

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ





НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ОБ'ЄДНАННЯ
«ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ»

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ

№5, 2023

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Виходить 2 рази на рік

Заснований у 2019 році

Редакційна колегія:

Головний редактор

Улицький Олег Андрійович
Доктор геологічних 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
Міхєєв 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

Гуленко Олена Борисівна

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 07.11.2023 р.

Адреса редакції:

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/>

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. Жилинська, 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.

ЗМІСТ

ВИСОЦЬКА Т. І., ПІЧКУР Т. В.	ЗАСТОСУВАННЯ СЕНСОРНОГО АНАЛІЗУ ЯК НОВІТНЬОЇ ТЕХНОЛОГІЇ У МОНИТОРИНГУ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ (ХІМІЧНИЙ КОНТЕКСТ)	3
МАРШАЛЛ Д. І.	ФІЛЬТРАЦІЙНІ РОЗРАХУНКИ ЗАХИСНИХ СПОРУД ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕОКУПОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ	9
УЛИЦЬКИЙ О. А., ЯНЕНКО А. М. ТИЩЕНКО Ю. Є.,	АНАЛІЗ ПОЛЬОВИХ ГІДРОХІМІЧНИХ, РАДІОЛОГІЧНИХ ТА ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОВЕРХНЕВИХ І ПІДЗЕМНИХ ВОД РАЙОНУ РОЗТАШУВАННЯ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА	15
ЛЯШЕНКО В. І., ДУДАР Т. В., СТУСЬ В. П., ШАПОВАЛОВ В. А.	ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНОГЕННО-ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ РОЗРОБКИ ПРИПОВЕРХНЕВИХ ЗАПАСІВ РУДНИХ РОДОВИЩ	25
ПРОСКУРНІН О. А., ГУЛЕНКО О. Б., ГРОМОВА І. Ю., ПЕЧЕНИЙ В. Л.	ОСНОВНІ МЕТОДОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ НОРМУВАННЯ СКИДАННЯ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН У ВОДНІ ОБ'ЄКТИ ІЗ ЗВОРОТНИМИ ВОДАМИ	37
ГОНЧАРЕНКО А. В.	ДО ПИТАННЯ ЗМЕНШЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗЕЛЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В БУДІВНИЦТВІ	44
ФРОЛОВ В. Ф., КУПІНСЬКИЙ І. В.	АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНОЇ СИТУАЦІЇ НАВКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТОРУ В УМОВАХ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ, ЩО СТВОРЮЄТЬСЯ КОСМІЧНОЮ ДІЯЛЬНІСТЮ	51
КОЖЕВНИКОВ С. В.	АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ВТОРИННОГО ПЕРЕРОБЛЕННЯ ВІКОННИХ ПВХ ПРОФІЛІВ. УКРАЇНСЬКИЙ ТА ЄВРОПЕЙСЬКИЙ ДОСВІД	59
KLIMENKOV O. M., HUTSUL K. R., IVANENKO I. M., SHUST V. I.	SOL-GEL SYNTHESIS OF ZnO PHOTOCATALYST FOR DICLOFENAC DEGRADATION	64

УДК: 504.064.3

ЗАСТОСУВАННЯ СЕНСОРНОГО АНАЛІЗУ ЯК НОВІТНЬОЇ ТЕХНОЛОГІЇ У МОНІТОРИНГУ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ (ХІМІЧНИЙ КОНТЕКСТ)

Висоцька Т. І., Пічкур Т. В.

Державний університет інфраструктури та технологій
вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071
pt1993@ukr.net

Покращення охорони навколишнього середовища, потребує дедалі ширшого використання у практиці високочутливих, селективних, швидких та економічних методів аналізу. Серед них велику увагу приділяють приладам нового покоління сенсорам. Процедура виявлення забруднювачів (тестування) розглядається як технологія контролю забруднень навколишнього середовища або антропогенного впливу на довкілля, що відбувається із застосуванням хімічних сенсорних систем. Отже хімічні сенсори є датчиками на певні забруднюючі речовини і використовуються для виявлення та аналізу таких речовин як у діагностичних цілях так і при проведенні моніторингу оточуючого середовища.

Характерною ознакою сенсорів є простота використання, висока швидкість аналізу, широкий діапазон речовин, які можна виявляти. Це дає можливість та необхідність їх застосування практично в усіх галузях діяльності людини та охорону довкілля. Порівняно з існуючими аналітичними та біофізичними методами досліджень, сенсори здатні забезпечити надійний та економічно дешевий аналіз різноманітних сполук.

Хімічні сенсори усе більше застосовуються для проведення хімічних аналізів, моніторингу навколишнього середовища, в медичній діагностиці та інших галузях промисловості.

Характерною ознакою хімічних сенсорів є тривала експозиція, температурна нечутливість і стійкість до помилок, тому такі сенсори можна використовувати як у режимі «off-line» в лабораторії або у виробничому приміщенні, так і в режимі «on-line» – «на лінії» всередині реактора або ферментера, що є важливим для безперервного біотехнологічного виробництва. Мета та-

кого моніторингу – покращення якості кінцевого продукту, збільшення його виходу, вивчення якості сировини, оптимізація затрат на енергоносії та підвищення рівня автоматизації виробництва.

Стаття присвячена сучасним тенденціям застосування досягнень хімічної науки у розв'язанні екологічних проблем. Також розглянуто походження терміну «сенсор» та історичний розвиток сенсорного аналізу. Наведено типи сенсорів, принцип дії та класифікація хімічних сенсорів. Проаналізовано можливості та перспективи, а також основні тенденції застосування сенсорних приладів.

