця)	4	4	16	критичний
2	Забруднення ґрунтів і ґрунтових вод через негерметичні вигрібні ями/септики	ґрунт/ підземні води	4	3	12	високий
3	Накопичення/спалювання відходів (локальні стихійні смітники)	повітря/ ґрунт	3	4	12	високий
4	Порушення прибережної смуги, ерозія, замулення (змив з доріг/угідь)	вода/біота	3	3	9	помірний
5	Ризики надмірного водокористування/ неправильного поводження з мінеральними водами (в т.ч. рекреаційне навантаження)	підземні води	2	4	8	помірний
6	Локальні викиди від транспорту (дорога + під'їзди до рекреації)	повітря	3	2	6	помірний

- середнє значення: 10,5
- медіана: 10,5
- мінімальне значення: 6
- максимальне значення: 16
- стандартне відхилення: 3,56

Помірне значення стандартного відхилення свідчить про неоднорідність розподілу ризиків

між окремими компонентами довкілля. Це підтверджує доцільність диференційованого підходу до управління екологічною безпекою території.

– найвищий рівень ризику припадає на поверхневі води ($R = 16$), що зумовлено надходженням недостатньо очищених побутових стоків у р. Брусниця;

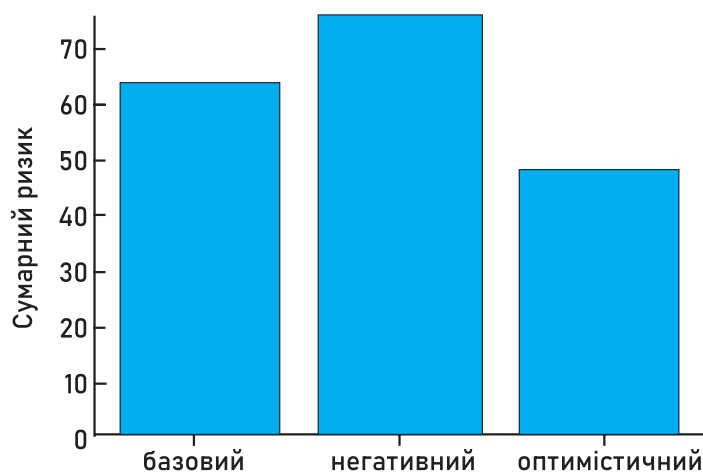


Рисунок 2. Сценарний аналіз сумарного рівня ризику

- високі значення ризику зафіксовані для ґрунтів і поводження з відходами ($R = 12$);
- найменший рівень ризику характерний для атмосферного повітря, пов'язаного з локальними транспортними викидами ($R = 6$).

Найвищий ризик (№1) пов'язаний із тим, що рекреаційні/санаторні об'єкти та приватний сектор створюють пікове навантаження на водовідведення; за наявності водотоку навіть короточасні скиди/підтікання швидко формують екологічні й санітарні наслідки.

Рекреаційна специфіка Брусниці (лікувальні мінеральні води, санаторій) підсилює вимоги до якості середовища й управління стоками/відходами, бо територія «працює» як оздоровча.

Результати оцінювання екологічних ризиків для с. Брусниця свідчать, що найвищий рівень небезпеки пов'язаний зі скиданням недостатньо очищених побутових стічних вод у річку Брусниця ($R = 16$).

Це зумовлює підвищене навантаження на водні екосистеми та створює загрози санітарно-гігієнічному стану території.

Суттєві ризики також встановлено для забруднення ґрунтів і підземних вод ($R = 12$) та накопичення побутових відходів ($R = 12$), що є типовими проблемами для рекреаційних територій із сезонним зростанням кількості відвідувачів.

Сценарний аналіз показав, що за умови реалізації комплексу природоохоронних заходів (модернізація систем водовідведення, контроль поводження з відходами, захист прибережної смуги) сумарний рівень екологічного ризику може бути знижений з 63 до 48 умовних одиниць, що відповідає скороченню на 23–30 %.

Таким чином, результати дослідження підтверджують доцільність застосування системного підходу для екологічної оцінки

Апробація системного аналізу для с. Брусниця показала, що критичні ризики формуються на стику водокористування – стоки – сезонне рекреаційне навантаження при наявності місцевого водотоку (р. Брусниця) та санаторного кластера, пов'язаного з мінеральними (сульфідними) водами.

Системний підхід дозволив кількісно пріоритизувати ризики й обґрунтувати пакет управлінських рішень, що знижує інтегральний рівень ризику приблизно на 20–30%.

Висновки та перспективи подальших досліджень

У роботі обґрунтовано доцільність застосування методів системного аналізу для кількісної оцінки та управління екологічними ризиками на локальному рівні на прикладі рекреаційної території с. Брусниця Чернівецької області. Використання матричного підходу на основі інтегрального показника ризику $R = P \times S$ дало змогу ідентифікувати пріоритетні ризикові події, провести їх ранжування та визначити найбільш уразливі компоненти довкілля.

Встановлено, що критичний рівень екологічного ризику характерний для поверхневих вод р. Брусниця, що пов'язано зі скиданням недостатньо очищених побутових стічних вод у періоди пікового рекреаційного навантаження ($R = 16$). Високі рівні ризику зафіксовано також для забруднення ґрунтів і підземних вод та поводження з побутовими відходами ($R = 12$). Найменший рівень ризику притаманний атмосферному повітрю, що зумовлено переважно локальним характером транспортних викидів ($R = 6$).

Аналіз показав, що реалізація комплексу природоохоронних заходів (модернізація систем водовідведення, посилення контролю за поводженням з відходами, захист прибережної смуги водотоку) дозволяє знизити сумарний рівень екологічного ризику приблизно на 23–30 %, що підтверджує ефективність системного підходу не лише для діагностики екологічних проблем, а й для обґрунтування управлінських рішень.

Отримані результати свідчать, що для рекреаційних територій локального рівня екологічні ризики формуються переважно на стику факторів водокористування, водовідведення та сезонного антропогенного навантаження за наявності чутливих природних об'єктів. Застосування методів системного аналізу забезпечує можливість кількісного порівняння ризиків, їх пріоритизації та переходу до ризик-орієнтованого управління екологічною безпекою.

Перспективи подальших досліджень доцільно пов'язати з удосконаленням методів кількісної оцінки екологічних ризиків шляхом залучення інструментів геоінформаційного аналізу, розширення переліку індикаторів стану довкілля та використання багатокритеріальних моделей при-

йняття рішень. Актуальним напрямом є також поєднання системного аналізу з моніторинговими даними та прогнозними моделями для оцінювання довгострокових наслідків рекреаційного навантаження і змін клімату.

Отримані підходи можуть бути адаптовані для інших рекреаційних та малих населених пунктів з подібною природно-господарською специфікою, що сприятиме формуванню науково обґрунтованої системи управління екологічними ризиками на місцевому рівні.

Список використаної літератури

1. Пендерецький О.В. Оцінка екологічної ситуації в зоні впливу Бурштинської ТЕС : дис. ... канд. техн. наук: спец. 21.06.01. – Івано-Франківськ, 2005. – Т. 1. – С. 202.
2. Д'яченко Н.О., Дятел О.О. Вугільна промисловість: оцінка впливу на довкілля та поводження з відходами. Гірнична геологія та геоecологія № 1 (2020). С. 60–72.
3. Ushcats S.Yu., Mihelev I.L., Zholobenko N.Yu., Markina L.M. Determination of morphological composition of municipal solid waste for Mykolayiv city (Ukraine) and forecasting of their accumulation in the future. *Environmental Sciences*. 2022 № 4(43). С. 190–196.
4. Теорія систем і системний аналіз : навчальний посібник / О.А. Балтовський, К.Ю. Ісмаїлов, О.І. Сіфоров, Г.В. Форос, О.М. Засєць ; за заг. ред. Балтовського О.А. Одеса : РВВ ОДУВС. 2021, 156 с.
5. Приходько В.Ю., Сафранов Т.А., Шаніна Т.П. Сучасний стан сфери управління та поводження з твердими побутовими відходами в Україні. *Man and Environment. Issues of Neoeology*. 2019, Issue 32. Р. 58–66.
6. Мельніченко І.О., Лебідь І.Г., Ткаченко В.А. Системний аналіз управління комунікаціями в освітніх проєктах. Управління розвитком складних систем. № 41. 2020. С. 28–34.
7. Khrutba V. O., Antonenko T. V. System analysis project management communication in waste management. *Proceedings of the National Transport University. Kyiv : NTU*. 2015. Vol. 32. P. 312–320.
8. Yermeyev I., Dychko A., Lytvynenko V. Complex ecological informational system's deviations and their optimization. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. Випуск 3/2021 (128). С. 45–50.
9. Сіпаков Р.В. Удосконалення управління екологічним ризиком від забруднення атмосферного повітря на автошляхопроводах урбанізованих територій (на прикладі м. Києва) : дис. канд. техн. наук : 21.06.01. Київ, 2021. 216 с.
10. Медведєва О., Кропівний В., Мірзак Т., Немировський Я. Системний аналіз якості навколишнього середовища: навчальний посібник для студентів спеціальності 101 «Екологія». Кропивницький: Центральноукраїнський національний технічний університет. 2021. 80 с.
11. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року: схв. Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 8.11.2017 р. № 820-р.
12. Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2020 рік. URL: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diynalnosti/zhkh/terretory/stan-sferypovodzhennya-z-pobutovymyvidhodamy-v-ukrayini-za2020-rik-2>
13. Проєктний менеджмент: управління ризиками та змінами в процесах прийняття управлінських рішень : монографія / О. Б. Данченко, В. О. Занора. Черкаси : ПП Чабаненко Ю. А., 2019. 278 с.
14. Основні показники утворення та поводження з відходами. Головне управління статистики у Харківській області. URL: <http://kh.ukrstat.gov.ua/index.php/dynamikaosnovnykh-pokaznykiv-utvorennia-ta-povodzhennia-zvidkhodam>.

НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ВИКОРИСТАННЯ ШАХТНИХ ВОД ДОНБАСУ ЯК ДЖЕРЕЛА ПИТНО-ГОСПОДАРСЬКОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ ВОЄННИХ ДІЙ

Єрмаков В. М.¹, Яковлєв Є. О.², Чумаченко С. М.³,
Гончаренко І. О.⁴, Соколов Є. В.⁵

¹Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»

²Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

³Державний науково-дослідний інститут авіації, м. Київ

⁴Сумський державний університет, м. Суми

⁵Державна установа «Інститут морської біології НАН України»

sergiy23.chumachenko@gmail.com, evn54@ukr.net

ihorhoncharenko@gmail.com, sokolovev87@gmail.com

Анотація

Метою дослідження є наукове обґрунтування потенціалу використання шахтних вод Донбасу, що відкачуються під час депресії вугільних родовищ, як альтернативного джерела питно-господарського водопостачання в умовах критичного дефіциту водних ресурсів та загострення екологічної ситуації, спричиненої воєнними діями. Методологічна база ґрунтується на комплексному підході, що поєднує гідрогеохімічний аналіз, моделювання гідрогеологічних процесів, екологічну оцінку та технологічний аудит сучасних методів водопідготовки, включно з мембранними технологіями (зворотний осмос, електродіаліз). Проаналізовано світові практики опріснення шахтних вод для адаптації до специфічних умов Донбасу.

Результати свідчать, що попри високий рівень мінералізації та специфічний іонний склад, зна-

чна частина шахтних вод регіону може бути доведена до нормативних показників питної води за допомогою комбінованих технологічних схем, що включають попереднє знезалізнення, пом'якшення та мембранне розділення. Економічна оцінка підтвердила конкурентоспроможність підготовленої шахтної води, особливо з урахуванням логістичних обмежень у регіонах з дефіцитом води.

Отримані результати створюють наукове підґрунтя для розробки регіональної стратегії сталого водопостачання Донбасу та демонструють можливість трансформації екологічно небезпечних шахтних скидів у стратегічно важливий ресурс для післявоєнного відновлення та підвищення стійкості критичної інфраструктури.

Ключові слова: шахтні води, Донбас, питне водопостачання, опріснення, мембранні технології, водний дефіцит, екологічні ризики, резильєнтність водопостачання.

SCIENTIFIC JUSTIFICATION OF THE POTENTIAL USE OF DONBAS MINE WATER AS A SOURCE OF DRINKING AND HOUSEHOLD WATER SUPPLY UNDER CONDITIONS OF ARMED CONFLICT

Ermakov Viktor, Yevhenii Yakovliev, Chumachenko Serhii,
Honcharenko Ihor, Sokolov Yevhen

Abstract

The aim of this study is to provide a scientific justification for the potential use of mine water in the Donbas region - pumped during the depressurization of coal deposits - as an alternative source of domestic and drinking water supply under conditions of severe water scarcity and environmental degradation intensified by ongoing hostilities.

The methodology is based on an integrated approach combining hydrogeochemical analysis, hydrogeological process modelling, environmental assessment, and technological auditing of modern water treatment methods, including membrane-based processes such as reverse osmosis and electrodialysis. Global practices of mine-water desalination were reviewed to identify technologies suitable for adaptation to regional conditions.

The results indicate that despite high mineralization and specific ionic composition, a substantial share of mine water in Donbas can be treated to potable standards using combined technological schemes involving preliminary de-ferroisation, softening, and membrane separation. Economic analysis demonstrated the competitiveness of treated mine water, particularly in water-deficient or logistically constrained areas.

The findings provide a scientific foundation for developing a regional strategy for sustainable water supply in Donbas and highlight the potential to transform environmentally hazardous mine-water discharges into a valuable resource that supports post-war recovery and enhances the resilience of critical infrastructure.

Keywords: mine water; Donbas; drinking water supply; desalination; membrane technologies; hydrogeochemistry; water scarcity; environmental risks; water infrastructure resilience.

Вступ

Донбас історично належить до регіонів із найвищим рівнем техногенного навантаження в Україні. Ще з радянських часів територія характеризувалася значними обсягами викидів забруднювальних речовин в атмосферу, скидів неочищених стічних вод у поверхневі водні об'єкти та масштабним накопиченням промислових відходів. Такі умови були зумовлені поєднанням природно-ресурсних чинників і структурою регіональної економіки, що базувалася на вугільній та хімічній промисловості, гірничо-металургійному комплексі та машинобудуванні. Протягом понад 200 років на території площею близько 15 тис. км² інтенсивно розробляли вугільні родовища: із надр було вилучено близько 20 млрд т порід, з яких 15 млрд т – вугілля. Унаслідок цього на площі близько 8 тис. км² зафіксовано середнє просідання земної поверхні на 1,5–2 м, а об'єм деформованого породного масиву оцінюється у 600 км³.

Висока концентрація потенційно небезпечних об'єктів (ПНО) значною мірою визначає рівень техногенної небезпеки регіону. Зокрема, станом на 2009 р. у Донецькій області функціонували 157 вугільних шахт, 108 гідротехнічних споруд, 537 автозаправних станцій, 12 кар'єрів, 11 залізничних станцій, 115 мостів і шляхопроводів,

1 тунель та 13 магістральних трубопроводів. У Луганській області діяли 69 шахт, 66 гідротехнічних об'єктів, 247 автозаправних станцій, 3 кар'єри, 2 залізничні станції, 13 мостів і 5 магістральних трубопроводів.

На початок 2013 р. у Донецькій області було зареєстровано 3020 ПНО (13 % від загальної кількості по Україні), що становить у середньому 114 об'єктів на 1000 км². У Луганській області налічувалося 1220 ПНО (5 % загальної кількості), або 46 об'єктів на 1000 км². Значна частина цих об'єктів відносилася до вибухо-, пожежо-, гідродинамічно та хімічно небезпечних.

Сьогодні однією з найгостріших екологічних загроз регіону є масове затоплення шахт, спричинене бойовими діями та зупинкою систем водовідливу. Припинення відкачування води на низці шахт, особливо на тимчасово непідконтрольних територіях, призвело до стрімких змін у гідрогеологічному режимі, зростання мінералізації та токсичності шахтних вод, просідання поверхні, підтоплення населених пунктів і транспортної інфраструктури, а також деградації ґрунтів та екосистем.

Негативний вплив затоплених шахт проявляється у кількох ключових компонентах довкілля:

1. Гідросфера: підняття рівня ґрунтових вод, забруднення водоносних горизонтів сульфатами, важкими металами, фенолами та потенційними радіонуклідами.

2. Літосфера: локальні просідання земної поверхні (у деяких районах – до 60 см), які призводять до пошкодження будівель та інженерних споруд.

3. Атмосфера: ризик вторинних хімічних викидів унаслідок руйнування промислових об'єктів та складів реагентів, зокрема хлору.

4. Біота: деградація ґрунтів, зниження біорізноманіття, погіршення умов ведення сільського господарства.

Таким чином, екологічний стан Донбасу значною мірою визначається критичною ситуацією з шахтними водами, що становлять як значну загрозу для довкілля, так і потенційний ресурс у разі впровадження сучасних технологій водопідготовки. У цьому контексті актуальним є наукове дослідження можливостей використання шахтних вод як альтернативного джерела питно-гос-

подарського водопостачання, особливо з огляду на загострення водного дефіциту в умовах воєнних дій.

Аналіз попередніх досліджень

Проблематика використання шахтних вод як потенційного ресурсу для питно-господарського водопостачання досліджувалася у світовій практиці і частково – у контексті Донбасу до 2014 року. Однак безпрецедентні зміни, спричинені повномасштабною війною з 2022 року, докорінно трансформували характер викликів, пов'язаних із шахтними водами, включно з їхнім обсягом, режимом накопичення, хімічними властивостями та впливом на довкілля.

Сучасна наукова література фактично не містить комплексних рішень, які б одночасно враховували екологічні, технологічні, безпекові, інфраструктурні та економічні аспекти використання шахтних вод в умовах воєнних дій.

Це формує нагальну потребу в оновленому науковому підході, що виходить за межі традиційних інженерних та екологічних завдань і орієнтується на забезпечення резильєнтності, автономності та життєстійкості систем водопостачання у період тривалої нестабільності, руйнувань та гібридних загроз. Ключові не вирішені науково-практичні проблеми водопостачання Донбасу в умовах воєнних дій:

1. Непередбачувана динаміка гідрохімічного режиму

Масове та неконтрольоване затоплення шахт унаслідок бойових дій призвело до різких змін у гідрогеологічних системах.

Порушення водовідливу спричинило інтенсифікацію процесів вилуговування порід, перемішування водоносних горизонтів, накопичення токсичних сполук і потенційне забруднення вод військовими відходами.

Брак актуального моніторингу призводить до значних прогалин у даних про мінералізацію, хімічний склад і об'єми шахтних вод.

Стандартні моделі водопідготовки не враховують таких різких коливань якості води, що потребує розробки адаптивних технологічних схем.

2. Деградація централізованої інфраструктури та проблема резильєнтності

Систематичні атаки на інфраструктуру – водогони, насосні станції, електромережі – зробили централізовані системи водопостачання ненадійними та вразливими. Наявні наукові підходи не містять модернізованих концепцій проєктування систем водопідготовки, здатних забезпечувати автономність, мобільність, стійкість до фізичних пошкоджень та швидке відновлення. Традиційні стаціонарні очисні споруди не відповідають вимогам часу, а тому потрібне обґрунтування доцільності використання децентралізованих, модульних установок, поєднаних із автономними джерелами енергії.

3. Оцінка техніко-економічної доцільності в умовах гібридних ризиків

Звичайні моделі техніко-економічного аналізу є недостатніми для умов війни. Методологія має враховувати непрямі, приховані та довгострокові витрати: критичний дефіцит водних ресурсів, логістичні витрати на доставку води, регулярні витрати на відновлення зруйнованої інфраструктури, гуманітарні втрати через нестачу води, стратегічну цінність забезпечення життєдіяльності населення.

Без переосмислення економічних критеріїв інвестиції в автономні системи можуть здаватися необґрунтованими, хоча в умовах війни вони є єдино життєздатними.

4. Екологічні ризики поводження з концентратами в умовах бойових дій

Очищення високомінералізованих шахтних вод неминуче супроводжується утворенням концентратів (розсолів). У мирний час їх утилізація вже є складним завданням, а під час війни – ще більш небезпечним. Обмежений доступ до полігонів, ризик руйнування інфраструктури, мінна небезпека та загроза потрапляння концентратів у довкілля потребують розробки мобільних, екологічно безпечних та енергоефективних рішень, спрямованих на мінімізацію об'ємів відходів та безпечне поводження з ними.

Аналіз останніх наукових досліджень та публікацій

Проблематика використання шахтних вод як потенційного ресурсу для питно-господарського водопостачання протягом останніх десятиліть привертала увагу світової наукової спільноти, особливо в регіонах, що характеризуються поєднанням інтенсивного гірничодобувного виробництва та дефіциту водних ресурсів. У міжнародній практиці значний досвід накопичено в Південній Африці, де кислі шахтні води з високою мінералізацією та вмістом важких металів очищуються до рівня питних стандартів за допомогою комбінованих технологій нейтралізації, коагуляції та мембранного розділення. Зокрема, системи, реалізовані у Witwatersrand Gold Fields, демонструють високий рівень ефективності мембранних технологій, зворотного осмосу та інтегрованих схем попередньої обробки [1, с. 579–583]. Подібні тенденції простежуються і у США, де в штатах Пенсільванія та Західна Вірджинія створені пілотні системи очищення шахтних вод для технічних потреб, зрошення та підтримки локальних екосистем. Окремі дослідження, зокрема J. Brady та ін., присвячені застосуванню електрохімічних технологій, що дозволяють зменшити обсяг утворення концентратів та забезпечити гнучкість систем водопідготовки в умовах коливання якості вихідної води [8, с. 112–119].

Зростаючий інтерес до використання шахтних вод як альтернативного ресурсу спостерігається і в Китаї, найбільшому видобувачі кам'яного вугілля у світі. Дослідження X. Wang і співавт. підкреслюють ефективність комбінованих технологічних схем, що включають біологічну очистку, коагуляцію, ультрафільтрацію та зворотний осмос для повторного використання шахтних вод у промислових та сільськогосподарських цілях [6, с. 5–9]. У зазначених роботах наголошується, що мембранні технології залишаються ключовим елементом системи очищення, але їх успішне застосування можливе лише за умови ретельно спроектованої попередньої обробки з метою зниження жорсткості, видалення завислих речовин і металів. Це підтверджують й оглядові праці M. El-Din та ін., які підкреслюють універсальність мембранних процесів для вилучення солей та

важких металів, однак одночасно наголошують на їхній енергоємності та чутливості до забруднення мембранного полотна [2, с. 36155–36158].

Важливим напрямом розвитку технологій очищення шахтних вод є електродіаліз. Результати досліджень J. Van der Bruggen та ін. показують, що електродіаліз є ефективним та енергоощадним методом для видалення солей з вод низької та середньої мінералізації, особливо коли повне опріснення не є обов'язковим, а необхідне лише часткове зниження загальної мінералізації до нормативних значень [5, с. 8–13].

Крім того, технології попередньої обробки, такі як коагуляція-флокуляція, осадження та сорбційні методи, розглянуті у дослідженнях L. Li та ін., відіграють критичну роль у забезпеченні стабільності роботи мембранних систем, зменшенні ризику їхнього забруднення та подовженні експлуатаційного ресурсу [7, с. 2–6].

У контексті Донбасу проблема шахтних вод досліджувалася українськими науковцями ще до 2014 року. У роботах І. Заболоцької, В. Сенаторова, О. Донця, В. Савенка та інших детально аналізуються екологічні наслідки затоплення шахт, зміна гідрогеологічного режиму та ризику забруднення водоносних горизонтів важкими металами і сульфатами [3, с. 68–72; 4, с. 178–182]. Праці Є. Яковлєва, Є. Анпілової, О. Трофимчука та ін. визначають довгострокові ризики хімічного та радіологічного забруднення, пов'язані з неконтрольованим підтопленням гірничих виробок, а також моделюють можливі сценарії змішування шахтних вод із підземними водоносними горизонтами [9, с. 44–51; 10, с. 23–31].

Проте повномасштабне вторгнення РФ у 2022 році кардинально змінило параметри гідрогеологічних систем Донбасу. Масове зупинення водовідливу, руйнування гідротехнічної інфраструктури та ускладнений доступ до більшості шахт призвели до формування нових водно-хімічних систем, параметри яких досі не піддавалися систематичному науковому аналізу.

Накопичення шахтних вод, їхня зміна мінералізації, можливе потрапляння військових токсикантів та паливно-мастильних матеріалів створюють принципово новий набір загроз, який не був властивий довоєнному періоду. Таким чином, наявні дослідження частково втратили актуальність, оскільки базуються на довоєнних даних і

не враховують різку зміну гіdroхімічних процесів, спричинену бойовими діями [11, с. 102–109].

Сучасна міжнародна література з військової гідрогеології також надає важливі орієнтири. У роботах A. Szymański та ін. описано моделі забруднення підземних вод у зонах бойових дій та наголошено на необхідності адаптивного підходу до оцінки якості води в умовах військових ризиків [12, с. 204–210]. Публікації R. Gutiérrez-Álvarez та ін. також підкреслюють, що конфлікти призводять до важко прогнозованих змін у геохімії підземних вод, що потребує створення мобільних систем моніторингу та швидких технологій очищення [13, с. 511–518].

Варто відзначити і нові підходи до техніко-економічної оцінки систем очищення води в умовах гібридних загроз. Дослідження J. Nan та ін. аналізують вплив факторів нестабільності, перебоїв в енергопостачанні та руйнування інфраструктури на вартість та ефективність автономних систем водопідготовки, що є релевантним для Донбасу [14, с. 139–147].

Окремі праці S. Patel та ін. розглядають питання мінімізації утворення концентратів та безпечної утилізації високомінералізованих розсолів у кризових умовах, що має особливе значення з урахуванням мінної небезпеки на сході України [15, с. 223–229].

Таким чином, аналіз сучасних наукових досліджень виявляє значну кількість напрацювань у сфері очищення шахтних вод та водопостачання у складних умовах, але водночас демонструє *відсутність комплексних рішень*, які б інтегрували технологічні, екологічні, економічні та безпекові аспекти, релевантні ситуації на Донбасі після 2022 року. Це визначає необхідність розвитку адаптованих, резильєнтних і економічно доцільних технологічних схем, здатних перетворити шахтні води з джерела екологічної небезпеки на важливий елемент системи сталого водопостачання у воєнний та післявоєнний період.

Виклад основного матеріалу дослідження

1. Регіональна характеристика структурно-геологічних, гідрогеологічних та еколого-геологічних умов Донбасу.

Гідрогеологічні умови регіону Донбасу достатньо повно описані у виданій літературі та

фондових роботах, тому вони були використані при характеристиці території обстеження резервних джерел питно-господарчого водопостачання (ПГВ). У зв'язку з цим у розділі приводяться тільки ті особливості геологічної будови басейну та його гідрогеологічних умов, які пов'язані з переважаючим впливом на геологічне середовище гірничих (вугледобувних) робіт, іншої господарчої діяльності та військових дій.

Особливості геолого-гідрогеологічних умов Донбасу для визначення особливостей формування ресурсів прісних підземних вод та водоприпливів до вугільних шахт прийнято визначати трьома типами гідрогеологічної розкритості комплексу кам'яновугільних відкладів.

Природні та техногенно-порушені умови у вугледобувних районах Донбасу на сучасному етапі функціонування гірничо-добувних районів, промислово-міських агломерацій, об'єктів критичної інфраструктури, в т.ч. систем питно-господарчого водопостачання (ПГВ), мають певні особливості, які переважно формуються переважно під впливом факторів затоплення чичленних шахт.

До **особливостей природних умов** території Донбасу відносяться:

1) геолого – структурні: різноманітність форм та розмірів складчастих структур басейну (по формі це синклінальні та антиклінальні споруди від лінійних до брахіскладок із заляганням верств порід від горизонтального до майже вертикального); приналежність шахт до певних геоморфологічних елементів та ступінь розчленування рельєфу в зонах формування водозбору над шахтними полями; анізотропність кам'яновугільних відкладів у просторі і часі;

2) гідрогеологічні: залежність площ підземних прісних та слабо- мінералізованих вод від простягання порід та перешарування добре- і слабопроникних порід, що складають водоносні горизонти кам'яновугільних відкладів; скорочення кількості їх ділянок та площ з початком процесу затоплення нерентабельних шахт та кар'єрів.

До **особливостей техногенно-порушених умов** Донбасу можна віднести:

1) способи і система розробки родовищ кам'яного вугілля: наявність дуже складної системи гірничих виробок у широкому діапазоні глибин

з великою кількістю закритих і затоплених шахт; розширення фронту робіт у плані; тривалість експлуатації шахт;

2) гідрогеодинамічні: просторовий і несталий характер руху підземних вод в межах діючих і закритих шахт; наявність регіональних депресійних воронок, що поширюються далеко за межі шахтних полів, і локальних, що переміщуються разом з очисними виробками шахт; посилення інфільтраційного живлення атмосферними опадами над шахтними полями за рахунок зростання тріщинуватості після обрушення покрівлі над відпрацьованими очисними спорудами; збільшення проникності порід у зонах обрушення над покрівлею гірничих виробок; поглинання поверхневих вод і проникнення їх у гірничі виробки на ділянках порушених гірських масивів під водотоками та водоймищами;

3) інженерно-геологічні: формування мульд просідання земної поверхні над шахтними полями (величина просідання часом досягає 3-4 м), в яких утворились ділянки підтоплених і заболочених земель; ущільнення порід через деякий час після їх обвалення (в залежності від літологічного складу і ступеня метаморфізму кам'яновугільних відкладів); гідростатичне та дегідраційне стискання ґрунтів під час утворення депресійних воронок; щільне промислово – селітебне навантаження над більшістю вугледобувних комплексів з додатковим техногенним живленням ґрунтових вод.

2. Еколого-ресурсний стан поверхневих вод Донбасу.

На якості поверхневих вод та режимі поверхневих водотоків край негативно позначилася довгострокова (більше 200 років) гірничодобувна діяльність в Донбасі.

Загальний ресурс поверхневих вод Донбасу формується басейнами річок Дніпра, Сіверського Дінця та малих річок Приазов'я (див. рис. 1).

У природних умовах основне живлення річки Донбасу отримують за рахунок атмосферних опадів і, перш за все, за рахунок весіннього танення снігів, яке забезпечує 40-80 % їх стоку.

Живлення з підземних вод є значним лише в межах Донецького кряжу, де за рахунок глибокого врізу долини річок дренують водоносні горизонти у кам'яновугільних і покривних відкладах.

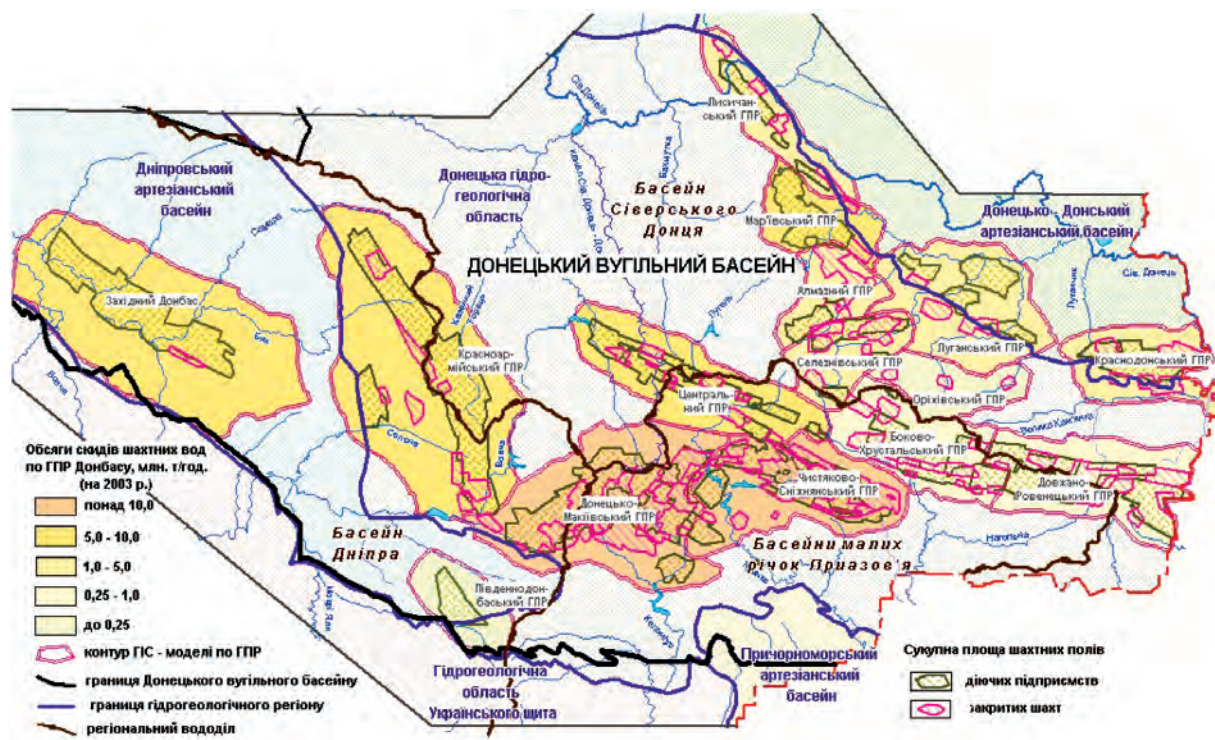


Рисунок 1. Схема розташування басейнів річок Донбасу, що формують ресурс поверхневих вод та прогнольні обсяги скиду в них шахтних вод

Досить значну роль у живленні річкового стоку відіграють дренажні (шахтні) води. Загальна кількість скидів цих вод у поверхневі водотоки за станом на 1995 р. складала біля 25 м³/с [4, с. 178–182], а на сучасний період (за розрахунками авторів) – 24,2 м³/с або 87,0 тис.м³/год. (табл. 1).

Слід зазначити, що промислові об'єкти, розташовані у Донбасі, скидають в річки близько 70 м³/с (252 м³/год.). При цьому для житлово-побутового і промислового використання з річок забирається відповідно біля 39 м³/с (140 м³/год.) за даними [3, с. 68–72].

Визначення впливу вугледобувних підприємств на формування еколого-ресурсних параметрів поверхневого стоку базувалося на зіставленні природних показників режиму річок в не порушеному стані з такими показниками в умовах техногенного впливу.

Проте вирішення цього завдання ускладнювалося такими обставинами:

1. Розробка вугільних родовищ в Донбасі, яка супроводжувалася осушенням гірничого масиву і масштабним скидом дренажних вод у поверхневі водотоки, почалася понад 130 років тому. Водночас системне вивчення гідрологічного режиму річок Донбасу започатковано лише у другій поло-

вині 40-х років минулого сторіччя, тобто на той час техногенна складова вже існувала і жодних спроб виділити і оцінити її не було зроблено.

2. Відсутні багаторічні системні дані щодо обсягів скидів шахтних вод у річки. Для річок Донбасу характерний надзвичайно великий діапазон значень витрат у різні періоди року. При такому діапазоні витрат питання зіставлення є досить складним, оскільки в період повені вплив скиду шахтних вод може бути незначним, а в межений – визначальним. Тому для зіставлень можуть бути використані лише середньобаторічні витрати річок, або витрати 50% забезпеченості.

3. Для річок Донбасу, особливо Приазов'я, характерний природний широкий діапазон вмісту розчинних солей.

Мінералізація води в них змінюється від (0,2–0,3) г/дм³ в період водопілля до (3,5–5,0) г/дм³ в межень. При мінералізації шахтних вод переважно (2,0–4,0) г/дм³ їх скид у поверхневі водотоки може мати як негативний, так і позитивний ефект.

У Донбасі є велика кількість підприємств з водомісткими технологіями і значними обсягами скидів, що втричі перевищує обсяги скидів шахтних вод (з промислово-міських агломерацій скидалося до 70 м³/с або 252 тис. м³/год.).

Таблиця 1

**Масштаби вугледобувних робіт по основних річкових
басейнах Донбасу (станом на 2012-2013 рр.)**

Річкові басейни Донбасу I порядку		Площа впливу шахтних полів, тис. км ²	Обсяги скиду шахтних вод (за 2012 р.), тис. м ³ /год.	Видобуток вугілля р. (за 2013 р.), млн млн. т/ рік	Всього шахт з водовідливом: діючих/ закритих	Модуль скиду шахтних вод, м ³ /год.на км ²
Басейн р.Дніпро-Самара		1,59	14,70	18,17	31 / 4	0,8
Басейн р.Сіверський Донець		2,29	30,18	18,09	65 / 29	1,1
Малі річки Приазов'я	Кальміус	0,64	11,63	6,04	18 / 9	1,7
	Міус	1,50	30,46	9,67	69 / 18	1,8
Загалом по Донбасу		6,02	86,97	51,96	183 / 61	1,3

Для забезпечення житлово-комунальних потреб з 1958 року каналом Сіверський Донець – Донбас подавалося до 35 м³/с води, а з початку вісімдесятих років минулого століття – до 45 м³/с води каналом Дніпро-Донбас.

Після використання цієї води і незворотних технологічних втрат значна її кількість скидається у річки, цілком змінюючи витратну частину річкового стоку. На жаль, всі існуючі гідрологічні довідники не враховують цих обставин [13, с. 511–518]. В них наведені лише результати обробки багаторічних матеріалів без вилучення техногенної складової живлення.

Зазначені обставини дещо знижують достовірність проведених оцінок, проте навіть на тлі їх прояву у багатьох випадках вплив підприємств вугледобувного комплексу на формування поверхневого стоку є показовим.

3. Еколого-ресурсний стан підземних вод Донбасу.

В регіональному плані умови накопичення ресурсів і формування якості підземних вод Донбасу є складними і різноманітними.

Специфіка гідрогеологічних умов різних зон Донецької і Луганської областей на сучасному етапі формування є результатом складної взаємодії геологічних (склад водоносних порід, їх розчинність та ін.), фізико-географічних (кількість опадів, розвиток річкової мережі, клімат та ін.)

та, в останні десятиріччя техногенних (дренування шахтами, кар'єрами, водозаборами, інфільтрація техногенних забруднень та ін.) чинників.

В той же час слід відмітити окремі регіональні закономірності у розповсюдженні підземних вод, їх ресурсів та якості.

Так в зонах неглибокого і відкритого залягання вугленосних порід («відкритий Донбас – центральна і східна частини Донецької та південно-західна частина Луганської областей») характерними є розвиток тріщинувато-пористих вод з достатньою промитістю водоносних порід до глибини 100-200 м.

Північні регіони Донецької і Луганської областей мають гідрогеологічну структуру артезіанського басейну з поверховим розвитком водоносних горизонтів у пухких осадових породах.

При цьому нижні горизонти (3-й, 4-й від поверхні) вміщують мінералізовані (солоні) води, які обумовлюють підвищений вміст солей у шахтних водах і їх забруднюючий вплив на річки, джерела, колодязі та перший від поверхні ґрунтовий водоносний горизонт.

Підземні води зустрічаються у всіх стратиграфічних комплексах порід. Дніпровський та Дніпровсько-Донецький (з Донецько-Донським) артезіанські басейни багаті на прісні підземні води, які формуються у мезо-кайнозойських відкладах. У Донецькій гідрогеологічній складчастій області

Сукупні дані про вугледобувне навантаження по гідрогеологічних областях басейнах (на 1.01.2014 р.)

Гідрогеологічні області, артезіанські басейни (АБ)	Площа, км ²			
	регіону	шахтних полів	міст, смт	міст, смт на шахтах
Донецька складчаста область	22 963	4 219	2272	963,9
Дніпровський АБ	8 743	649	114,9	14,3
Дніпровсько-Донський АБ	311	-	-	-
Донецько-Донський АБ	4 343	28	281,5	21,9
Гідрогеологічна область УЩ	3 931	-	48,5	-
Причорноморський АБ	789	-	12,2	-
Всього	41 080	4 896	2729	1 000,1

в межах поширення палеозойського складчастого комплексу метаморфізованих осадових порід (від девону до початку мезозою) запаси підземних вод приурочені до водоносних комплексів юрських, тріасових, нижньопермських і кам'яновугільних відкладів (див. рис. 1., табл. 2).

Головними природно-техногенними факторами формування ресурсів прісних підземних вод в межах басейнів підземних вод Донбасу та їх взаємодії з поверхневим стоком у сучасних природно-техногенних умовах є специфіка структурно-тектонічної будови, розчленування рельєфу для зон активного водообміну з урахуванням водозбірних площ і границь геологічних структур для зон уповільненого водообміну та вплив шахтного водовідливу на формування депресійних лійок і скидів у річковий стік р.р. Сіверського Донцю, Лугані, Кальміусу та ін.

Прогнозні ресурси підземних вод питної якості у Донецькій області дорівнюють 2,4 млн. м³/добу, в т.ч. розвіданих із затвердженням запасів 1,1 млн.м³/добу (115 ділянок); на сучасний період загальний підземний водовідбір сягає 0,34 млн.м³/добу або 14% від загальної кількості прогнозних ресурсів.

Епізодичні забруднення природними сполуками відмічалось у 2015 році на 34 водозаборах (збільшення сухого залишку, жорсткості, сульфатів, хлоридів, заліза, марганцю).

Луганська область відноситься до найбільш забезпечених прогнозними ресурсами прісних підземних вод (4,8 млн.м³/добу) та їх розвіданістю (98 ділянок із запасами 1,9 млн.м³/добу або 40%). Забруднення відмічалось у 2015 р. на 12 водозаборах (сухий залишок, жорсткість, залізо, марганець, нітрати, феноли, амоній).

Зменшення забруднення обумовлено більшою захищеністю внаслідок наявності регіональних водотривів (слабо проникних шарів).

В цілому більшість районів Донецької і Луганської областей мають значний резерв розвіданих і перспективних ділянок підземних вод питної якості, які доцільно підготувати для експлуатації як резервні або базові водопункти на період порушення водоподачі комплексом «ВД» переважно незахищених від забруднення поверхневих вод внаслідок негативної дії:

- чинників БД;
- витоків забруднених вод із численних шахт що затоплюються;
- можливих надходжень забруднень з ділянок підтоплення та затоплення полігонів відходів, при повенях, підвищених опадах, не санкціонованих скидах у питно-господарські водосховища та інші поверхневі водні об'єкти у басейні р. Сіверський Донець та його притоків.

У більшості вуглепромислових районів Донбасу постійно відчувався гострий дефіцит у во-

допостачанні (господарсько-питному, технічному та для інших цілей) при одночасному скиданні великої кількості шахтних вод у річки та водойми.

В регіональному плані в той же час Донбас загалом забезпечений ресурсами та експлуатаційними запасами підземних вод. Так, за даними ДНВП «Геоінформ» до початку військових дій в межах Східного Донбасу (Луганська область) з експлуатаційних запасів підземних вод (ЕЗПВ) в обсязі 1832 тис. м³/добу в даний час використовується для водопостачання близько 27%, а в межах Південно-Західного Донбасу для цих цілей використовувалось близько 12%. При цьому цьому прогнозі ресурси підземних вод використовують відповідно на 25 і 36%.

Водно-ресурсна ситуація в регіоні ускладнюється внаслідок того, що експлуатаційні водоносні горизонти із зазначеними ресурсами та експлуатаційними запасами підземних вод розташовані по периферії вуглепромислової частини Донбасу, що практично виключає ризик їх забруднення внаслідок затоплення шахт та регіонального підйому рівня мінералізованих шахтних вод. Тому споживачам з числа розосереджених у вуглепромисловій зоні Донбасу, що потребують питної води, у ряді вуглепромислових районів Донбасу у сучасних умовах бойових дій представляється нереальним підключитись до них через істотні фінансові та матеріальні витрати. У зв'язку з цим уявляється можливим використання окремих шахт з невисокою мінералізацією шахтних вод як індивідуальних місцевих джерел водопостачання, особливо промисловими підприємствами. Попередній виконаний експертний аналіз, що це може стосуватися значної частини міст і селищ вуглепромислової зони Донбасу, які мають дефіцит у водопостачанні.

До початку бойових дій для вирішення цих актуальних питань на Донбасі проводились окремі роботи (іноді до відповідних обласних соціальних програм) До цих робіт на договірних засадах залучались територіальні геологічні організації, що функціонували у Донбасі. Зокрема, ДРГП «Донбасгеологія» у 2002 р. підготувало Кадастр шахт із шахтною водою, придатною для господарсько-питного водопостачання без попередньої демінералізації по Центральному та Чистяково-Сніжнянському вуглепромислових районах Донецької області, але у цих матеріалах не

враховано сучасний вплив затоплення більшої частини шахт. Схід ДРГП Луганськгеологія проводило, починаючи з 2005 р., роботи по південних районах Луганської області з метою оцінки можливості використання шахтних вод, що відкачуються із закритих шахт, як перспективного джерела господарсько-питного водопостачання низки міст (Брянка, Кіровськ, Свердловськ, Ровеньки), які за довоєнних часів мали гострий дефіцит у питно-господарському водопостачанні. У результаті проведення першого етапу робіт було виділено як перспективні закриті шахти ім. Войкова. «Ворошилівська» та інші, води яких, що відкачувалися, після доочищення та відповідної технологічної підготовки могли бути використані для покриття дефіциту питного водопостачання міст Свердловськ, Ровеньки та прилеглих населених пунктів.

Сумарний обсяг шахтних вод, що відкачувалися на поверхню, по всіх водовідливних системах шахт (станом на 2008 р.) орієнтовно становив 71,2 тис. м³/год (1709 тис. м³/добу).

Для шахт басейну у період інтенсивного видобутку вугілля (до 1995 р.) характерні такі були такі водопритоки (м³/год): менше 100 – 59%; 100-300 – 37%; 300-500 – 37%; 500-1000 – 20%; понад 1000 – 6% шахт [14, с. 139–147].

Ці показники водопритоку значно зменшилися у міру виведення з експлуатації шахт та інших причин як з окремих вуглепромислових районів, так і в межах більшості міст та селищ регіону. Необхідно відмітити, що до початку бойових дій водопритоки у шахти змінювалися у великому інтервалі від від 20 до 40 разів.

В регіональному плані скидні шахтні води у басейні на період початку масового затоплення шахт та бойових дій мали різноманітний хімічний склад. Вміст розчинних солей у цих водах змінюється в широких межах, що підтверджується мінералізацією вод (від 1 до 30,0–35,5 г/дм³). Відповідно до діючих на той час галузевих стандартів ці води за величиною мінералізації поділялися на три групи: прісні, солонуваті та солоні. При цьому в Донбасі переважали підгрупи слабо- і помірно солонуватих вод, території розповсюдження яких за умови масового затоплення шахт і бойових дій знаходяться в умовах активної зміни, щовимагає відповідних оцінок та прогнозу на повоєнний період.

Загалом на Донеччині через дефіцит прісних вод для різних споживачів довгий період широко використовувалися поверхневі, підземні, а іноді й шахтні води з мінералізацією до 3 г/дм³. Виконаний попередній аналіз свідчать про те, що шахтні води, що відкачуються останні десятиріччя на поверхню, з мінералізацією до 3 г/дм³ в басейні формували більшу частину (близько 75%) від загального їх обсягу, рівну 1530 тис. м³/добу. Це свідчить про істотні резерви і можливості їх використання для водопостачання шахтних вод, які в умовах затоплення шахт та зменшення глибин будуть знижувати свою мінералізацію значною мірою це може бути пов'язано з водонасиченням природної і техногенної тріщинуватості (150-250 метрів) та регіональним формуванням техногенного водоносного горизонту в зоні техногенного водообміну.

Слід зазначити, що частка цих вод у загальному обсязі шахтних вод, що відкачувалося на поверхню, в різних частинах басейну були суттєво неоднакові. Так, для Східного Донбасу (Луганська область) вона становить понад 80% (520 тис. м³/добу), Південно-Західного Донбасу (Донецька область) – 72 % (700 тис. м³/добу).

В повоєнних умовах на нашу думку основними критеріями придатності шахтних вод у якості джерел для господарсько-питного водопостачання повинні бути удосконалені нормативні документами з розширеними показниками: мінералізація (сухий залишок), жорсткість (загальна), вміст сульфатів, хлоридів, забруднюючих речовин (хімічних, органічних), рН, санітарно-епідеміологічні, а також оцінки забруднюючих продуктів бойових дій (хімічні, радіаційні, біологічні та інші). Також потрібне буде удосконалення методики організації зон санітарної охорони водних об'єктів шахт, використання технологій очищення, знезараження, водопідготовки шахтних вод та апаратного забезпечення відповідно до вимог стандартів на рівні розвинутих країн ЄС.

На нашу думку особливу цінність для водопостачання окремих районів Донбасу можуть становити шахтні води з мінералізацією до 1,5 г/дм³, а за їх відсутності також із мінералізацією від 1,5 до 2,0 г/дм³. Ці води після доочищення, знезараження та відповідної технологічної підготовки, а з мінералізацією 1,5–2,0 г/дм³ та незначного доопреснення, можуть бути успішно використані

для покриття дефіциту господарсько-питного водопостачання значної кількості населених пунктів та промислових підприємств.

Про це свідчить виконаний аналіз даних щодо початку БД становив сумарний обсяг скидних шахтних вод у басейні становив: з мінералізацією до 1,5 г/дм³ ~ 120,3 тис. м³/добу (в т. ч. по Луганській області 77,2 та Донецькій – 43,0 тис. м³/добу), а з мінералізацією 1,5-5,3 г/дм³. (У т. ч. по Луганській області 101,5 та Донецькій – 253,5 тис. м³/добу).

У Донецькій області цими водами найбільш забезпечені Чистяково-Сніжнянський, Центральний та частково Донецько-Макіївський, а в Луганській – Должанське-Ровенський, Алмазно-Маріївський та Боково-Кришталевий вуглепромислові райони. Досить високе практичне значення для повоєнного покриття дефіциту водопостачання в Донбасі можуть мати також великі резерви (близько 800 тис. м³/добу) шахтні води з мінералізацією 2–3 г/дм³. Ці води, після спеціальної водопідготовки та знезараження, розведення чистою водою питної якості до мінералізації 1,0–1,5 г/дм³ або після їх демінералізації, можуть бути використані не тільки для технічного, а й господарсько-питного водопостачання.

За попередніми даними, шахтні води з усіх водовідливних систем вугільних шахт на Донбасі вимагали доочищення, хоча й різною мірою. Здебільшого вони не лише за сумарним змістом солей, а й за іншими нормованими показниками (після відповідної доочищення та технологічної підготовки) придатні для господарсько-питних цілей, хоча в ряді випадків і вимагають доочищення хоча й різною мірою.

На сучасному етапі активного затоплення шахт та регіонального підйому рівнів шахтних вод ефективним додатковим джерелом водопостачання на Донбасі можуть бути функціонуючі та закриті шахти з водовідливом, що постійно діє, а в окремих випадках і закриті на «мокру» консервацію шахти за умови забезпечення ними необхідного постійного дебіту води необхідної якості. Зазначені вугільні шахти можуть бути альтернативними джерелами водопостачання. Останні можуть бути приурочені як до одиночних відокремлених шахт, так і до шахт, що мають гідродинамічний та гідравлічний зв'язок із сусідніми (суміжними) шахтами.

Шахти як джерела водопостачання доцільно вибирати з тих, які задовольняють діючим вимогам санітарного стану місць розташування водозабірних споруд та прилеглих територій, якості шахтної води та дебіту альтернативного джерела водопостачання.

На вибраних шахтах, перспективних як джерело водопостачання, необхідне проведення комплексних гідрогеологічних обстежень з метою оцінки екологічної обстановки та вирішення питань створення зон санітарної охорони водних басейнів шахт, а також організація та проведення моніторингових спостережень за зміною техногенної обстановки та зміною кількості та якості шахтних вод на полях шахт та в зоні їх.

При цьому для досліджень якості шахтних вод доцільно використовувати сучасні високоточні методи та прилади з метою виявлення в цих водах високотоксичних мікроелементів та забруднюючих продуктів БД (талій, берилій, кадмій, уран, радій, нафтопродукти та ін.).

При оцінці можливості використання шахтних вод для технічних і технологічних потреб у повоєнний період необхідно буде керуватися удосконаленими вимогами до оцінки ресурсів і якості води до оцінки умов формування, експлуатаційних ресурсів, еколого-гігієнічних параметрів води залежно від характеру її використання на виробництві та в побуті.

Шахтні води Донбасу у довоєнний період характеризувалися незадовільною технічною характеристикою за цілим рядом показників, кількість яких значно збільшилась після регіонального затоплення шахт і початку бойових дій.

Однак виконані попередні оцінки при доочищенні та технологічній підготовці з доведенням до відповідних кондицій можуть бути успішно використані для питно-господарських і технологічних цілей.

При вирішенні проблеми очищення шахтних вод слід враховувати накопичений на Донеччині у довоєнні часи певний досвід використання цих вод, розведених до потрібних кондицій умовно чистими природними водами, для різних технологічних, технічних та побутових потреб. Безперечною економією дефіцитних на Донбасі питних вод може принести заміна їх у повоєнні часи кондиційними шахтними водами для цих потреб. За орієнтовними даними ДРГП «Донецькгеологія»

у період активного шахтного водовідливу загальні витрати питної води на шахтах тільки в Донецькій області, могли бути замінені кондиційною шахтною водою для цих цілей в об'ємі близько 1,9 млн м³/рік (5,2 тис. м³/добу).

При цьому основну економію питної та свіжої технічної води (близько 70 % від загального обсягу) можна отримати при використанні кондиційної шахтної води в системах теплопостачання.

Оцінка перспективності використання шахтних вод для водопостачання, і в першу чергу для господарсько-питних цілей як свідчать виконані оцінки може бути здійснена на основі удосконалених техніко-економічних обґрунтувань різних варіантів очищення та кондиціювання шахтних вод, а також у порівнянні з іншими передбачуваними джерелами водопостачання, при цьому доцільним буде використання досвіду водопостачання у вуглепромислових регіонах розвинутих країн ЄС (Німеччина, Англія, Франція).

Виконаний аналіз свідчить, що на регіональному рівні скидні шахтні води Донбасу можуть становити практичний інтерес і як джерело можливого зрошення.

В цілому позитивне вирішення питання використання шахтних вод в ряді дефіцитних у водопостачанні районів Донбасу може бути досягнуто як за рахунок активного використання шахтних вод разом з резервами експлуатаційних і прогнозних запасів.

Враховуючи недостатню та нерівноцінну вивченість еколого-гідрогеологічних умов шахтних полів та шахтних вод шахтних вод по території Донбасу, першочерговим завданням є цілеспрямоване довивчення динаміки затоплення шахт в цілому по басейну з першочерговим виділенням вугільних шахт (з числа діючих та закритих), найбільш перспективних як альтернативні джерела водопостачання, з подальшим проведенням на них детальних водно-екологічних досліджень.

В цілому на наш погляд необхідна розробка державної програми забезпечення еколого-ресурсної безпеки Донбасу та прилеглих територій на повоєнний період, в тому числі за фінансової підтримки відповідних установ ЄС.

4. Опис топографо-гідрологічної карти затоплення шахт Донецької та Луганської області.

Загальна характеристика

Представлена карта (див. рис. 2) є комплексним топографо-гідрологічним зображенням території Східної України, з фокусом на Донецьку та Луганську області.

Карта охоплює території Донецької та Луганської областей, з особливим акцентом на гідрогеологічні, топографічні та вугледобуваючі особливості регіону.

Вона інтегрує географічні, гідрогеологічні та геополітичні дані, що дозволяє здійснювати міждисциплінарний аналіз екологічної та техногенної безпеки регіону в умовах військового конфлікту на території розвинутого вуглепромислового регіону.

Основні складові компоненти карти:

I. Гідрологічна мережа:

Річки та притоки: позначені синіми лініями, з чіткою диференціацією основних водних артерій.

Гідрологічні пости (станції): позначені синіми точками, з нумерацією від 1 до 20.

Вказані назви населених пунктів, де розташовані станції моніторингу.

Водокористувачі позначені синіми і фіолетовими кружками: водозабір і водоскид.

Цифри означають номери шахт для яких є інформація станом на червень 2025 року з відмітками висот рівня устя: 1 – Краснокутська;

2 – Княгининська; 3 – Хрустальна; 4 – Краснолучська; 5 – Партизанська; 6 – Центральна-Ірміно; 7 – Голубовська; 8 – Артема; 9 – Перевальська; 10 – Золотое; 11 – Карбоніт; 12 – Горська; 13 – Первомайська; 14 – Родіна; 15 – Кірова; 16 – Слов'яно-сербська; 17 – Вергелевська; 18 – Ломоватська; 19 – Ніканор-Нова; 20 – Черкаська.

II. Типи землекористування:

Лісові масиви: зелені ділянки.

Сільськогосподарські угіддя: позначені жовтуватими або світло-коричневими тонами.

Урбанізовані зони: сірі або темні ділянки, що вказують на міста та селища.

III. Геополітична ситуація:

Зони військового конфлікту: чітко розмежовані території, контрольовані Україною та російськими угрупованнями (станом на 2014 рік).

Легенда: містить умовні позначення для всіх типів територій, включно з конфліктними зонами.

Наукове та прикладне значення для екологічної безпеки:

Карта є основою для оцінки впливу військових дій на водні ресурси, включно з ризиками забруднення, деградації водозаборів та порушенням гідрологічного режиму річкової мережі, рівневого режиму підземних вод та інженерно-геотехнічної безпеки промагломераций.

Наукове та прикладне значення для техногенної безпеки:

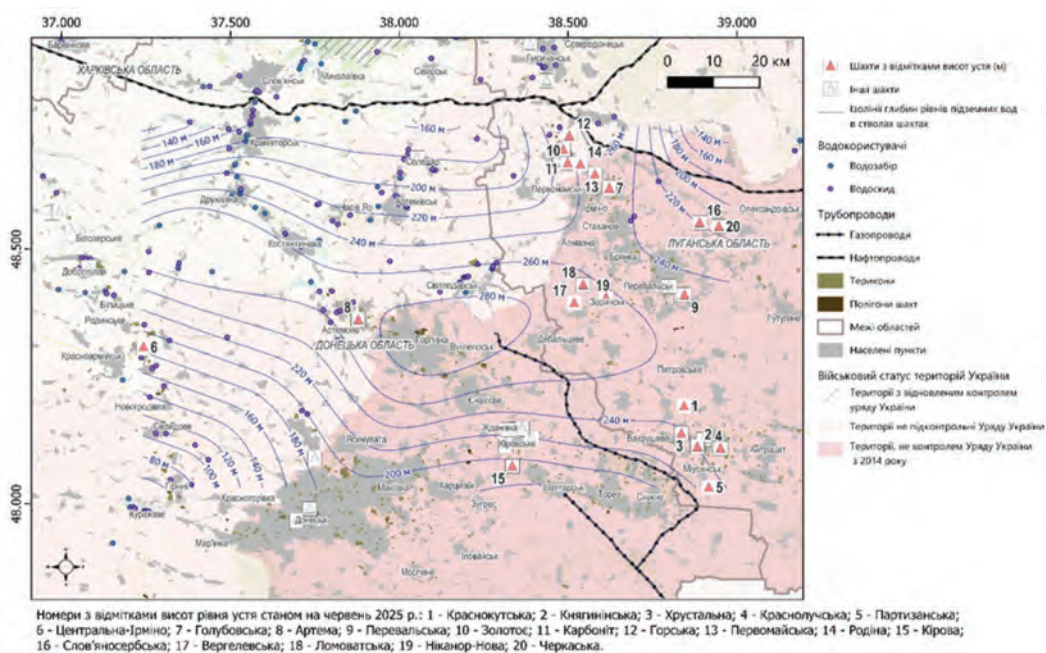


Рисунок 2. Топографо-гідрологічна карта затоплення шахт Донбасу

Таблиця 3

Додаткові функції

Компонент	Опис
Часова шкала	Перегляд змін висот/стану води у динаміці (за роками, сезонами)
Інтеграція з сенсорами	Підключення до реальних даних (дрони, IoT, метеостанції)
Сценарне моделювання	Побудова моделей підтоплення, забруднення, аварійних ситуацій
Аналітичні панелі	Дашборди з графіками, таблицями, порівняльними матрицями
Експорт та API	Можливість інтеграції з зовнішніми платформами та науковими системами

1. Можливість моделювання сценаріїв аварій на шахтах і водогосподарських об'єктах.

2. Інтеграція з сенсорами, дронами та геоаналітичними платформами для реального часу.

3. Прогнозування підтоплення.

4. Порівняльний аналіз гідрологічних змін у контексті конфлікту.

Потенційні гідрологічні ризики:

Зниження контролю над нижньою течією.

- Нижнє, Ломоватка, Слов'яносербськ – критичні точки нижнього басейну, де можливе накопичення забруднень, порушення режиму стоку та втрати даних.

- Втрата моніторингу: обмежений доступ до гідропостів у зоні конфлікту унеможливує оперативне реагування на гідрологічні зміни.

Ризики забруднення:

- Індустріальні зони (Красний Луч, Первомайськ, Кіровськ) – потенційні джерела техногенного навантаження на водні об'єкти.

- Відсутність екологічного контролю: ускладнює оцінку якості води, особливо в умовах бойових дій.

Порушення гідродинаміки:

- Зміна рельєфу через обстріли/інфраструктурні руйнування може призвести до локальних змін напрямку течії, підтоплень або деградації русел.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Проведене дослідження підтверджує, що використання шахтних вод Донбасу як альтернативного джерела питно-господарського водопостачання є науково обґрунтованим, технічно здійсненним та перспективним у контексті сучас-

них викликів регіону. Отримані результати дають підстави стверджувати, що трансформація шахтних вод із джерела екологічної небезпеки на стратегічно важливий ресурс здатна суттєво зміцнити водну резильєнтність територій, які перебувають під впливом наслідків військових дій.

Одним із ключових висновків є те, що впровадження багатостадійних технологічних схем водопідготовки – із обов'язковими етапами попереднього очищення та застосування мембранних процесів, таких як зворотний осмос або електродіаліз – забезпечує можливість доведення шахтних вод до показників, що відповідають нормативним вимогам питної води. Технологічна здійсненність таких рішень підтверджується як світовим досвідом, так і результатами аналізу їх потенційної ефективності у специфічних умовах Донбасу.

Економічна оцінка також засвідчує доцільність використання шахтних вод: попри високі початкові витрати на розгортання систем очищення, кінцева вартість підготовленої води виявляється конкурентоспроможною на тлі значних логістичних витрат та ризиків, пов'язаних з іншими джерелами води у воєнний і післявоєнний періоди. Таким чином, запропонований підхід сприяє не лише забезпеченню стійкого водопостачання, а й зменшенню екологічного навантаження на регіон, що відповідає принципам сталого розвитку та екологічної безпеки.

Для повної реалізації потенціалу використання шахтних вод необхідне продовження наукових та практичних робіт за кількома ключовими напрямками. По-перше, потребує розвитку система актуального гідрохімічного моніторингу шахтних вод на контрольованих територіях Донбасу.

Створення детальної бази даних, що відображає зміну складу та обсягів вод у часі, дозволить здійснювати моделювання сценаріїв та оцінювати ризики, зумовлені гідрогеологічними трансформаціями.

По-друге, доцільним є впровадження пілотних модульних установок водопідготовки на базі конкретних шахт. Реальна експлуатація таких систем дасть змогу уточнити технологічні параметри, оцінити довговічність обладнання, оптимізувати витрати та перевірити ефективність теоретично обґрунтованих рішень.

Третім перспективним напрямом є оптимізація методів утилізації високомінералізованих концентратів, що утворюються після мембранного очищення. Особливу цінність має дослідження можливостей вилучення корисних компонентів (зокрема, літію та магнію), що може суттєво зменшити шкідливий вплив на довкілля та підвищити економічну ефективність процесів.

Окремої уваги заслуговує інтеграція систем водопідготовки з відновлюваними джерелами енергії. Дослідження енергоефективності, а також можливостей використання сонячних або вітрових установок для забезпечення автономної роботи модулів очищення, є перспективним кроком до підвищення енергетичної незалежності і стійкості критичної інфраструктури.

У підсумку, подальший розвиток наукових підходів та практичних рішень у сфері використання шахтних вод може стати основою для формування довгострокової, життєстійкої та екологічно безпечної системи водопостачання Донбасу, адаптованої до умов військових загроз та післявоєнної відбудови.

Список використаної літератури

1. Hobbs D., Murray S., Naidoo D. The management of mine water in South Africa: From pollution to a usable resource. *Water SA*. 2018. Vol. 44, No. 4. P. 579–588.
2. El-Din M.S., Al-Ghamdi A., Farahat M. Reverse osmosis membrane technology for water desalination: A review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26(36). P. 36153–36173.
3. Заболоцька І.П., Сенаторов В.А. Екологічні аспекти підтоплення вугільних шахт Донбасу. *Екологія і промисловість*. 2010. № 3(50). С. 68–72.
4. Донець О.В., Савенко В.С. Гідрогеологічні та екологічні наслідки затоплення шахт Донбасу. *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. 2014. № 1(225). С. 177–184.
5. Van der Bruggen J.R., Van der Bruggen L., Van der Bruggen J. Electrodialysis for desalination: History, current status, and future trends. *Membranes*. 2020. Vol. 10(7). 164.
6. Wang X., Xu X., Gao W., Gao D. Treatment of coal mine water for reuse: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 290. Article 125191.
7. Li L., Zhang J., Wu Y., Li Y. Pre-treatment technologies for reverse osmosis membrane in wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*. 2022. Vol. 45. Article 102462.
8. Brady J., Stewart B., Rosenbaum E. Mine water reuse in Pennsylvania: Challenges and opportunities. *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 255. 109897.
9. Mishra S., Rout P., Patel P. Treatment and management of mine water in Australian coalfields: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2017. Vol. 5(5). P. 5169–5183.
10. Qureshi T., Yasar A. Sustainable management of mine drainage using hybrid membrane processes. *Desalination*. 2020. Vol. 495. 114677.
11. Liu Z., Chen S., Li H. Mine water chemistry evolution in deep mining zones of China. *Hydrogeology Journal*. 2019. Vol. 27(4). P. 1335–1348.
12. Yadav R., Tiwari M. Integrated treatment of mine wastewater using biological and membrane systems. *Water Environment Research*. 2021. Vol. 93(10). P. 2299–2310.
13. Яковлєв Є.О., Анпілова Є.С. Еколого-гідрогеологічні особливості шахтних вод Донбасу. *Геологія і геохімія горючих копалин*. 2013. № 3. С. 48–57.
14. Трофимчук О.М., Сплодитель А.І. Гідрохімічний режим шахтних вод Донбасу в умовах техногенних змін. *Екологічна безпека*. 2012. № 1. С. 22–30.
15. USEPA. Mine Water Treatment Technologies. U.S. Environmental Protection Agency. 2018. 112 p.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ГАЗИФІКАЦІЇ В МАЛОГАБАРИТНИХ ГАЗОГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВКАХ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Маркіна Людмила, Коваленко Даниїл,
Власенко Олег

Державна екологічна Академія післядипломної
освіти та управління,
вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035,
м. Київ, Україна

Анотація

У статті представлено комплексне дослідження та оптимізацію термохімічного процесу газифікації біомаси в малогабаритних газогенераторних установках, призначених для автономних систем теплопостачання. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення енергоефективності децентралізованих джерел тепла та зниження їх екологічного впливу за рахунок використання відновлюваної сировини.

Проаналізовано фізико-хімічні основи процесу газифікації, що включає стадії сушки, піролізу, часткового окислення та редукції з утворенням горючого синтез-газу. Основну увагу приділено впливу ключових параметрів процесу — вологості палива, коефіцієнта еквівалентності (ER) та температури в зоні редукції — на склад синтез-газу, енергетичну ефективність і рівень викидів забруднюючих речовин. Встановлено, що забезпечення вологості біомаси менше 20%, підтримка коефіцієнта еквівалентності в діапазоні $ER = 0,2\text{--}0,4$ та температури в зоні редукції не нижче $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ дозволяє реалізувати стабільний автотермічний режим роботи установки з максимальним виходом паливних компонентів CO і H_2 .

Проведено порівняльний аналіз газогенераторних установок з висхідним (updraft) та низхідним (downdraft) потоками газу. Показано, що конструкції типу downdraft є найбільш придатними для побутового використання завдяки ефективному термічному крекінгу смол і зниженню їх вмісту в синтез-газі

до рівня менше 1 г/м^3 . Доведено, що оптимізовані газифікаційні установки забезпечують коефіцієнт корисної дії на рівні 90–95% та суттєво зменшують викиди CO , NO_x і твердих частинок порівняно з традиційними твердопаливними печами.

Отримані результати підтверджують, що газифікація біомаси в малогабаритних газогенераторних установках є ефективним, екологічно безпечним і вуглецево-нейтральним рішенням для автономного теплопостачання та може розглядатися як важливий елемент децентралізованої енергетики сталого розвитку.

Ключові слова: газифікація біомаси, піроліз, синтез-газ, коефіцієнт еквівалентності, енергоефективність, автономне теплопостачання, екологічна безпека.

Abstract

The paper presents a comprehensive study and optimization of the thermochemical biomass gasification process in small-scale gasifier units intended for autonomous heat supply systems. The relevance of the research is driven by the need to increase the energy efficiency of decentralized heat sources and to reduce their environmental impact through the use of renewable feedstock.

The physical and chemical fundamentals of the gasification process are analyzed, including the stages of drying, pyrolysis, partial oxidation, and reduction, resulting in the formation of combustible producer gas. Particular attention is paid to the influence of key process parameters—fuel moisture content, equivalence ratio (ER), and temperature in the reduction zone—on the composition of the producer gas, overall energy efficiency, and pollutant

emissions. The results demonstrate that maintaining biomass moisture below 20%, an equivalence ratio within the range $ER = 0.2\text{--}0.4$, and a reduction zone temperature of at least $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ensures stable autothermal operation and maximizes the yield of combustible components CO and H_2 .

A comparative analysis of updraft and downdraft gasifier configurations is conducted. It is shown that downdraft-type systems are the most suitable for small-scale domestic applications due to effective thermal cracking of tars and a reduction of tar content in the producer gas to less than 1 g/m^3 . The study confirms that optimized gasification units achieve thermal efficiencies of 90–95% and significantly reduce emissions of CO , NO_x , and particulate matter compared to conventional solid fuel stoves.

The obtained results confirm that biomass gasification in small-scale gasifier units represents an efficient, environmentally safe, and carbon-neutral solution for autonomous heat supply and can be considered an important component of decentralized energy systems for sustainable development.

Keywords: biomass gasification, producer gas, equivalence ratio, small-scale gasifier, energy efficiency, autonomous heating, environmental performance.

Вступ

Зростання вартості енергоресурсів, обмеженість централізованого теплопостачання та необхідність зниження антропогенного навантаження на довкілля зумовлюють актуальність розвитку автономних енергетичних систем, заснованих на використанні відновлюваних джерел енергії. Одним із перспективних напрямів у цьому контексті є газифікація біомаси в малогабаритних газогенераторних установках.

На відміну від традиційного прямого спалювання твердого палива, газифікація передбачає багатостадійний термохімічний процес, у результаті якого утворюється горючий газ із високим енергетичним потенціалом. Це дозволяє істотно підвищити коефіцієнт корисної дії теплогенеруючих пристроїв і зменшити викиди шкідливих речовин.

Метою цієї роботи є наукове обґрунтування оптимальних параметрів процесу газифікації біомаси в малогабаритних установках та оцінка їх впливу на енергоефективність і екологічні показники

автономного теплопостачання.

Процес газифікації біомаси є автотермічним і реалізується в межах чотирьох взаємопов'язаних стадій, кожна з яких характеризується специфічними температурними умовами та хімічними реакціями.

Стадія сушки та вологовидалення. На початковому етапі при температурах $100\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ відбувається видалення вологи з палива. Цей процес є ендотермічним і супроводжується значними витратами теплової енергії, що описується рівнянням теплового балансу:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T + m \cdot \Delta H_{\text{vap}}$$

де: Q — загальна кількість теплової енергії, необхідної для нагрівання та випаровування вологи, кДж;

m — маса води, що міститься в паливі, кг;

c_p — питома теплоємність води, кДж/(кг·К);

ΔT — різниця температур нагрівання води до температури кипіння, К;

ΔH_{vap} — ентальпія випаровування води, яка за нормального атмосферного тиску становить приблизно **2257 кДж/кг**

Наведене рівняння описує теплові витрати на нагрівання та фазовий перехід вологи, що міститься в біомасі. Значна величина ентальпії випаровування води зумовлює суттєві енергетичні втрати при газифікації палива з підвищеною вологістю, що негативно впливає на автотермічність процесу та загальний коефіцієнт корисної дії установки.

Розглянемо біомасу масою 1 кг із вологістю 20%, тобто маса води становить:

$$m = 0,20\text{ кг.}$$

Початкова температура палива приймається $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура кипіння води - $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, відповідно:

$$\Delta T = 80\text{ К.}$$

Питома теплоємність води:

$$c_p = 4,18\text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

Ентальпія випаровування води за нормального тиску:

$$\Delta H_{\text{vap}} = 2257\text{ кДж/кг.}$$

Тоді загальні теплові витрати на нагрівання та випаровування вологи визначаються за формулою:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T + m \cdot \Delta H_{\text{vap}}.$$

Підставляючи числові значення, отримаємо:

$$Q = 0,20 \cdot 4,18 \cdot 80 + 0,20 \cdot 2257,$$

$$Q = 66,9 + 451,4 = 518,3\text{ кДж.}$$

Отримане значення 518 кДж означає, що при газифікації 1 кг біомаси з вологістю 20% понад 0,5 МДж теплової енергії витрачається виключно на нагрівання та випаровування води, без участі у формуванні корисного теплового ефекту.

З урахуванням того, що нижча теплота згоряння сухої деревини становить у середньому 16–18 МДж/кг, втрати енергії лише на випаровування води можуть досягати 3–4% від загального енергетичного потенціалу палива. За підвищення вологості до 30% ці втрати зростають до 7–10%, що істотно знижує автотермічність процесу газифікації та загальний коефіцієнт корисної дії установки.

У таблиці 1 наведено вплив вологості біомаси на енергетичні показники газифікаційної установки.

Таблиця 1 - Вплив вологості біомаси на ефективність газифікації

Вологість, %	Витрати енергії на сушку, %	Зниження ККД, %
10–15	5–8	3–5
15–20	8–12	5–8
20–30	15–25	10–20
>30	>30	>35

Отримані дані свідчать, що використання палива з вологістю понад 30% робить неможливим досягнення високого ККД без додаткового підводу тепла.

У температурному діапазоні 200–500 °С відбувається термічний розклад органічних компонентів біомаси (целюлози, геміцелюлози, лігніну) за відсутності кисню (піроліз (деволатилізація)). Кінетика піролізу підпорядковується закону Арреніуса:

$$k = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right),$$

де: k — константа швидкості реакції (для 1-го порядку має розмірність с^{-1});

A — предекспоненційний (частотний) множник, с^{-1} ;

E_a — енергія активації, Дж/моль;

R — універсальна газова стала, $R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$;

T — абсолютна температура, К

Рівняння Арреніуса відображає експоненціальну залежність швидкості піролізу від температури: навіть помірне підвищення T призводить до суттєвого зростання k , що

визначає інтенсивність деволатилізації та утворення газоподібних продуктів.

Числовий приклад (показує ефект температури).

Прийнемо типові для біомаси оцінки:

$$E_a = 150 \text{ кДж/моль} = 150000 \text{ Дж/моль}$$

$$A = 1,0 \times 10^{10} \text{ с}^{-1}$$

1) При $T_1 = 500^\circ\text{C} = 773 \text{ К}$

$$\begin{aligned} k_1 &= 10^{10} \cdot \exp\left(-\frac{150000}{8,314 \cdot 773}\right) \\ &= 10^{10} \cdot \exp(-23,35) \\ &\approx 10^{10} \cdot 7,2 \times 10^{-11} \approx 0,72 \text{ с}^{-1}. \end{aligned}$$

2) При $T_2 = 600^\circ\text{C} = 873 \text{ К}$

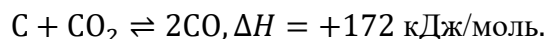
$$\begin{aligned} k_2 &= 10^{10} \cdot \exp\left(-\frac{150000}{8,314 \cdot 873}\right) \\ &= 10^{10} \cdot \exp(-20,66) \\ &\approx 10^{10} \cdot 1,06 \times 10^{-9} \approx 10,6 \text{ с}^{-1}. \end{aligned}$$

Порівняння

$$\frac{k_2}{k_1} \approx \frac{10,6}{0,72} \approx 14,7.$$

Підвищення температури піролізу з 500 до 600 °С збільшує константу швидкості приблизно у 15 разів, що пояснює різке прискорення виділення летких компонентів та необхідність точного контролю температури для стабільної газифікації.

Стадія часткового окислення реалізується при 600 – 800 °С і забезпечує внутрішнє джерело тепла для автотермічного перебігу процесу. Подальша редукція відбувається при 700 – 1000 °С з утворенням основних компонентів синтез-газу відповідно до реакцій Будуара та водяного газу:



Реакція водяного газу:



де $\Delta H > 0$ означає, що реакції є ендотермічними і потребують підведення тепла; підвищення температури зміщує рівновагу вправо, збільшуючи вихід CO та H_2 і підвищуючи теплоту згоряння синтез-газу.

У зоні редукції формування паливних компонентів синтез-газу визначається переважно ендотермічними реакціями Будуара та водяного газу. Оскільки ΔH для обох реакцій додатне, недостатній температурний рівень (нижче ~800 °С) призводить до неповного протікання відновних перетворень, зростання частки CO_2 та H_2O у газі й зниження його калорійності. Високотемпературний режим, навпаки, сприяє утворенню CO та H_2 і одночасно підвищує ефективність термічного крекінгу смол.

Коефіцієнт еквівалентності (ER) є одним з основних керованих параметрів процесу газифікації та визначається як відношення фактичної кількості поданого окислювача до стехіометрично необхідної.

У таблиці 2 наведено зміну складу синтез-газу залежно від ER.

Таблиця 2 - Залежність складу синтез-газу від ER

ER	CO, %	H ₂ , %	CH ₄ , %	CO ₂ , %	НТЗ, МДж/м ³
0,2	20	14	3,0	14	5,8
0,3	24	18	2,5	10	6,4
0,4	18	12	1,8	18	5,0

Максимальна теплота згоряння синтез-газу досягається при $ER \approx 0,3$, що відповідає оптимальному режиму роботи газогенераторної установки.

Для поглибленого аналізу процесів, що відбуваються в газогенераторних установках, доцільним є застосування термодинамічного моделювання, заснованого на принципах мінімізації вільної енергії Гіббса та збереження маси й енергії. Такий підхід дозволяє оцінити рівноважний склад синтез-газу за заданих температурних умов, коефіцієнта еквівалентності та елементарного складу палива.

Загальний вигляд рівняння балансу вільної енергії системи можна подати як:

$$G = \sum_{i=1}^n n_i \mu_i(T, P),$$

де: G — сумарна вільна енергія Гіббса системи, Дж;

n_i — кількість речовини (мольна кількість) i -го компонента, моль;

$\mu_i(T, P)$ — хімічний потенціал i -го компонента за температури T та тиску P , Дж/моль;

n — кількість компонентів у системі.

Хімічний потенціал можна подати як:

$$\mu_i(T, P) = \mu_i^0(T) + RT \ln a_i,$$

де $\mu_i^0(T)$ — стандартний хімічний потенціал, a_i — активність (для ідеального газу $a_i \approx y_i \cdot P/P^0$), y_i — мольна частка, P^0 — стандартний тиск.

У термодинамічному моделюванні газифікації рівноважний склад синтез-газу визначають шляхом мінімізації сумарної вільної енергії Гіббса G за фіксованих T і P при

виконанні обмежень матеріального балансу за елементами (C, H, O, N тощо). Мінімум G відповідає стану хімічної рівноваги, що дозволяє оцінювати потенційний вміст основних компонентів газу і визначати вплив температури та коефіцієнта еквівалентності на калорійність і екологічні показники установки.

Енергетична ефективність газифікаційної системи визначається співвідношенням корисно використаної теплової енергії до теплотворної здатності палива. Загальний енергетичний баланс установки можна подати у вигляді:

$$Q_{\text{палива}} = Q_{\text{корисне}} + Q_{\text{втрати}},$$

де: $Q_{\text{палива}}$ — сумарна теплова енергія, що надходить із паливом, кДж;

$Q_{\text{корисне}}$ — корисно використана теплова енергія, передана системі теплопостачання, кДж;

$Q_{\text{втрати}}$ — сумарні теплові втрати, кДж.

Сумарні теплові втрати можна подати у вигляді:

$$Q_{\text{втрати}} = Q_{\text{дим}} + Q_{\text{волога}} + Q_{\text{стінки}},$$

де: $Q_{\text{дим}}$ — теплові втрати з димовими газами;

$Q_{\text{волога}}$ — теплові втрати на нагрівання та випаровування вологи, що міститься в паливі;

$Q_{\text{стінки}}$ — втрати тепла через огорожувальні конструкції установки.

Енергетичний баланс газифікаційної установки визначається співвідношенням між теплотворною здатністю палива, корисно використаним тепловим потоком та сукупністю теплових втрат. Найбільший внесок у втрати, як правило, мають процеси випаровування вологи з біомаси та відведення теплоти з димовими газами. Зменшення температури відхідних газів за рахунок оптимізації коефіцієнта еквівалентності та ефективної теплоізоляції корпусу дозволяє суттєво підвищити загальний коефіцієнт корисної дії установки.

Розглянемо газифікаційну установку, що працює на 1 кг сухої деревної біомаси з нижчою теплотою згоряння: $Q_{\text{палива}} = 16,0$ МДж.

Прийmemo характерні значення втрат:

втрати з димовими газами: $Q_{\text{дим}} = 3,2$ МДж(20%),

втрати на випаровування залишкової вологи:

$Q_{\text{волога}} = 0,8$ МДж(5%),

втрати через стінки корпусу: $Q_{\text{стінки}} = 0,8$ МДж(5%).

Тоді сумарні втрати становлять: $Q_{\text{втрати}} = 3,2 + 0,8 + 0,8 = 4,8$ МДж.

Корисно використана теплова енергія:

$$Q_{\text{корисне}} = Q_{\text{палива}} - Q_{\text{втрати}} = 16,0 - 4,8 = 11,2 \text{ МДж.}$$

Відповідний коефіцієнт корисної дії установки:

$$\eta = \frac{Q_{\text{корисне}}}{Q_{\text{палива}}} = \frac{11,2}{16,0} = 0,70 \text{ (70\%).}$$

Наведений приклад показує, що навіть за помірних теплових втрат оптимізація процесів тепловідведення та зменшення вологості палива є ключовими чинниками підвищення енергоефективності газифікаційних установок. Для сучасних оптимізованих систем типу downdraft за рахунок рекуперації тепла та зменшення втрат через корпус досягається ККД на рівні 90–95%.

Смолоутворення є одним із ключових факторів, що визначають екологічну та експлуатаційну придатність газифікаційних систем. Утворення смол відбувається переважно на стадії піролізу при температурах нижче 600 °С. Кількість та склад смол залежать від швидкості нагрівання палива, його елементарного складу та часу перебування летких компонентів у реакційній зоні.

Термічний крекінг смол у зоні редукції описується реакціями розщеплення високомолекулярних вуглеводнів із утворенням низькомолекулярних газів. Ефективність цього процесу різко зростає при температурах понад 800 °С, що пояснює низький вміст смол у газі, отриманому в установках типу downdraft.

Системи з висхідним потоком (updraft): Updraft-газогенератори характеризуються простотою конструкції, однак мають суттєвий недолік — високий вміст смол у вихідному газі (до 50 г/м³), що обмежує їх використання в побутових умовах.

Системи з низхідним потоком (downdraft): Downdraft-конструкції забезпечують проходження піролізних газів через високотемпературну зону, що сприяє ефективному термічному крекінгу смол і зниженню їх концентрації до <1 г/м³. Саме ці системи є найбільш придатними для автономного теплопостачання.

Таблиця 3 - Порівняння конструктивних схем газифікації

Показник	Updraft	Downdraft
Вміст смол, г/м³	30–50	<1
ККД, %	70–80	85–95
Екологічна безпека	Середня	Висока

Гідродинамічні умови всередині газогенератора істотно впливають на повноту перебігу термохімічних реакцій. Час перебування газу в зоні високих температур є критичним параметром для завершення реакцій редукції та крекінгу смол.

Для наближеного опису руху газу можна використовувати модель ідеального витіснення або модель змішаного потоку. Розрахунки показують, що збільшення часу перебування газу в зоні редукції з 0,5 до 1,5 с може знизити вміст смол у синтез-газі в 3–5 разів без істотного зростання гідравлічного опору системи.

Оптимізовані газифікаційні установки забезпечують істотне зниження викидів шкідливих речовин, що підтверджено даними таблиці 4.

Показник	Традиційна піч	Газифікаційна установка
CO, ppm	3000–5000	<100
NO _x , ppm	150–300	<100
PM	Високі	Мінімальні

Таблиця 4 - Порівняння емісій

Для об'єктивної оцінки ефективності газифікаційних установок доцільно порівнювати їх з іншими автономними системами теплопостачання — електричними котлами, газовими пальниками та традиційними твердопаливними печами.

Результати порівняльного аналізу свідчать, що газифікаційні установки мають нижчі питомі викиди CO₂ на одиницю виробленої теплової енергії, а також забезпечують стабільніший температурний режим у приміщенні. Крім того, використання місцевої біомаси зменшує залежність від зовнішніх енергетичних ресурсів і сприяє підвищенню енергетичної безпеки регіонів.

Попри високі екологічні показники, експлуатація газифікаційних установок потребує врахування потенційних ризиків, зокрема можливості утворення чадного газу при порушенні режимів роботи. Для мінімізації таких ризиків доцільним є застосування датчиків CO, автоматичних систем регулювання подачі повітря та герметичних камер згоряння.

Важливим аспектом є також правильна утилізація зольного залишку, який може бути використаний як мінеральна добавка або ґрунтовий кондиціонер за умови відповідності

нормативним вимогам.

Висновки

Газифікація біомаси в малогабаритних установках відповідає ключовим принципам сталого розвитку, поєднуючи енергетичну ефективність, екологічну безпеку та соціально-економічні переваги. Використання відновлюваної сировини дозволяє знизити сумарний вуглецевий слід енергетичних систем, а децентралізований характер технології сприяє розвитку місцевих громад.

Подальший розвиток газифікаційних систем пов'язаний із впровадженням каталізаторів, оптимізацією аеродинаміки та використанням систем інтелектуального керування, які дозволяють адаптувати подачу повітря до змінних характеристик палива в реальному часі.

Підтверджено, що оптимальні параметри газифікації біомаси ($ER = 0,2\text{--}0,4$, температура редукації $\geq 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, вологість палива $< 20\%$) забезпечують ККД на рівні 90–95%.

1. Обґрунтовано перевагу газогенераторів типу downdraft для автономного теплопостачання з точки зору екологічної безпеки.

2. Показано, що оптимізована газифікація біомаси є ефективним і вуглецево-нейтральним рішенням для децентралізованої енергетики.

Список використаних джерел

1. Гелету́ха Г. Г., Желєзна Т. А., Дроздова О. І. Стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні. *Промислова теплотехніка*. 2018. Т. 40, № 4. С. 55–66.
2. Гелету́ха Г. Г., Желєзна Т. А., Матвєєв Ю. Б. Використання твердих видів біомаси для виробництва теплової енергії в Україні. *Відновлювана енергетика*. 2019. № 2. С. 5–18.
3. Клюс В. П., Савченко О. В., Яковенко А. В. Термохімічна переробка деревної біомаси: сучасний стан і перспективи. *Енергетика та автоматика*. 2018. № 4. С. 92–101.

4. Сафронов М. П., Шаповал С. В. Аналіз енергоефективності малопотужних твердопаливних теплогенераторів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т. 29, № 5. С. 118–125.

5. Бондар О. І., Кузьменко О. М., Кравченко О. В. Екологічні показники процесів спалювання та газифікації твердого палива. *Екологічні науки*. 2020. № 3(30). С. 64–71.

6. Шевчук В. Я., Хлобистов Є. В., Сотник І. М. Біоенергетичні технології як складова екологічної безпеки держави. *Економіка природокористування і сталий розвиток*. 2021. № 9. С. 84–93.

7. Пасічник М. П., Корчовий Ю. М., Ковальчук В. П. Дослідження процесів газифікації деревної біомаси в малогабаритних установках. *Збірник наукових праць НУБіП України. Серія: Енергетика та автоматика*. 2020. Вип. 13. С. 147–156.

8. Дубровін В. О., Корчовий Ю. М., Рябцев Г. Л. Технології термохімічної конверсії біомаси в енергетиці. *Відновлювана енергетика*. 2018. № 4. С. 22–31.

9. Basu P. Biomass gasification and pyrolysis: Practical design and theory. 2nd ed. Amsterdam : Academic Press, 2018. 365 p.

10. Rezaian J., Cheremisinoff N. P. Gasification technologies: A primer for engineers and scientists. Boca Raton : CRC Press, 2016. 350 p.

11. Jankowska-Polańska B., Ścianowski J., Pabian P. Biomass gasification: Process conditions and producer gas composition. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, No. 21. Art. 11763. DOI: 10.3390/su132111763.

12. Hadi M. S., Nugroho Y. S. Performance study of wood biomass gasification stove. *VANOS Journal of Mechanical Engineering Education*. 2019. Vol. 4, No. 1. P. 1–10.

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ АГРАРНОГО ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ В СИСТЕМІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

Латуша Д. Р.¹, Максименко М.П.¹, Кватернюк С. М.¹, Петрук В. Г.¹

¹Вінницький національний технічний університет,
вул. Хмельницьке шосе, 95, 21021, м. Вінниця, Україна
kvaternuk@vntu.edu.ua

Анотація. У статті здійснено комплексну оцінку екологічних ризиків аграрного природокористування як критичного елемента системи екологічної безпеки України. Доведено, що сучасна модель агровиробництва, яка базується на екстенсивних методах та надмірній розораності земель (понад 70%), призвела до системної деградації природного капіталу. Ідентифіковано ключові джерела антропогенного тиску, серед яких: неконтрольована хімізація, порушення сівозмін та неефективне управління відходами тваринництва. Особливу увагу приділено методології оцінки вразливості підземних вод. Обґрунтовано та адаптовано використання модифікованої моделі Pesticide DRASTIC та DRASTIC-LU для умов інтенсивного землеробства. Встановлено, що інтеграція фактору землекористування підвищення ваги ґрунтового бар'єру дозволяють значно точніше прогнозувати ризики забруднення водоносних горизонтів нітратами та пестицидами порівняно зі стандартними підходами. У роботі вперше комплексно проаналізовано синергетичний ефект глобальних кліматичних змін та наслідків військової агресії. Прогнозується зростання середньорічних збитків від кліматичних ризиків на 42–66 % до 2050 року. Водночас висвітлено проблему формування бєлігеративних ландшафтів, що зазнали впливу бойових дій, де понад 30% оброблюваних земель зазнали механічної деградації, хімічного забруднення важкими металами та замінування. Доведено, що безальтернативним шляхом мінімізації

ризиків є перехід до концепції Сільське господарство 4.0, що передбачає впровадження точного землеробства, ГІС-технологій та біологізації виробництва. Обґрунтовано необхідність гармонізації національної політики з Європейським зеленим курсом та стратегією «Від ферми до виделки». Запропоновано організаційно-економічні механізми стимулювання сталого розвитку, зокрема через інструменти зеленого фінансування та екологічного страхування.

Ключові слова: екологічна безпека, аграрне природокористування, екологічний ризик, модель DRASTIC, зміна клімату, воєнні дії, сталий розвиток, точне землеробство.

Abstract. This article provides a comprehensive assessment of environmental risks associated with agricultural land use as a critical component of Ukraine's environmental security system. It is demonstrated that the current agricultural model, based on extensive methods and excessive land plowing (exceeding 70%), has led to the systemic degradation of natural capital. Key sources of anthropogenic pressure have been identified, including uncontrolled chemical application, crop rotation violations, and inefficient livestock waste management. Particular attention is devoted to the methodology of groundwater vulnerability assessment. The study substantiates and adapts the use of modified Pesticide DRASTIC and DRASTIC-LU models for intensive farming conditions. It was established that integrating the land-use factor and increasing the weight of the soil

barrier allows for significantly more accurate predictions of aquifer contamination by nitrates and pesticides compared to standard approaches. For the first time, this work comprehensively analyzes the synergistic effect of global climate change and the consequences of military aggression. Average annual losses from climate risks are projected to increase by 42–66% by 2050. Concurrently, the study highlights the emergence of belligerent landscapes impacted by combat operations, where over 30% of cultivated land has undergone mechanical degradation, chemical contamination with heavy metals, and landmining. The research proves that the only viable path to risk minimization is the transition to the Agriculture 4.0 concept, which entails the implementation of precision farming, GIS technologies, and the biologization of production. The necessity of harmonizing national policy with the European Green Deal and the Farm to Fork Strategy is substantiated. Finally, organizational and economic mechanisms for stimulating sustainable development are proposed, specifically through green finance instruments and environmental insurance.

Keywords: environmental security, agricultural land use, environmental risk, DRASTIC model, climate change, military actions, sustainable development, precision farming.

Постановка проблеми та актуальність дослідження. Сільське господарство України традиційно відіграє роль фундаменту національної економічної стабільності та гаранта глобальної продовольчої безпеки. Водночас аграрний сектор є джерелом потужного антропогенного тиску на навколишнє середовище, що проявляється у деградації ґрунтів, забрудненні водних ресурсів агрохімікатами та втраті біорізноманіття. Сучасна модель агровиробництва, попри свою економічну ефективність, все частіше вступає у конфлікт з екологічними імперативами, перетворюючи довкілля на «виробничий цех» та вичерпуючи природний капітал майбутніх поколінь [1]. В умовах євроінтеграції та глобальних кліматичних змін забезпечення екологічної безпеки агровиробництва стає не просто вимогою часу, а умовою виживання галузі на світовому ринку.

Актуальність комплексної оцінки екологічних ризиків аграрного

природокористування зумовлена низкою критичних факторів:

- Інтенсифікація землеробства призвела до того, що рівень розораності земель в Україні перевищує 70%, спостерігається від’ємний баланс гумусу та поживних речовин, а забруднення водних об’єктів нітратами та пестицидами набуває загрозливих масштабів.

- Аграрний сектор стикається зі зростанням середньорічних збитків (AAL) від кліматичних ризиків, таких як посухи та екстремальні опади. Прогнозується, що до 2050 року ці втрати можуть зрости на 42–66%, що вимагає впровадження нових підходів до управління ризиками, зокрема концепції «шарування ризиків».

- Військова агресія завдала безпрецедентної шкоди довкіллю: понад 30% оброблюваних земель знаходяться в зоні ризику, фіксується хімічне забруднення ґрунтів та руйнування екосистем, що потребує специфічних методів оцінки збитків та відновлення.

- Виконання вимог Європейського зеленого курсу (European Green Deal) та стратегії «Від ферми до виделки» (Farm to Fork) вимагає від України гармонізації екологічних стандартів, зокрема щодо зменшення використання пестицидів та добрив, що неможливо без дієвої системи моніторингу та оцінки ризиків [3, 4].

- Існує потреба у вдосконаленні математичного моделювання екологічних ризиків, зокрема застосування моделей типу DRASTIC для оцінки вразливості підземних вод та інтеграції цих даних у системи прийняття управлінських рішень [2].

Метою роботи є розроблення теоретико-методологічних засад комплексної оцінки екологічних ризиків аграрного природокористування та обґрунтування стратегічних напрямів забезпечення екологічної безпеки в умовах глобальних викликів і повоєнного відновлення.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі основні завдання:

- проаналізувати сучасний стан впливу сільського господарства на довкілля, зокрема на водні та земельні ресурси, та ідентифікувати ключові джерела екологічної небезпеки;

- дослідити методологічні підходи до оцінки екологічних ризиків, зокрема адаптувати модель DRASTIC для визначення вразливості

підземних вод до забруднення агрохімікатами в умовах інтенсивного землеробства;

– оцінити вплив кліматичних змін та воєнних дій на формування нових загроз екологічній безпеці аграрного сектору;

– обґрунтувати доцільність впровадження інноваційних технологій (точне землеробство, біологізація) та організаційно-економічних механізмів для мінімізації екологічних ризиків та переходу до моделі сталого розвитку.

Для досягнення мети дослідження використано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів, зокрема: системний аналіз та узагальнення наукових джерел для визначення сучасної парадигми екологічної безпеки АПК; порівняльно-географічний метод для оцінки стану земельних і водних ресурсів (зокрема на прикладі Вінниччини); індексний метод із застосуванням модифікованої математичної моделі Pesticide DRASTIC та DRASTIC-LU для розрахунку вразливості підземних вод до агрохімікатів; математичне моделювання та кореляційний аналіз для верифікації результатів оцінки ризиків із фактичними даними моніторингу; а також використання мови програмування Python (Google Colab) для автоматизації розрахунків та візуалізації результатів у межах концепції «Сільське господарство 4.0».

Виклад основного матеріалу. Сучасна наукова парадигма розглядає сільське господарство як потужний чинник антропогенного впливу на біосферу, що вимагає переосмислення підходів до екологічної безпеки. В науковій літературі екологічна безпека аграрного сектору визначається як стан розвитку агропромислового комплексу (АПК), за якого мінімізуються негативні наслідки для довкілля, забезпечується відтворення природних ресурсів та підтримується стійкість екосистем. Ключову роль у цій системі відіграють земельні ресурси, оскільки сталий розвиток аграрного сектору неможливий без реалізації принципів їх раціонального використання та охорони.

Дослідники [5], наголошують, що сучасна модель агровиробництва, попри свою економічну ефективність, призводить до деградації ґрунтів катастрофічними темпами через інтенсивні методи господарювання та

техногенні викиди. Актуалізується необхідність зміни парадигми господарювання – від екстенсивної експлуатації до моделі сталого управління, що базується на «зеленому переході» та гармонізації з міжнародними стандартами, зокрема Європейським зеленим курсом (European Green Deal) [4]. Стратегія «Від ферми до виделки» (Farm to Fork) розглядається як центральна складова цього процесу, спрямована на створення справедливої та екологічно чистої продовольчої системи.

Значний масив досліджень присвячено аналізу негативного впливу інтенсивних агротехнологій на ґрунти та водні ресурси. Науковці фіксують масштабну деградацію ґрунтів в Україні, що проявляється через ерозію, виснаження поживних речовин, ущільнення та закислення [5]. Зокрема, на Вінниччині водна ерозія пошкодила значні площі сільськогосподарських угідь, а понад 53% земель мають кислі ґрунти.

Окремий фокус досліджень зосереджено на забрудненні водних ресурсів. Аграрна діяльність визнається одним із основних джерел забруднення поверхневих та підземних вод нітратами, фосфатами та пестицидами, що призводить до евтрофікації водойм. Дослідження підтверджують пряму кореляцію між часткою сільськогосподарських угідь у водозборі та концентрацією азоту в річках, а також вказують на ризики для здоров'я населення через забруднення питної води в зонах інтенсивного тваринництва.

Для кількісної оцінки вразливості екосистем до аграрного впливу вчені все частіше застосовують математичне моделювання. Одним із найбільш поширених інструментів є модель DRASTIC та її модифікації (Pesticide DRASTIC, DRASTIC-LU). Ця модель дозволяє оцінити потенціал забруднення підземних вод на основі гідрогеологічних параметрів (глибина залягання вод, інфільтраційне живлення, тип ґрунту тощо) [6-8].

Сучасні дослідження вказують на необхідність адаптації моделі DRASTIC до специфічних умов агроландшафтів. Зокрема, модифікація Pesticide DRASTIC надає більшої ваги типу ґрунту та топографії, що дозволяє точніше оцінювати ризики забруднення пестицидами. Також науковці пропонують інтегрувати у модель параметр землекористування, що підвищує точність

оцінки реального антропогенного навантаження. Важливим напрямом є валідація моделей за допомогою фактичних даних моніторингу нітратів у підземних водах, що підтверджує ефективність модифікованих версій DRASTIC для зон інтенсивного землеробства.

В літературі значна увага приділяється новим категоріям ризиків. Зміна клімату розглядається як драйвер трансформації екологічних загроз, що призводить до зростання середньорічних збитків від посух та екстремальних опадів. Прогнозується, що до 2050 року втрати врожайності через кліматичні чинники можуть зрости на 42–66% [9].

Окремий пласт досліджень присвячено впливу воєнних дій на екологічну безпеку агросфери. Науковці фіксують безпрецедентні збитки: фізичне пошкодження ґрунтів, хімічне забруднення важкими металами від вибухів, знищення зрошувальних систем та замінування значних площ. Це створює довгострокові екологічні ризики, що потребують специфічних методів оцінки та рекультиватії.

У наукових працях обґрунтовується необхідність переходу до концепції «Сільське господарство 4.0» та впровадження інноваційних технологій [10]. Точне землеробство, використання ГІС-технологій, дистанційне зондування землі та диференційоване внесення агрохімікатів розглядаються як ефективні інструменти зниження екологічного навантаження. Також акцентується увага на важливості біологізації землеробства, розвитку органічного виробництва та впровадженні принципів циркулярної економіки для забезпечення сталого розвитку аграрного сектору.

Сучасний аграрний сектор України характеризується високим рівнем антропогенного навантаження на екосистеми, що зумовлено екстенсивною моделлю господарювання та домінуванням ресурсомістких технологій. Аналіз літературних джерел та статистичних даних дозволяє виокремити критичні тенденції деградації земельних та водних ресурсів, а також ідентифікувати основні джерела екологічної небезпеки.

Стан та трансформація земельних ресурсів Земля є основним засобом виробництва в аграрному секторі, проте інтенсифікація

землеробства призвела до порушення екологічної рівноваги. Рівень розораності земель в Україні перевищує 70%, що є одним із найвищих показників у світі. У Вінницькій області, яка є показовим аграрним регіоном, сільськогосподарські угіддя займають близько 76–77% території, а рілля становить понад 65% земельного фонду. Таке надмірне навантаження призводить до масштабної деградації ґрунтів.

Ключовими проявами деградації є ерозійні процеси. Майже 25% сільгоспугідь Вінниччини піддаються водній ерозії, а 7% – вітровій. Щорічно внаслідок ерозії втрачаються мільйони тонн родючого шару ґрунту, що призводить до незворотних втрат гумусу та поживних речовин. Крім того, відмічається закислення та втрата родючості ґрунтів. Близько 53–57% ґрунтів Вінницької області є кислими. Спостерігається від’ємний баланс поживних речовин (азоту, фосфору, калію) та гумусу, оскільки винос елементів з урожаєм не компенсується внесенням добрив. Використання важкої техніки спричиняє переущільнення ґрунту (на глибину до 60 см), що погіршує його водно-фізичні властивості та аерацію.

Додатковим критичним фактором став вплив військових дій. Станом на 2025 рік, близько 139 тис. км² території України вважаються забрудненими вибухонебезпечними предметами, а фізичне пошкодження ґрунтів (вирви, ущільнення) та хімічне забруднення важкими металами виводять значні площі з обігу.

Сільське господарство виступає як найбільшим споживачем води, так і потужним джерелом її забруднення. Вплив агровиробництва на гідросферу проявляється у двох площинах: виснаження водних горизонтів та хімічне і бактеріальне забруднення. Основну загрозу становить поверхневий стік із полів, насичений азотними та фосфорними сполуками, що призводить до евтрофікації водойм. Дослідження фіксують пряму кореляцію між часткою ріллі у водозборі та концентрацією азоту в річках. Пестициди, які мають високу мобільність, потрапляють у ґрунтові води та поверхневі водойми, створюючи токсикологічні ризики для біоти та людини. У країнах ЄС до 50% діючих речовин пестицидів виявляються навіть у дощовій воді. Водні об’єкти Вінниччини, які на 80% формуються за рахунок місцевого стоку, зазнають значного тиску.

Моніторинг фіксує перевищення ГДК по нітратах, фенолах, сполуках міді та марганцю. У зонах інтенсивного тваринництва (зокрема, поблизу птахофабрик) спостерігається підвищений вміст нітратів у підземних водах та високий колі-індекс у малих річках, що свідчить про забруднення органічними відходами.

На основі аналізу впливу на компоненти довкілля ідентифіковано ключові джерела екологічної небезпеки аграрного походження:

- неконтрольоване та незбалансоване використання мінеральних добрив і пестицидів є головним джерелом дифузного забруднення вод та деградації біоти ґрунту.
- висока розораність, недотримання сівозмін та домінування монокультур (соняшник, кукурудза, ріпак) виснажують ґрунт і посилюють ерозію. Розорювання схилів та прибережних захисних смуг є критичним фактором замулення річок.
- великі тваринницькі комплекси генерують значні обсяги гною та посліду. Неналежне управління цими відходами призводить до емісії аміаку в атмосферу та інфільтрації нітратів у водоносні горизонти.
- фізичне руйнування ландшафтів, хімічне забруднення продуктами вибухів та замінування територій створили нову категорію джерел небезпеки, що мають довгостроковий вплив на екологічну безпеку агросфери.

Таким чином, сучасний стан впливу сільського господарства на довкілля характеризується системним порушенням екологічної рівноваги, що вимагає впровадження комплексних інструментів оцінки ризиків та переходу до адаптивних моделей природокористування.

Для оцінки вразливості підземних вод до забруднення агрохімікатами в сучасній науці застосовують три основні групи методів: методи, що базуються на процесному моделюванні (simulation models), статистичні методи та методи накладання індексів (overlay and index methods). Хоча методи моделювання процесів забезпечують високу точність, вони потребують значних масивів вхідних даних, які часто недоступні на регіональному рівні. Статистичні методи ефективні лише за наявності великої кількості даних моніторингу якості води. В умовах необхідності оцінки ризиків на великих територіях з обмеженими

даними найбільш доцільним є використання індексних методів, серед яких світовим стандартом визнано модель DRASTIC.

Модель DRASTIC, розроблена Агентством з охорони навколишнього середовища США (EPA), дозволяє оцінити внутрішню (природну) вразливість водоносних горизонтів на основі семи гідрогеологічних параметрів, що утворюють акронім назви моделі [6-8]:

- D (Depth to water) – глибина залягання підземних вод: визначає шлях, який має подолати забруднювач до дзеркала вод;
- R (Net Recharge) – ефективне інфільтраційне живлення: обсяг води, що транспортує забруднювач з поверхні;
- A (Aquifer media) – літологічний склад водоносного горизонту: характеризує здатність породи вміщувати та пропускати воду;
- S (Soil media) – ґрунтовий покрив: верхній шар, де відбуваються основні біологічні процеси деградації забруднювачів;
- T (Topography) – нахил поверхні: впливає на співвідношення між поверхневим стоком та інфільтрацією;
- I (Impact of vadose zone) – вплив зони аерації: шар порід над водоносним горизонтом, який може затримувати або прискорювати рух забруднювачів;
- C (Hydraulic Conductivity) – гідравлічна провідність: здатність водоносного горизонту передавати воду.

Розрахунок індексу вразливості (DI) здійснюється методом зваженої суми за формулою:

$$DI = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w, \quad (1)$$

де r – рейтинг параметра (від 1 до 10),

w – вага параметра (від 1 до 5), що відображає його значущість.

Стандартна модель DRASTIC розрахована на загальну оцінку вразливості. Однак для умов інтенсивного землеробства, де основним джерелом небезпеки є пестициди та нітрати, необхідно застосовувати модифікацію Pesticide DRASTIC. Ця модифікація враховує специфіку поведінки агрохімікатів, змінюючи ваги параметрів (Таблиця 1).

Таблиця 1. Порівняння ваги параметрів у стандартній та пестицидній моделях DRASTIC

Параметр	Вага (Стандартна)	Вага (Пестицидна)	Обґрунтування змін для агрохімікатів
D (Глибина)	5	5	Залишається критичним фактором.
R (Живлення)	4	4	Основний транспортний засіб для нітратів.
A (Водонос)	3	3	Впливає на поширення у горизонті.
S (Ґрунт)	2	5	Ґрунт є головним бар'єром для адсорбції пестицидів.
T (Топографія)	1	3	Підвищена вага через ризик змиву хімікатів на схилах.
I (Зона аерації)	5	4	Менша вага порівняно з ґрунтом.
C (Провідність)	3	2	Менший вплив на вертикальний рух хімікатів.

У моделі Pesticide DRASTIC вага ґрунту (S) зростає з 2 до 5, оскільки саме у ґрунтовому профілі відбуваються процеси сорбції та біодеградації складних органічних сполук пестицидів. Вага топографії (T) збільшується з 1 до 3, оскільки рельєф визначає, чи затримається пестицид на полі для інфільтрації, чи буде змитий поверхневим стоком.

Інтеграція фактору землекористування (Modified DRASTIC-LU). Для підвищення точності оцінки ризиків в умовах антропогенного навантаження методологія передбачає додавання параметра землекористування (LU – Land Use). Інтенсивне сільське господарство генерує значні обсяги нітратів, які не враховуються класичною моделлю, що оцінює лише природну вразливість. Модифікований індекс розраховується як:

$$DI_{modified} = DI + LU_w \cdot LU_r . \quad (2)$$

Для орних земель та зон інтенсивного землеробства параметру LU присвоюється високий рейтинг (зазвичай 7–8), а вага цього параметра встановлюється на рівні 5, що робить його одним із найбільш впливових у моделі.

Важливим етапом методології є верифікація отриманих карт вразливості шляхом кореляційного аналізу з фактичними даними концентрації нітратів (NO_3^-) у підземних водах. Нітрати виступають індикатором аграрного забруднення, оскільки їх наявність у ґрунтових водах є неприродною і свідчить про антропогенний вплив. Дослідження показують,

що модифіковані моделі (Pesticide DRASTIC та DRASTIC-LU) мають вищий коефіцієнт кореляції з даними польових вимірювань порівняно зі стандартною моделлю, що підтверджує доцільність їх використання для агроландшафтів.

На основі наведеної математичної моделі авторами складено програмне забезпечення на Python адаптоване для використання на Google Colab, що впроваджено для використання у навчальному процесі студентів Вінницького національного технічного університету за спеціальностями E2 – Екологія та G2 – Технології захисту навколишнього середовища. Інтерфейс користувача програми розрахунку екологічних ризиків за моделлю DRASTIC наведено на рис. 1. Приклад результатів розрахунку екологічних ризиків за моделлю DRASTIC наведено у табл. 1. Отримано підсумковий індекс $DI = 105$, що відповідає помірному рівню екологічного ризику.

Сучасна парадигма екологічної безпеки аграрного сектору України зазнає фундаментальних трансформацій під впливом двох екзогенних трендів: глобальної зміни клімату та наслідків повномасштабної військової агресії. Ці фактори не лише посилюють традиційні екологічні ризики, а й генерують принципово нові загрози, що мають системний та довгостроковий характер.

За останні півстоліття середньорічна температура в Україні зросла на $1,4^\circ\text{C}$, що перевищує глобальні темпи потепління. Ця тенденція призводить до зміщення природно-кліматичних зон: степ перетворюється на посушливу зону з ознаками опустелювання, а лісостеп набуває характеристик степу.

Калькулятор екологічних ризиків DRASTIC

Тип моделі: Standard

Глибина до води (м): 10.50

Поповнення (мм/рік): 120.00

Тип водоносу (A): Тріщинуваті кристалічні пс

Тип ґрунту (S): Чорнозем (суглинковий)

Нахил поверхні (%): 20.00

Зона аерації (I): Глина / Мул

Гідравлічна провідність (м/добу): 5.00

Розрахувати ризик

Рис. 1. Інтерфейс користувача програми розрахунку екологічних ризиків за моделлю DRASTIC

Спостерігається зниження ефективності опадів через підвищене випаровування, що збільшує потребу сільськогосподарських культур у воді на 10–20%. У південних регіонах фіксується стає зменшення середньомісячної кількості опадів (на 10–25% залежно від області), що в поєднанні з виснаженням водних ресурсів створює загрозу дефіциту води для зрошення.

Застосування концепції «шарування ризиків» показує, що частота та інтенсивність екстремальних явищ (посухи, зливи, заморозки) зростає. У країнах Європи посуха вже є причиною близько 60% втрат у рослинництві. Прогнозується, що до 2050 року середньорічні

збитки від кліматичних ризиків можуть зрости на 42–66%.

Пом'якшення зим та підвищення температур вегетаційного періоду сприяють розширенню ареалів шкідників та хвороб рослин, а також появи нових інвазивних видів, що вимагає інтенсифікації хімічного захисту та створює додаткове пестицидне навантаження на довкілля.

Військова агресія стала безпрецедентним фактором руйнування екологічної безпеки, створивши специфічні бelligеративні ландшафти. Станом на 2024–2025 роки понад 30% оброблюваних земель України опинилися в зоні ризику або були виведені з обігу.

Таблиця 2. Результати розрахунку екологічних ризиків за моделлю DRASTIC

Параметр	Рейтинг (r)	Вага (w)	Добуток
D (Глибина)	5	5	25
R (Поповнення)	6	4	24
A (Водонос)	4	3	12
S (Ґрунт)	5	5	25
T (Топографія)	1	3	3
I (Зона аерації)	3	4	12
C (Провідність)	2	2	4
РАЗОМ	-		105

Основними складовими воєнного впливу є механічна та хімічна деградація ґрунтів. Бойові дії призводять до фізичного руйнування ґрунтового покриву (вирви, ущільнення важкою технікою) та його хімічного забруднення важкими металами (свинець, кадмій), сіркою та залишками вибухових речовин. За оцінками, шкода, завдана ґрунтам, оцінюється мільярдами доларів, а процеси рекультивациі можуть тривати десятиліттями. Близько 139–174 тис. км² території України є потенційно забрудненими вибухонебезпечними предметами. Це не лише унеможливорює сільськогосподарське використання земель, а й блокує проведення природоохоронних заходів (наприклад, створення лісосмуг чи догляд за наявними), що посилює ерозійні процеси. Знищення Каховської ГЕС та пошкодження зрошувальних систем на півдні України призвело до втрати джерел зрошення для сотень тисяч гектарів земель, що в умовах кліматичних змін прискорює процеси опустелювання. Удари по енергетичній інфраструктурі змушують аграріїв використовувати дизельні генератори, що підвищує викиди забруднюючих речовин та собівартість продукції. Порушення логістики та блокада портів призводять до накопичення відходів та неможливості збуту продукції, що порушує фінансову стійкість підприємств і обмежує їх здатність інвестувати в екологічні технології.

Критичною особливістю сучасного етапу є синергія кліматичних та воєнних факторів. Війна обмежує адаптаційний потенціал аграрного сектору до змін клімату: знищена іригаційна інфраструктура не дозволяє компенсувати дефіцит вологи, а фінансове виснаження виробників та дефіцит кадрів гальмують впровадження ґрунтозахисних технологій (no-till, точне землеробство). Крім того, вимушена інтенсифікація виробництва на вцілілих землях для компенсації втрат може призвести до прискореного виснаження ґрунтів та порушення сівозмін.

Таким чином, формування нових загроз екологічній безпеці відбувається за сценарієм накладання глобальних кліматичних трендів на катастрофічні наслідки війни, що вимагає розробки адаптивних стратегій управління ризиками, які б враховували необхідність одночасного відновлення порушених екосистем та адаптації до нових кліматичних реалій.

В умовах глобальних кліматичних змін та необхідності повоєнного відновлення аграрного сектору України традиційні екстенсивні методи господарювання вичерпали свій ресурс. Забезпечення екологічної безпеки та конкурентоспроможності галузі вимагає переходу до концепції «Сільське господарство 4.0» (Agriculture 4.0) та впровадження принципів циркулярної економіки. Комплексне поєднання технологічних інновацій з дієвими організаційно-економічними механізмами є безальтернативним шляхом до мінімізації екологічних ризиків та досягнення цілей сталого розвитку.

Впровадження точного землеробства (Precision Farming) є ключовим інструментом зниження антропогенного навантаження на агроландшафти.

Використання геоінформаційних систем (ГІС), супутникового моніторингу, дронів та сенсорів дозволяє перейти від суцільного до диференційованого обробітку полів. Доцільність цього підходу підтверджується такими факторами:

- технології змінного нормування (VRT) дозволяють вносити добрива та засоби захисту рослин (ЗЗР) виключно в зонах потреби, що скорочує витрати ресурсів на 15–30% та мінімізує хімічне забруднення ґрунтів і водних об'єктів.

- використання IoT-датчиків та систем дистанційного зондування забезпечує контроль вологості ґрунту та стану посівів, що дозволяє впроваджувати «смарт-іригацію» та економити до 50% води для поливу, запобігаючи вторинному засоленню ґрунтів.

- автоматизація процесів та використання автономної техніки оптимізують маршрути руху, зменшуючи витрати пального та викиди парникових газів, а також запобігають переущільненню ґрунту.

Паралельно з цифровізацією необхідна глибока біологізація виробничих процесів для відновлення природного капіталу. Наукові дослідження доводять, що перехід до агроекологічних методів підвищує стійкість агроекосистем до кліматичних стресів. Заміна хімічних пестицидів на біологічні препарати та використання ентомофагів дозволяє відновити біорізноманіття та знизити токсичне навантаження на довкілля. Впровадження науково обґрунтованих сівозмін, використання покривних культур та органічних добрив

(компосту, сидератів) сприяє секвестрації вуглецю та покращенню структури ґрунту. Переробка відходів тваринництва та рослинництва на біогаз та біодобрива вирішує проблему утилізації відходів та забезпечує господарства відновлюваною енергією, замикаючи цикл виробництва.

Масштабування технологічних інновацій неможливе без створення сприятливого економічного середовища та інституційної підтримки. Розвиток ринку зелених облігацій та впровадження банківських продуктів, прив'язаних до ESG-критеріїв (Environmental, Social, Governance), дозволить залучити інвестиції в екологічну модернізацію агропідприємств. Державна програма «Доступні кредити 5-7-9%» має бути розширена для підтримки проектів кліматичної адаптації. Адаптація до стратегії «Від ферми до виделки» (Farm to Fork) в рамках Європейського зеленого курсу відкриває доступ до європейських ринків для української продукції, виробленої за екологічними стандартами. Впровадження концепції «шарування ризиків» та інструментів агрострахування дозволить мінімізувати фінансові втрати виробників від екстремальних погодних явищ, частота яких зростає через зміни клімату. Розвиток державних сервісів, таких як «Державний аграрний реєстр», забезпечує прозорість земельних відносин та спрощує доступ фермерів до програм державної підтримки.

Впровадження розглянутих інноваційних технологій та економічних механізмів є не лише способом мінімізації екологічних ризиків, а й фундаментом для побудови нової моделі аграрної економіки. Це дозволить трансформувати екологічні виклики у можливості для підвищення ефективності виробництва, забезпечення продовольчої безпеки та інтеграції України у глобальні ланцюги доданої вартості на принципах сталого розвитку.

Висновки. Встановлено, що сучасна модель аграрного виробництва в Україні, яка характеризується високим рівнем розораності земель (понад 70%) та домінуванням екстенсивних методів господарювання, генерує системні екологічні ризики. Ідентифіковано, що ключовими дестабілізуючими факторами є порушення науково обґрунтованих сівозмін, хімічне забруднення ґрунтів та водних ресурсів

агрохімікатами, а також деградація фізичної структури ґрунтів. Сільське господарство трансформувалося з гаранта продовольчої безпеки у потужне джерело антропогенного тиску, що вимагає негайної зміни парадигми на засадах сталого розвитку. Доведено доцільність використання модифікованих індексних моделей, зокрема Pesticide DRASTIC та DRASTIC-LU, для просторової оцінки вразливості підземних вод в зонах інтенсивного землеробства. Розрахунки підтвердили, що включення параметрів землекористування (Land Use) та специфічних ваг для типу ґрунту дозволяє значно точніше ідентифікувати зони ризику нітратного та пестицидного забруднення порівняно зі стандартними методами. Це створює наукове підґрунтя для зонування територій та прийняття управлінських рішень щодо обмеження хімічного навантаження. Виявлено, що забезпечення екологічної безпеки ускладнюється накладанням двох трендів: глобальних змін клімату та наслідків військової агресії. Кліматичні зміни призводять до зростання середньорічних збитків (AAL) та зміщення природно-кліматичних зон, що вимагає адаптації технологій. Водночас, воєнні дії сформували специфічні бelligеративні ландшафти (понад 30% земель у зоні ризику), що характеризуються механічною деградацією, хімічним забрудненням важкими металами та замінуванням, що виводить значні площі з обігу на десятиліття. Обґрунтовано, що мінімізація екологічних ризиків можлива лише за умови переходу до концепції «Сільське господарство 4.0». Впровадження технологій точного землеробства (змінні норми внесення, дистанційний моніторинг), біологізація захисту рослин та розвиток циркулярної економіки (переробка відходів у біогаз) дозволяють розірвати зв'язок між зростанням врожайності та збільшенням екологічного сліду. Для реалізації стратегії екологічної безпеки необхідно гармонізувати національне законодавство з вимогами Європейського зеленого курсу (стратегія Farm to Fork). Критично важливим є запровадження дієвих фінансово-економічних інструментів: розвиток ринку зелених облігацій, екологічне страхування ризиків та державна підтримка фермерів, які впроваджують ґрунтозахисні технології. Лише комплексне поєднання технологічних інновацій, жорсткого екологічного моніторингу та

фінансових стимулів дозволить забезпечити сталий розвиток аграрного сектору в умовах повоєнного відновлення.

Список використаних джерел:

1. Тарасюк О. В. Теоретичні засади формування концепції сталого розвитку та її практична реалізація на сучасному етапі розвитку суспільства. *Економіка, управління та адміністрування*, 2025. Vol.111. P. 51–63. doi: 10.26642/ema-2025-1(111)-51-63.
2. Slessarev E.W., Nezgoduk A., Golla J.K., Faybishenko B., Dwivedi D., Nico P.S., Birkholzer J.T., O’Ryan D., Alvarez O., Kersting A.B., Zavarin M. Application of the DRASTIC Model to Assess the Vulnerability of Groundwater Contamination Near Zaporizhzhia Nuclear Power Plant, Ukraine. *ACS ES T Water*, 2024. Vol. 5. Issue 1. P. 366-376. doi: 10.1021/acsestwater.4c00891.
3. Agricultural Policy Monitoring and Evaluation 2025. Paris : OECD Publishing, 2025. URL: https://www.oecd.org/en/publications/agricultural-policy-monitoring-and-evaluation-2025_a80ac398-en/full-report/ukraine_0e71d61e.html
4. European Green Deal. Mission of Ukraine to the European Union. URL: <https://ukraine-eu.mfa.gov.ua/en/2633-relations/galuzeve-spivrobitnictvo/klimat-yevropejska-zelena-ugoda>
5. Дребот О.І. , Бендасюк О.О., Палапа Н.В., Паляничко Н.І., Тараріко О.Г., Ільєнко Т.В., Кучма Т.Л., Дем’янюк О.С., Лазаренко В.І., Райчук Л.А. Продовольча та екологічна безпека України в умовах воєнного стану: колективна

монографія /за ред. О.І. Дребот. Київ: Видавництво НУБІП України, 2022. 266 с.

6. Soller D. R. Applying the DRASTIC model: A review of county-scale maps. Reston, VA : U.S. Geological Survey, 1992. DOI: <https://doi.org/10.3133/ofr92297>.
7. Barbulescu A. Assessing Groundwater Vulnerability: DRASTIC and DRASTIC-Like Methods: A Review. *Water* 2020, 12, 1356. <https://doi.org/10.3390/w12051356>.
8. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings / L. Aller, T. Bennett, J. H. Lehr et al. Washington, DC : U.S. Environmental Protection Agency, 1987. 622 p. (EPA/600/2-87/035). URL: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=20007H0V.TXT>
9. Climate, Environment and Biodiversity Strategy 2025–2031 / International Fund for Agricultural Development. Rome : IFAD, 2025. 23 p. (EB 2025/145/R.14). URL: <https://webapps.ifad.org/members/eb/145/docs/EB-2025-145-R-14.pdf>
10. Graaff M.-A., Hornslein N., Throop H.L., Kardol P., van Diepen L.T.A. Chapter One - Effects of agricultural intensification on soil biodiversity and implications for ecosystem functioning: A meta-analysis. *Advances in Agronomy*, Academic Press, Volume 155, 2019, P.1-4. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.01.001>.

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ УТИЛІЗАЦІЇ НАФТОШЛАМІВ І БУРОВИХ ШЛАМІВ У НАФТОГАЗОВІЙ ГАЛУЗІ

Маркіна Л.М. Рижов Г.О.

Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління,
вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна

Анотація

У статті розглянуто екологічні аспекти утилізації нафтошламів і бурових шламів як специфічних видів небезпечних відходів нафтогазової галузі, що характеризуються складним багатокомпонентним складом і підвищеним рівнем екологічних ризиків.

Проаналізовано основні джерела утворення нафтошламів та бурових шламів, їх фізико-хімічні властивості, а також потенційний негативний вплив на ґрунти, поверхневі та підземні води й атмосферне повітря. Особливу увагу приділено вмісту нафтопродуктів, поліциклічних ароматичних вуглеводнів, солей та важких металів як ключових чинників екологічної небезпеки.

У роботі узагальнено сучасні наукові підходи до утилізації та знешкодження нафтошламів і бурових шламів, зокрема фізико-хімічні, термічні та комбіновані технології, а також методи стабілізації та подальшого використання твердих залишків.

Проаналізовано екологічні обмеження впровадження таких технологій відповідно до вимог національного законодавства України та підходів Європейського Союзу, включно з принципами найкращих доступних технологій (БАТ). Обґрунтовано доцільність застосування ризик-орієнтованого підходу при виборі технологій утилізації нафтошламів і бурових шламів з урахуванням регіональних умов, масштабів утворення відходів та вимог екологічної безпеки. Визначено перспективні напрями подальших досліджень у сфері екологічно безпечного управління відходами нафтогазового комплексу.

Ключові слова: нафтошлами; бурові шлами; утилізація; екологічні ризики; нафтогазова галузь; БАТ

Abstract

The article examines environmental aspects of oily sludge and drilling sludge utilization as specific hazardous wastes generated by the oil and gas industry. These wastes are characterized by complex multicomponent composition and high environmental risk potential. The main sources of oily and drilling sludge generation, their physicochemical properties, and potential impacts on soil, surface and groundwater, and atmospheric air are analyzed. Special attention is paid to the content of petroleum hydrocarbons, polycyclic aromatic hydrocarbons, salts, and heavy metals as key factors of environmental hazard.

Modern scientific approaches to the treatment and utilization of oily and drilling sludges are summarized, including physicochemical, thermal, and combined technologies, as well as stabilization and reuse of solid residues. Environmental constraints related to the implementation of these technologies are analyzed in accordance with Ukrainian legislation and European Union approaches, including the principles of Best Available Techniques (BAT). The study substantiates the necessity of a risk-based approach in selecting sludge treatment technologies, taking into account regional conditions, waste generation volumes, and environmental safety requirements. Perspectives of further research are determined in the context of environmentally sound management of oil and gas waste streams.

Keywords: Oily sludge; drilling sludge; utilization; environmental risks; oil and gas industry; BAT

Вступ

Інтенсивний розвиток нафтогазової галузі супроводжується утворенням значних обсягів

специфічних відходів, серед яких особливе місце займають нафтошлами та бурові шлами.

Зазначені відходи формуються на різних етапах розвідки, видобування, підготовки та транспортування вуглеводневої сировини і характеризуються складним багатокомпонентним складом, що зумовлює їх підвищену екологічну небезпеку. Наявність у складі нафтошламів і бурових шламів нафтопродуктів, поліциклічних ароматичних вуглеводнів, солей, поверхнево-активних речовин та важких металів створює ризики забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод, а також негативного впливу на атмосферне повітря та біоту.

Проблема поводження з нафтошламами і буровими шламами є особливо актуальною для країн із розвиненим нафтогазовим комплексом, зокрема України, де значна частина об'єктів інфраструктури галузі експлуатується тривалий час, а технології утилізації відходів не завжди відповідають сучасним вимогам екологічної безпеки.

Накопичення таких відходів на відкритих майданчиках, у шламонакопичувачах або тимчасових сховищах без належних інженерних і природоохоронних заходів призводить до формування довготривалих осередків екологічного ризику.

Сучасна система управління небезпечними відходами передбачає перехід від формального виконання природоохоронних вимог до впровадження науково обґрунтованих підходів, заснованих на оцінюванні екологічних ризиків та виборі технологій з урахуванням їх впливу на довкілля протягом усього життєвого циклу. У цьому контексті особливого значення набуває застосування ризик-орієнтованого підходу та принципів найкращих доступних технологій при виборі способів утилізації та знешкодження нафтошламів і бурових шламів.

Незважаючи на наявність значної кількості наукових досліджень, присвячених окремим аспектам утилізації нафтовмісних і бурових відходів, питання комплексного врахування екологічних ризиків, нормативних обмежень та технологічних можливостей у межах єдиного підходу залишаються недостатньо опрацьованими. Це зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на узагальнення сучасних технологічних рішень

та обґрунтування екологічно безпечних напрямів управління нафтошламами і буровими шламами в умовах нафтогазової галузі.

Актуальність дослідження

Нафтогазова галузь є одним із найбільш екологічно навантажених секторів промисловості, діяльність якого супроводжується утворенням значних обсягів небезпечних відходів.

Особливу групу таких відходів становлять нафтошлами та бурові шлами, що формуються в процесі буріння свердловин, експлуатації нафтових і газових родовищ, очищення резервуарів, трубопроводів та технологічного обладнання.

Актуальність проблеми утилізації нафтошламів і бурових шламів зумовлена не лише їх значними обсягами, але й складним багатокомпонентним складом, який включає нафтові вуглеводні, поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), солі, поверхнево-активні речовини, важкі метали та мінеральні домішки.

У разі неналежного поводження ці відходи стають джерелами тривалого забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод, а також атмосферного повітря.

Для України проблема має особливу вагу у зв'язку з тривалою експлуатацією нафтогазових об'єктів, наявністю застарілих шламонакопичувачів і обмеженням впровадження сучасних екологічно безпечних технологій утилізації. У цьому контексті актуалізується необхідність наукового обґрунтування підходів до вибору технологій утилізації з урахуванням екологічних ризиків і вимог національного та європейського законодавства.

Постановка проблеми

Незважаючи на розвиток нормативно-правового регулювання у сфері управління відходами, у практиці нафтогазової галузі досі домінують підходи, орієнтовані на тимчасове зберігання або локальне знешкодження нафтошламів і бурових шламів без урахування довгострокових екологічних наслідків.

Основною проблемою є відсутність системного ризик-орієнтованого підходу до вибору технологій утилізації, що призводить до:

- вторинного забруднення ґрунтів і вод;
- накопичення токсичних компонентів у природних екосистемах;
- зростання техногенного навантаження на регіони видобування.

Мета дослідження – обґрунтування екологічно безпечних підходів до утилізації нафтошламів і бурових шламів на основі аналізу їх складу, екологічних ризиків та застосування принципів найкращих доступних технологій (ВАТ).

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що використання ризик-орієнтованого підходу у поєднанні з ВАТ дозволяє суттєво знизити негативний вплив нафтошламів і бурових шламів на довкілля та підвищити ефективність управління відходами нафтогазової галузі.

Зв'язок з іншими дослідженнями

Проблематика поводження з нафтовмісними та буровими відходами широко представлена у наукових працях українських і зарубіжних дослідників, де розглядаються технології знешкодження, оцінювання екологічних ризиків та нормативні аспекти управління небезпечними відходами.

Водночас більшість досліджень мають фрагментарний характер і не забезпечують комплексного поєднання екологічної оцінки, технологічної ефективності та нормативних вимог ВАТ.

Методи дослідження

У дослідженні застосовано:

- методи аналізу та узагальнення наукових джерел;
- порівняльний аналіз технологій утилізації;
- елементи кількісної оцінки екологічного ризику;
- розрахункові методи оцінки потенційного забруднення.

Виклад основного матеріалу

Загальна характеристика нафтошламів і бурових шламів як об'єкта екологічної оцінки

Нафтошлами та бурові шлами належать до категорії небезпечних відходів нафтогазової галузі, що формуються на різних стадіях

розвідки, буріння, експлуатації та обслуговування свердловин, а також у процесі зберігання й транспортування нафтопродуктів. Їх особливістю є складна фазова структура, яка включає органічну, водну та мінеральну складові у різних співвідношеннях, що суттєво ускладнює вибір ефективних і екологічно безпечних методів утилізації.

Нафтошлами, як правило, утворюються під час очищення резервуарів, нафтовловлювачів, трубопроводів та очисних споруд. Бурові шлами формуються безпосередньо у процесі буріння свердловин і містять залишки бурових розчинів, вибурену породу та хімічні реагенти, що застосовуються для стабілізації процесу буріння. Спільною рисою для обох видів відходів є наявність токсичних компонентів, які зумовлюють високий рівень екологічної небезпеки.

Саме склад і властивості нафтошламів та бурових шламів визначають масштаби їх негативного впливу на довкілля, а також можливість або доцільність застосування тих чи інших технологій утилізації. У цьому контексті першочергового значення набуває детальна характеристика фізико-хімічного складу цих відходів.

Фізико-хімічні властивості нафтошламів і бурових шламів та їх екологічна значущість

Фізико-хімічний склад нафтошламів і бурових шламів характеризується значною варіабельністю, що зумовлено технологіями видобування, типами бурових розчинів, геологічними умовами та тривалістю зберігання відходів.

У загальному випадку у складі нафтошламів домінують нафтопродукти та вода, тоді як у бурових шламах переважає мінеральна фаза з домішками органічних і неорганічних реагентів.

Наявність у складі відходів нафтових вуглеводнів зумовлює їх канцерогенні, мутагенні та токсичні властивості. Особливо небезпечними є поліциклічні ароматичні вуглеводні, які характеризуються високою стійкістю у навколишньому середовищі та здатністю до біоаккумуляції. Важкі метали, що входять до складу бурових шламів, здатні мігрувати у ґрунтово-водне середовище та порушувати функціонування екосистем навіть

за низьких концентрацій.

Таким чином, фізико-хімічні властивості нафтошламів і бурових шламів формують

потенціал їх екологічної небезпеки та мають бути базовим критерієм при виборі технологій утилізації.

Таблиця 1 Типовий фізико-хімічний склад нафтошламів і бурових шламів

Показник	Нафтошлами	Бурові шлами	Одиниця виміру
Вміст води	30–70	20–50	% мас.
Вміст нафтопродуктів	10–40	2–15	% мас.
Мінеральна фаза	10–50	40–70	% мас.
Поліциклічні ароматичні вуглеводні	50–800	10–200	мг/кг
Солі (Cl^- , SO_4^{2-})	1–10	2–15	% мас.
Свинець (Pb)	10–150	5–80	мг/кг
Кадмій (Cd)	0,5–10	0,1–3	мг/кг
Цинк (Zn)	50–500	20–300	мг/кг

Екологічні ризики накопичення нафтошламів і бурових шламів

Накопичення нафтошламів і бурових шламів у відкритих шламонакопичувачах або тимчасових сховищах створює умови для формування комплексного екологічного ризику, який проявляється через забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод, а також атмосферного повітря. У разі порушення гідроізоляції сховищ можливе проникнення токсичних компонентів у підземні водоносні

горизонти, що становить загрозу для джерел питного водопостачання.

Для кількісної оцінки потенційного екологічного ризику доцільно використовувати інтегральні показники, що враховують концентрації забруднювачів та їх екотоксикологічну небезпечність. У межах дослідження застосовано узагальнений ризиковий показник, який дозволяє порівнювати різні варіанти поводження з відходами.

Таблиця 2 Коефіцієнти екологічної небезпеки основних забруднювачів нафтошламів і бурових шламів

Забруднювач	Коефіцієнт небезпеки K_i	Клас небезпеки
Нафтопродукти	1,0	III
ПАВ	1,5	II
Свинець (Pb)	2,0	I
Кадмій (Cd)	2,5	I
Цинк (Zn)	1,2	II
Хлориди	0,8	III

Отримані розрахункові значення свідчать, що основний внесок у формування екологічного ризику роблять нафтові вуглеводні та важкі метали, тоді як мінеральна складова переважно впливає на фізичні властивості ґрунтів. Це підтверджує доцільність спрямування заходів утилізації насамперед на знешкодження органічної токсичної фракції.

Аналіз сучасних технологій утилізації нафтошламів і бурових шламів

Сучасні технології утилізації нафтошламів і бурових шламів умовно поділяються на фізико-хімічні, термічні та комбіновані. Фізико-хімічні методи передбачають розділення фаз, екстракцію нафтопродуктів, стабілізацію та осадження токсичних компонентів. Їх перевагою є відносно низькі енергетичні витрати, однак ефективність таких методів часто є недостатньою для повного знешкодження відходів.

Термічні технології, зокрема високотемпературне знешкодження та піроліз, забезпечують глибоке руйнування органічних компонентів і суттєве зменшення об'єму відходів. Разом із тим вони потребують значних капіталовкладень та суворого дотримання вимог щодо очищення газових викидів.

Таблиця 3 Порівняльна характеристика технологій утилізації нафтошламів і бурових шламів

Технологія	Ступінь знешкодження	Екологічний ризик	Вторинні відходи	Відповідність БАТ
Механічне зневоднення	Низький	Високий	Значні	Ні
Фізико-хімічна стабілізація	Середній	Середній	Помірні	Часткова
Термічне знешкодження	Високий	Низький	Мінімальні	Висока
Комбінована технологія	Дуже високий	Низький	Мінімальні	Повна

Комбіновані технології поєднують переваги різних підходів і дозволяють досягти оптимального балансу між екологічною безпекою та економічною доцільністю. Саме такі рішення найбільш повно відповідають принципам найкращих доступних технологій.

Відповідність технологій принципам БАТ та нормативним вимогам

Принципи БАТ передбачають застосування технологій, які забезпечують мінімальний негативний вплив на довкілля протягом усього життєвого циклу. У контексті утилізації нафтошламів і бурових шламів це означає необхідність оцінювання не лише ефективності знешкодження, але й вторинних впливів, зокрема утворення викидів, стічних вод та вторинних відходів.

Порівняльний аналіз свідчить, що фізико-хімічні методи лише частково відповідають БАТ, тоді як термічні та комбіновані технології демонструють вищий рівень відповідності за умови впровадження сучасних систем газоочищення та контролю викидів.

Обґрунтування ризик-орієнтованого підходу до вибору технологій утилізації

Ризик-орієнтований підхід передбачає врахування регіональних особливостей, екологічної чутливості територій, обсягів утворення відходів та їх складу. Такий підхід дозволяє уникнути універсальних рішень і адаптувати технології утилізації до конкретних умов, що є особливо важливим для України з її різноманітними природними та техногенними

умовами.

Застосування ризик-орієнтованого підходу забезпечує зниження екологічного навантаження, підвищення рівня екологічної безпеки та оптимізацію витрат на управління відходами.

Формування техногенного навантаження на територіях нафтогазової та промислової діяльності супроводжується комплексним впливом на ґрунти, водні ресурси та біорізноманіття. Основні екологічні наслідки такого впливу, включно з деградацією екосистем і виснаженням природних ресурсів, узагальнено на рис. 1.

Як показано на рис. 1, техногенна діяльність призводить до деградації ґрунтів, виснаження підземних вод та втрати біорізноманіття, що підтверджує необхідність застосування комплексного ризик-орієнтованого підходу при управлінні нафтошламами і буровими шламами.

Розрахунковий блок оцінки екологічного ризику забруднення ґрунтів нафтошламами та буровими шламами

Ґрунти є одним із найбільш уразливих компонентів довкілля при поведженні з нафтошламами та буровими шламами, оскільки саме через ґрунтове середовище відбувається подальша міграція токсичних компонентів у поверхневі та підземні води, а також їх накопичення у біоті. У зв'язку з цим кількісна оцінка ризику забруднення ґрунтів є ключовим елементом екологічного обґрунтування вибору технологій утилізації

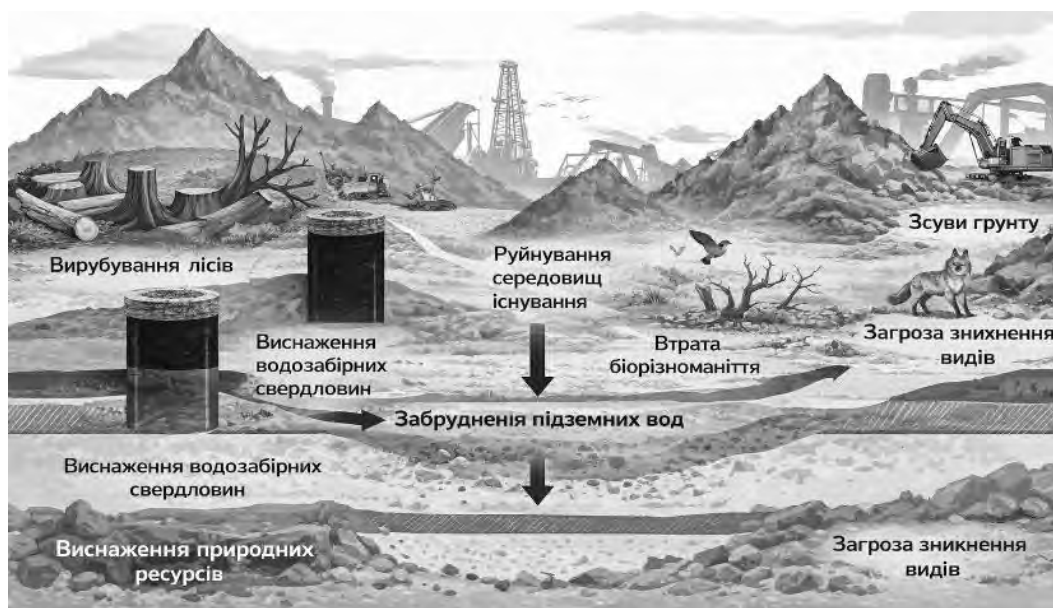


Рисунок 1 – Схема техногенного впливу промислової діяльності на ґрунти, підземні води та біорізноманіття

Для оцінки рівня хімічного забруднення ґрунтів доцільно застосовувати інтегральний показник сумарного забруднення, який враховує внесок окремих токсичних компонентів нафтошламів і бурових шламів:

$$Z_c = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ГДК_i}$$

де:

C_i — фактична концентрація i -го забруднювача у ґрунті, мг/кг;
 $ГДК_i$ — гранично допустима концентрація відповідної речовини у ґрунті, мг/кг.

За результатами розрахунків встановлено, що найбільший внесок у формування інтегрального показника забруднення ґрунтів роблять нафтові вуглеводні та важкі метали, зокрема свинець і кадмій.

Таблиця 4 Типові концентрації забруднювачів у ґрунтах поблизу шламонакопичувачів

Показник	Концентрація	ГДК	Одиниця
Нафтопродукти	2 000–10 000	1 000	мг/кг
ПАВ	50–400	20	мг/кг
Свинець (Pb)	60–300	32	мг/кг
Кадмій (Cd)	2–8	0,7	мг/кг
Цинк (Zn)	150–600	100	мг/кг

Значення показника Z_c , що перевищують одиницю, свідчать про перевищення допустимого рівня забруднення та необхідність проведення природоохоронних заходів.

Оцінка ступеня екологічної небезпеки забруднення ґрунтів може здійснюватися за градаціями, наведеними у табл. 5.

Інтерпретація отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що у разі тривалого накопичення нафтошламів і бурових шламів без належної ізоляції формується зона

стійкого техногенного впливу, яка потребує не

Таблиця 5 Оцінка рівня забруднення ґрунтів за інтегральним показником Z_c

Значення Z_c	Характеристика стану ґрунтів
≤ 1	Допустимий
1–2	Помірно небезпечний
2–5	Небезпечний
> 5	Вкрай небезпечний

лише утилізації відходів, але й подальшої рекультивації ґрунтів.

Оцінка ризику міграції забруднювачів у підземні води

Підземні води є стратегічно важливим природним ресурсом, а їх забруднення нафтовими вуглеводнями та важкими металами має довготривалі та часто необоротні наслідки. Особливу небезпеку становлять шламонакопичувачі, розташовані у зонах із високим рівнем ґрунтових вод або за відсутності ефективної гідроізоляції.

Для оцінки потенційної міграції забруднювачів у підземні води застосовується розрахунок фільтраційного потоку забрудненої води:

$$Q = k \cdot i \cdot F$$

де:

Q — об'єм фільтраційного потоку, м³/добу;

k — коефіцієнт фільтрації ґрунтів, м/добу;

i — гідравлічний градієнт;

F — площа фільтрації, м².

На основі обчисленого фільтраційного потоку визначається масовий потік забруднювача:

$$M = Q \cdot C_w$$

де:

M — маса забруднювача, що мігрує у підземні води, кг/добу;

C_w — концентрація забруднювача у

фільтраті, мг/л.

Таблиця 6 Коефіцієнти фільтрації ґрунтів для оцінки ризику забруднення підземних вод

Тип ґрунту	Коефіцієнт фільтрації k	Одиниця
Глина	0,001–0,01	м/добу
Суглинок	0,01–0,1	м/добу
Супісок	0,1–1,0	м/добу
Пісок	1,0–10	м/добу
Гравій	10–50	м/добу

Отримані результати дозволяють оцінити ризик перевищення гранично допустимих концентрацій забруднювачів у підземних водах та визначити необхідність впровадження захисних заходів, зокрема гідроізоляції, дренажних систем або повної ліквідації шламонакопичувачів.

Процеси вертикальної та горизонтальної міграції легких неводних нафтопродуктів (LNAPL), а також розчинених забруднювачів у системі «ґрунт – зона аерації – підземні води» мають складний багатофазний характер і залежать від фізико-хімічних властивостей ґрунтів, гідрогеологічних умов та інтенсивності інфільтрації атмосферних опадів.

Узагальнену схему міграції нафтовмісних забруднювачів наведено на рис. 2.

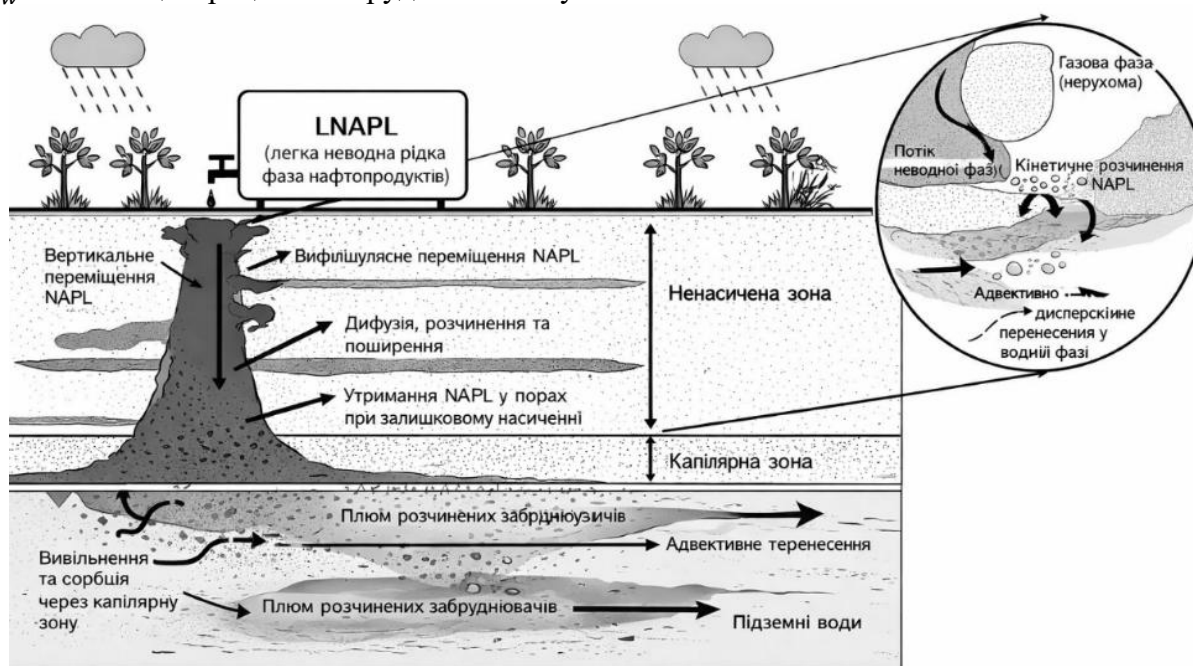


Рис. 2 – Схема міграції легких неводних нафтопродуктів (LNAPL) та розчинених забруднювачів у системі «ґрунт – зона аерації – підземні води»

Поєднання результатів оцінки забруднення ґрунтів і ризику забруднення підземних вод дозволяє сформулювати інтегровану модель екологічної небезпеки нафтошламів і бурових шламів. Такий підхід забезпечує більш обґрунтований вибір технологій утилізації з урахуванням показань на рис. 2, ключовим

чинником поширення забруднювачів є фільтраційний потік у зоні капілярного підняття, що підтверджує доцільність застосування ризик-орієнтованого підходу при виборі технологій утилізації нафтошламів і бурових шламів, як поточного, так і потенційного впливу на довкілля.

Таблиця 7 Інтегрована оцінка екологічної небезпеки та рекомендації щодо утилізації

Рівень ризику	Стан ґрунтів	Ризик для підземних вод	Рекомендована технологія
Низький	Допустимий	Мінімальний	Фізико-хімічна
Середній	Помірно небезпечний	Локальний	Комбінована
Високий	Небезпечний	Значний	Термічна
Критичний	Вкрай небезпечний	Високий	Термічна + рекультивация

Результати інтегрованої оцінки свідчать, що для територій із високою гідрогеологічною чутливістю пріоритетними є технології, які забезпечують повне знешкодження органічної фракції та мінімізацію утворення вторинних відходів, зокрема комбіновані термічні методи з попередньою фізико-хімічною підготовкою.

Екологічна та практична значущість отриманих результатів

Запропонований підхід до оцінки екологічних ризиків та вибору технологій утилізації нафтошламів і бурових шламів може бути використаний:

- при розробленні проєктів утилізації відходів нафтогазового комплексу;
 - у процесі проведення оцінки впливу на довкілля;
 - при формуванні регіональних програм управління небезпечними відходами.
- Застосування наведених розрахункових

моделей дозволяє підвищити обґрунтованість управлінських рішень і знизити екологічні ризики для територій видобування.

Обговорення результатів

Узагальнення результатів дослідження підтверджує, що ефективне поводження з нафтошламами і буровими шламами можливе лише за умови інтеграції екологічної оцінки, розрахункових методів аналізу ризику та принципів ВАТ. Такий підхід відповідає сучасним вимогам сталого розвитку та екологічної безпеки нафтогазової галузі.

Для оцінки потенційного ризику

використано інтегральний показник:

$$R = \sum_{i=1}^n C_i \cdot K_i$$

де:

C_i – концентрація i -го забруднювача,
 K_i – коефіцієнт екологічної небезпеки.

Таблиця 2 – Коефіцієнти екологічної небезпеки

Забруднювач	K_i
Нафтопродукти	1,0
ПАВ	1,5
Свинець	2,0
Кадмій	2,5

Висновки

1. Встановлено, що нафтошлами та бурові шлами є небезпечними багатокомпонентними відходами нафтогазової галузі, накопичення яких без належних інженерних заходів призводить до стійкого техногенного впливу на ґрунти, підземні води та біорізноманіття.

2. Розрахункові оцінки підтвердили, що основними шляхами негативного впливу є забруднення ґрунтів і міграція розчинених забруднювачів у підземні води, при цьому найбільший внесок у формування екологічного ризику роблять нафтові вуглеводні та важкі метали.

3. Показано, що гідрогеологічні умови, коефіцієнти фільтрації ґрунтів і інтенсивність інфільтрації атмосферних опадів

визначають масштаби поширення забруднення у системі «грунт – зона аерації – підземні води».

4. Порівняльний аналіз технологій утилізації засвідчив обмежену ефективність фізико-хімічних методів і перевагу термічних та комбінованих технологій з точки зору мінімізації екологічних ризиків і відповідності принципам найкращих доступних технологій (BAT).

5. Обґрунтовано доцільність застосування ризик-орієнтованого підходу при виборі технологій утилізації нафтошламів і бурових шламів, що дозволяє підвищити рівень екологічної безпеки та може бути використано при проведенні оцінки впливу на довкілля й розробленні природоохоронних заходів.

Список використаних джерел

1. Про управління відходами : Закон України від 20.06.2022 № 2320-IX // Відомості Верховної Ради України. 2022. № 35. Ст. 232.
2. Про оцінку впливу на довкілля : Закон України від 23.05.2017 № 2059-VIII // Відомості Верховної Ради України. 2017. № 29. Т. 315.
3. ДСТУ 4462.3.01:2006. Охорона природи. Поводження з відходами нафтовидобування та буріння. Загальні вимоги. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 18 с.
4. Ілляш О. І. Екологічні аспекти поведження з відходами нафтогазового комплексу // *Екологічні науки*. 2019. № 4. С. 92–98.
5. Степова О. В. Проблеми екологічної безпеки при поведженні з буровими відходами // *Екологічні науки*. – 2020. № 2. С. 81–87.
6. Кияшко В. Т. Екологічні ризики утворення та накопичення відходів нафтогазовидобування // *Вісник екологічної безпеки та збалансованого природокористування*. 2021. № 1. С. 54–61.
7. Гончарук В. В., Савченко О. В. Сучасні підходи до знешкодження небезпечних промислових відходів // *Екологічні науки*. 2018. № 3. С. 66–72.
8. Екологічна безпека нафтогазової галузі України : монографія / за ред. О. М. Адменка. Київ : Наукова думка, 2018. 312 с.
9. European Commission. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Treatment. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2018. 64 p.
10. European Commission. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2019. 1326 p.
11. United Nations Environment Programme (UNEP). Environmental management of oil and gas exploration and production waste. airobi : UNEP, 2019. 94 p.
12. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII // Відомості Верховної Ради України. 1991. № 41. Ст. 546.
13. Про надра : Кодекс України від 27.07.1994 № 132/94-ВР // Відомості Верховної Ради України. 1994. № 36. Ст. 340.
14. Водний кодекс України : Закон України від 06.06.1995 № 213/95-ВР // Відомості Верховної Ради України. 1995. № 24. Ст. 189.
15. Про затвердження Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 08.11.2017 № 820-р // Офіційний вісник України. 2017. № 92. Ст. 2808.
16. Про затвердження Національного плану управління відходами до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.02.2019 № 117-р // Офіційний вісник України. 2019. № 21. Ст. 728.
17. Методичні рекомендації щодо здійснення оцінки впливу на довкілля планованої діяльності у сфері поведження з відходами / Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Київ, 2021. 61 с.

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

Адаменко Ярослав Олегович (м. Івано-Франківськ) – д-р техн. наук, професор, кафедра екології, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;

Yaroslav Olehovych Adamenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Ecology, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas; e-mail:

yarad1964@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5665-7958>

Авраменко О. Ю (м. Київ) – Здобувачка II рівня вищої освіти Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Власенко Олег Васильович (м. Київ) – аспірант, науковий співробітник. Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна. SCOPUS: 59266912500

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9802-0322>

Волошин Юрій Дмитрович (м. Івано-Франківськ) - к.т.н., доцент. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

Voloshyn Yurii Dmytrovych, Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor. Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0582-1778>

Волошина Наталія Олексіївна (м. Київ) – доктор біологічних наук, професор, завідувач кафедри екології, Український державний університет імені Михайла Драгоманова,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9135-8539>

Гетьман Богдан Анатолійович (м. Київ) – аспірант ОНП «Екологія» Український державний університет імені Михайла Драгоманова,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4578-7513>

Гончаренко Ігор Олександрович - кандидат технічних наук, здобувач наукового ступеня доктора технічних наук, кафедра екології та

технологій захисту навколишнього середовища, Сумський державний університет, м. Суми, Україна. вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, Україна, 40007.

Honcharenko Ihor -PhD in Environmental Safety, E-mail: ihorhoncharenko@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5205-7506>

Грицуляк Галина Михайлівна (м. Івано-Франківськ) - д.с.-г. наук, професор. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

Hrytsulyak Galina Mykhailivna, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

<https://orcid.org/0000-0003-2463-4772>

Грицуляк Віталій Миколайович (м. Івано-Франківськ) - Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Hrytsuliak Vitalii Mykolayovych, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9257-2638>

Гурець Лариса Леонідівна (м. Суми) - д.т.н., професор кафедри екології та природоохоронних технологій Сумського державного університету, вул. Харківська, 116, м. Суми, 40000. e-mail:

l.gurets@ecolog.sumdu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2318-4223>

Дмитруха Тетяна Іллівна (м. Київ) - к.т.н., доцент, доцент кафедри екології Державний університет «Київський авіаційний інститут».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5195-9519>

Єрмаков Віктор Миколайович (м. Київ) - доктор технічних наук, доцент, Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Ermakov Viktor - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor. E-mail: evn54@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4548-235X>

Запыхляк Наталія Михайлівна (м. Івано-Франківськ) - доктор філософії, доцент, Івано-Франківський національний університет нафти і газу

Zarukhliak Nataliia, Ph.D., associate professor, Ivano-Frankivsk National University of Oil and Gas

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8994-7494>

Заріцький Віталій Богданович (м. Івано-Франківськ) - Івано-Франківський національний університет нафти і газу

Zaritskyi Vitaly Bogdanovych, Ivano-Frankivsk National University of Oil and Gas

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5748-5867>

Ізмоденова Тетяна Іванівна (м. Ромни) - завідувач лабораторії ТОВ «КРОП-ІНКРІС», 1-ий провулок Свободи, буд. 8, м. Ромни, 42000. e-mail: izmodenova.tati@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7896-1591>

Ілляш Оксана Едуардівна (м. Полтава) - к.т.н., доцент, завідувач кафедри екології Національного університету «Полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка»

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4710-3202>

Калин Тетяна Іванівна (м. Івано-Франківськ) - кандидат хім. наук, доцент, Івано-Франківський національний університет нафти і газу

Kalyn Tetiana Ivanivna, Ph.D. chemical Sciences, associate Professor, Ivano-Frankivsk National University of Oil and Gas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2343-3733>

Качала Софія Віталіївна (м. Івано-Франківськ) - канд.тех.наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Kachala Sofiia Vitaliivna, Ph.D. technical sciences, associate professor. Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. <https://orcid.org/0000-0003-1084-2968>

Кватернюк Сергій Михайлович (м. Вінниця) - професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, вул.

Хмельницьке шосе, 95, 21021, м. Вінниця, Вінницька область, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1296-8249>

Коваленко Даниїл (м. Київ) - здобувач вищої освіти III освітньо-наукового рівня за спеціальністю 183 Технології захисту навколишнього середовища Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0908-5181>

Коваленко Олександр Миколайович (м. Київ) - молодший науковий співробітник, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України, 03142, м. Київ, пр. Академіка Палладіна, 34а,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4798-7722>

Ковач Валерія Омелянівна (м. Київ) - доктор наук з державного управління, професор, провідний науковий співробітник, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1014-8979>

Кондакова Т.С. (м. Київ) - к.т.н., доцент кафедри екології Державний університет «Київський авіаційний інститут». ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3641-3339>

Коцюбинський Андрій Олегович (м. Івано-Франківськ) - канд. фіз.-мат. наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

Kotsyubynsky Andrew Olegovych, Ph.D. physics and mathematics Sciences, associate professor. Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

<https://orcid.org/0000-0003-1135-3568>

Кочелаб Євгенія Володимирівна (м. Київ) - кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України, 03142, м. Київ, пр. Академіка Палладіна, 34а,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8354-8795>

Кубрак Юрій Олександрович (м. Житомир) - кандидат технічних наук, доцент, Державний університет «Житомирська політехніка», 10005, Україна, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1122-7580>

Куценко Володимир Олександрович (м. Київ) - молодший науковий співробітник, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0577-2056>

Ланань О. В. (м. Київ) - Phd з біології, асистент кафедри екології Державний університет «Київський авіаційний інститут».
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6509-4456>

Латуша Дмитро Русланович (м. Вінниця) - аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, 21021, м. Вінниця, Вінницька область, Україна.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7808-1300>

Левченко Антон Юрійович (м. Житомир) - кандидат технічних наук, доцент, Державний університет «Житомирська політехніка», 10005, Україна, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4411-6465>

Линник Діана Олександрівна (м. Івано-Франківськ) - Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.
Lynnyk Diana Oleksandrivna, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.
<https://orcid.org/0009-0008-5907-6209>

Лопушняк Василь Іванович (м. Івано-Франківськ) - доктор с.-г. наук, професор. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.
Lopushniak Vasyl Ivanovych Doctor of Agricultural Sciences, Professor. Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9596-8169>

Максименко Максим Павлович (м. Вінниця) - аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, 21021, м. Вінниця, Вінницька область, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0955-4598>

МАЛЯР Олена (м. Вінниця) - кандидат психологічних наук, доцент, доцент кафедри педагогічних наук, початкової та корекційної освіти, КЗВО “Вінницька академія безперервної освіти”
malyar.o@academia.vn.ua.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5924-4120>

Марич Володимир Михайлович (м. Івано-Франківськ) - Івано-Франківський національний університет нафти і газу
Marych Volodymyr Mykhailovych. Ivano-Frankivsk National University of Oil and Gas
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7028-1639>

Маркіна Людмила Миколаївна (м. Київ) - д.т.н., керівник центру підготовки фахівців та наукових кадрів, Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3632-1685>
SCOPUS: 57190403872. Web of Science: AАН-4702-2020

Мартинюк Ірина Дмитрівна (м. Київ) - молодший науковий співробітник, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України, 03142, м. Київ, пр. Академіка Палладіна, 34а,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4654-7071>

Машков Олег Альбертович (м. Київ) - д.т.н., професор., старший науковий співробітник, Заслужений діяч науки і техніки України, Лауреат державної премії України в галузі науки і техніки. Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9227-4647>

Михальчук І.В (м. Київ) - Здобувачка II рівня вищої освіти Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Морозова Тетяна Василівна (м. Київ) - кандидат біологічних наук, доцент, Національний транспортний університет.
tetiana.morozova@ukr.net.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4836-1035>

Мудрак Олександр (м. Вінниця) - доктор сільськогосподарських наук, професор, завідувач кафедри екології, природничих та математичних наук, КЗВО «Вінницька академія безперервної освіти»
ov_mudrak@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1776-6120>

Мудрак Галина (м. Вінниця) - кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Вінницький національний аграрний університет. galina170971@ukr.net.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1319-9189>

Оводенко Тамара Сергіївна (м. Київ) - здобувачка вищої освіти III освітньо-наукового рівня за спеціальністю 183 Технології захисту навколишнього середовища, Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна

Павлюх Леся Іванівна (м. Київ) - д.т.н., доцент, професор кафедри екології Державного університету «Київський авіаційний інститут».
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7715-4601>

Петрук Василь Григорович (м. Вінниця), професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, 21021, м. Вінниця, Вінницька область, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0834-7338>

Пилипчук Євген Володимирович (м. Київ) - кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення

моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України, 03142, м. Київ, пр. Академіка Палладіна, 34а,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5467-2839>

Покшевніцька Тетяна Василівна (м. Київ) - здобувачка вищої освіти III освітньо-наукового рівня за спеціальністю 183 Технології захисту навколишнього середовища, кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища Національного транспортного університету, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1,
e-mail: officenttn@ukr.net;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6606-5073>

Попов Олександр Олександрович (м. Київ) - член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, директор, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України, 03142, м. Київ, пр. Академіка Палладіна, 34а,
sasha.popov1982@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5065-3822>

Присяжний Володимир Ілліч (м. Київ) - к.т.н. старший науковий співробітник, начальник Національного центру управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7825-9037>

Редька Іван Миколайович (м. Київ) - магістрант освітньо-професійної програми «Управління екоризиками та біозахист» зі спеціальності 101 Екологія, Український державний університет імені Михайла Драгоманова,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7573-4112>

Редько Андрій Ігорович (м. Івано-Франківськ) - аспірант, кафедра екології, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
Andrii Ihorovich Redko - PhD student, Department of Ecology, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas; e-mail: redko.geo@gmail.com;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0221-6908>

Рижов Гліб Олегович (м. Київ) - здобувач

вищої освіти III освітньо-наукового рівня за спеціальністю 183 Технології захисту навколишнього середовища Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7772-7398>

Сідельов Андрій Вікторович (м. Київ) - провідний інженер, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України, 03142, м. Київ, пр. Академіка Палладіна, 34а,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4210-3000>

Соколов Євген Володимирович (м. Київ) - кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник, ДУ «Інститут морської біології НАН України», лауреат щорічної премії Президента України для молодих учених (Указ Президента України №458/2017).

Sokolov Yevhen - PhD in Biology, Senior Research Fellow, Institute of Marine Biology, National Academy of Sciences of Ukraine. Laureate of the Annual Presidential Award of Ukraine for Young Scientists (Presidential Decree No. 458/2017). E-mail: sokolovev87@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0587-2719>

Степова Олена Валеріївна (м. Полтава) - доктор технічних наук, професор Проректор з наукової роботи. Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка".

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6346-5484>.

SCOPUS: 57193890417

Степовий Євген Борисович (м. Полтава) - здобувач вищої освіти III освітньо-наукового рівня за спеціальністю 183 Технології захисту навколишнього середовища, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4783-3929>

Толстой Ігор Анатолійович (м. Житомир) - старший викладач, Державний університет «Житомирська політехніка», 10005, Україна, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8879-8827>

Томаш Манєцькі (м. Лодзь) - д.х.н., професор, Лодзинський технологічний університет, Польща

Tomasz Maniecki – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Lodz University of Technology, Łódź, Republic of Poland.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7687-7250>

Фаррахов Олександр Володимирович (м. Київ) - доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України, 03142, м. Київ, пр. Академіка Палладіна, 34а, farrakhov@ukr.net.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4988-126X>

Фомічова Ольга Володимирівна (м. Івано-Франківськ) - канд. хім. наук, доцент. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

Fomichova Olga Volodymyrivna Ph.D., chemical sciences, associate professor

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5666-6113>

Фролов Валерій Федорович (м. Полтава) - доктор технічних наук, Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка".

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1675-8476>

Хапко Юрій Богданович (м. Київ) - кандидат юридичних наук, старший науковий співробітник, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України,

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-4644-8252>

Черняк Л.М. (м. Київ) - д.т.н., доцент, професор кафедри екології Державний університет «Київський авіаційний інститут».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6638-2750>

Чимбай Марина Володимирівна (м. Київ) - молодший науковий співробітник, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної

енергетики НАН України, 03142, м. Київ, пр. Академіка Палладіна, 34а,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6306-9265>

Чумаченко Сергій Миколайович (м. Київ) - доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу, Державний науково-дослідний інститут авіації, вул. Казарменна, 6В, м. Київ, Україна, 01135.
Chumachenko Serhii - Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Department of Information Technologies, Artificial Intelligence and Cyber Security, State Research Institute of Aviation, 6V Kazarmenna St., Kyiv, Ukraine, 01135. sergiy23.chumachenko@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8755-528>

Шиманський Володимир Ярославович -(м. Івано-Франківськ) - Студент PhD. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Shymanskyi Volodymyr Yaroslavovych, PhD student Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
<https://orcid.org/0000-0001-9962-8161>

Яковлев Євгеній Олександрович (м. Київ) - доктор технічних наук, головний науковий співробітник, Відділ досліджень навколишнього середовища, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна. Лауреат Державних премій СРСР (1991 р.) та України (2004 р.) в галузі науки і техніки.
Yevhenii Yakovliev - Doctor of Technical Sciences, Chief Research Scientist, Department of Environmental Studies, Institute of Telecommunications and Global Information Space, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6562-4015>

Яцишин Андрій Васильович (м. Київ) - доктор технічних наук, старший науковий співробітник, заступник директора з наукової роботи, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України, 03142, м. Київ, пр. Академіка Палладіна, 34а, iatsyshyn.andriy@gmail.com.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5508-7017>

Редакція журналу також вдячна авторам які прийняли участь у підготовці чергового номеру:

Машкову О.А., Петруку В.Г., Грицуляк Г.М., Ковач В.О., Покшевницькій Т.В.,
Коцюбинському А.О., Линник Д.О., Рижову Г. О., Яцишину А.В.

Ми щиро вдячні кожному з вас за внесок у нашу спільну справу

ВИМОГИ ДО ЗМІСТУ СТАТТІ

наукового журналу «ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ»

затверджено в Переліку наукових фахових видань рішенням Атестаційної колегії Міністерства освіти і науки України (категорія Б) (наказ №894 від 10. 10. 2022 р.)

Обсяг статті не менше 10-15-ти повних сторінок.

Структура статті має відповідати вимогам до наукових статей й складатися з таких частин:

- **УДК**;
- назва статті;
- прізвище автора (авторів), науковий ступінь, назва кафедри, посада, назва установи (організації) та міста;
- контакти автора (телефон, електронна адреса);
- анотація **1800** знаків без пробілів;
- ключові слова;
- загальна суть проблеми;
- аналіз останніх досліджень та публікацій;
- формулювання мети статті;
- виклад основного матеріалу;
- висновки;
- список використаної літератури

Статті публікуються українською, англійською, польською або російською мовами.

Автор зазначає рубрику, в якій публікується стаття, індекс за універсальною десятиковою класифікацією. В кінці статті наводить повну назву організації, де виконане дослідження, свою поштову і електронну адресу та номер телефону та ID SCOPUS/ORCID.

Фізичні величини наводяться в одиницях СІ.

Повна назва статті, анотація, ключові слова, а також написання прізвищ додаються українською, англійською, польською або російською мовами.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

1. Текстовий редактор – Word for Windows.
 2. Розмір сторінки: А4, 210х297.
 3. Поля: верхнє, лівє, праве – 1,5 см, нижнє – 1,7 см.
 4. Розмір шрифту «Times New Roman».
 - Для УДК – 10 кегель, великі літери, жирний шрифт.
 - Для заголовку статті 10 кегель, великі літери, жирний шрифт.
 - Для прізвища авторів – 10 кегель, жирний шрифт.
 - Для назви організації і міста – 10 кегель, нормальний шрифт.
 - Для анотації, ключових слів (3-4 рядки через 1 інтервал) 10 кегель, жирний шрифт.
 - Для заголовків розділів в тексті – 10 кегель, жирний шрифт.
 - Для основного тексту – 10 кегель, нормальний шрифт.
 - Для переліку використаних джерел (через 1 інтервал, слово Література) – 9 кегель, нормальний шрифт.
 5. Текст друкується через 1 інтервал і вирівнюється на ширину листа.
 6. Абзацний відступ від основного тексту – 0,5 см.
 7. УДК, прізвище (-а) автора (-ів), назва статті, рядки тексту анотації, номери джерел вирівнюються по лівому краю сторінки.
 8. Формули необхідно друкувати по центру, нумерація формул в кінці рядка.
 9. Розмір формул такий: основний . – 12; крупний індекс –7; дрібний індекс – 5; крупний символ – 18; дрібний символ – 12.
 10. Якщо рисунок один чи таблиця одна на статтю, то підпис здійснюється «Рисунок. Назва» чи відповідно «Таблиця», а продовження «продовження таблиці». Якщо декілька, то «Рис.1. Назва» чи відповідно «Таблиця 1», а продовження «продовження табл. 1».
 11. Між рядком з вказаним індексом УДК і рядком з прізвищем автора (-ів), рядком з прізвищем автора (-ів) та назвою, назвою та анотацією, анотацією та текстом, текстом та переліком джерел – віддаль повинна бути в 2 інтервали.
 12. Переноси в назві статті не допускаються.
 13. Нумерований перелік літератури подати в кінці статті одним абзацем, через крапку і оформлюється згідно ДСТУ 7,1:2006 (див. Бюлетень ВАК України №3, 2008). Нумерація джерел йде підряд і номер джерела виділяється жирним шрифтом. В переліку повинна вказуватись сучасна англомовна література з ретроспективою не більше 5 років.
- До статті подається рецензія від фахівця з науковим ступенем доктора наук і витяг з протоколу засідання кафедри про рекомендацію статті до друку.

Довідково (інтернет ресурси):

<https://vak.in.ua/>

<https://www.grafiati.com/uk/info/dstu-7-1-2006/examples/>

https://www.narodnaosvita.kiev.ua/?page_id=105

<http://www.ukrbook.net/biblzak.html>

http://www.library.ukma.edu.ua/fileadmin/documents/Bibliography/26_DCTU3582-97.pdf

«Про підвищення вимог до фахових видань, внесених до переліків ВАК України» від 15 січня 2003 № 7-05/1.

Онлайн-конвертер з української мови для транслітерації: <http://translit.kh.ua/?passport>

Для транслітерації латиницею україномовних текстів можна скористатися програмами на відповідних сайтах: <http://litopys.org.ua/links/intrans.htm>

ДСТУ 8302:2015 «Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання»
 ДСТУ 3582-97
 ДСТУ 7.1:2006

Екологічна безпека та технології захисту довкілля

Вул. Вознесенський узвіз 10а,
прим. 602. м. Київ, 04055

Тел: +380980625787
(контактна особа-Печений Володимир)

Corporation_office@ukr.net
<https://ecocorptzd.com.ua>
<https://facebook.com/SIAS.Techecosafety/>