Ключові слова: сенсор, детектор, екологічний моніторинг, хімічний аналіз, портативні сенсорні пристрої.

Application of sensory analysis as the newest technology in monitoring environmental issues (chemical context). Vysotska T., Pichkur T.

The improvement of environmental protection requires the ever-wider practical use of highly sensitive, selective, fast, and economic methods of analysis. Among them, great attention is paid to devices of the new generation-sensors. The process of detecting pollutants (testing) is considered to be a technology for controlling environmental pollution and anthropogenic impact on the environment. It is conducted with the use of chemical sensor systems. Chemical sensors are sensors for certain pollutants and are used to detect and analyze such substances both for diagnostic purposes and environmental monitoring.

Relevant features of sensors are ease of use, high speed of analysis, and a wide range of substances that can be detected. It is possible and necessary to use them in almost all areas of human activity, including environmental protection. Compared to other existing analytical and biophysical research methods, sensors can provide reliable and economically advantageous analysis of various compounds.

Chemical sensors are increasingly used for chemical analysis, environmental monitoring, medical diagnostics, and in other fields.

Prominent features of chemical sensors are long-term exposure, temperature insensitivity, and error tolerance, so such sensors can be used both offline in a laboratory or a production room and online inside a reactor or fermenter, which is important for continuous biotechnological production. The goals of such monitoring are to improve the quality of the final product, increase its yield, study the quality of raw materials, optimize energy costs, and increase the level of production automation.

The article is devoted to modern trends in the application of chemical science achievements in solving environmental problems. The origin of the term “sensor” and the historical development of sensory analysis are considered. The types of sensors as well as the principles of operation and classification of chemical sensors are described. The possibilities and prospects as well as the main trends in the use of sensor devices are analyzed.

Keywords: *sensor, detector, environmental monitoring, chemical analysis, portable sensor devices.*

Постановка проблеми

Глобальне забруднення навколишнього середовища і незадовільна екологічна ситуація в промислових регіонах обумовлюють необхідність постійного аналітичного контролю (моніторингу) за забрудненням повітря, якістю питної води і накопиченням токсичних хімічних речовин у ґрунті та рослинності. Тільки вивірені кількісні дані дають підставу для прийняття рішень про проведення необхідних заходів, покликаних унеможливити погіршення стану навколишнього середовища. У зв'язку з цим, в якості аналітичних пристроїв у системі екологічного моніторингу все частіше використовуються хімічні сенсори, які дають об'єктивну інформацію про вміст вуглекислого газу, озону, канцерогенних органіч-

них сполук, оксидів сірки і азоту, радіоактивних ізотопів та інших мікродомішок.

Актуальність проблеми

Сучасна екологічна ситуація, яка спричинена передусім, посиленням антропогенного пресу на біосферу, потребує розробки більш чіткої, об'єктивної та науково-обґрунтованої системи екологічного моніторингу. Для проведення екологічного дослідження необхідно швидко виявляти хімічну природу та склад речовин-забруднювачів, які можна визначати за допомогою сенсорів (датчиків), які є селективними для певного виду забруднюючої речовини.

Мета дослідження

Розкриття необхідності застосування сенсорного аналізу для проведення моніторингу навколишнього середовища.

Викладення основного матеріалу дослідження

Метою сучасної аналітичної хімії є зниження межі визначення, а також збільшення точності та надійності аналізу. Виникає необхідність у портативних, мініатюрних, інтелектуальних пристроях для моніторингу всього, що нам потрібно, включно людину (її самопочуття та хвороби). Успіхи у суміжних з хімією сферах, зокрема, фізики, біології, медицини, мікроелектроніки, матеріалознавства, привели до появи нового напрямку в аналітичній хімії – хімічної сенсоріки.

З арсеналу аналітичної хімії, що нараховує понад 150 методів, застосування хімічних сенсорів є найбільш ефективним і надійним серед методів, які охоплюють весь спектр забруднень навколишнього середовища (повітря, води, ґрунту, донних відкладень та рослинності) – від газів і парів до твердих часток і аерозолів.

Хімічний сенсор – це пристрій, який вибірково реагує на конкретний хімічний об'єкт (сполуку або групу сполук) шляхом хімічної реакції і який можна використати для якісного та кількісного визначення аналізу [1, 2]. Зазвичай, хімічні сенсори мають аналоги серед інструментальних методів аналізу. У той же час, на відміну від традиційних методів, хімічний сенсор надає інформацію про склад середовища, що аналізується, без додаткових операцій відбору проби і пробопідготовки (або з мінімальною пробопідготовкою),

методика «защита» в пристрій. Сенсори можуть працювати без втручання оператора, в режимах «*on-line*» та «*off-line*», вони поєднані з системами накопичення і обробки експериментальних даних. На сучасному етапі розроблені різноманітні хімічні і біохімічні сенсорні пристрої для контролю якості об'єктів довкілля, промислових і біологічних об'єктів, а також в галузі охорони здоров'я.

У літературі також зустрічається поняття «*детектор*». Детектор (лат. *detector* – той, що відкриває, виявляє) – це пристрій для визначення та перетворення енергії чи фізичного поля (випромінювання) в інший вид енергії, зручний для індикації та вимірювання. Вважається, що детектор реагує на присутність енергії чи фізичного поля, а хімічний сенсор дозволяє провести напівкількісне чи кількісне визначення дослідженого компонента. Детектори як і сенсори можна використовувати також у проточному автоматичному режимі. У науковій літературі доволі часто поняття «сенсор» і «детектор» підміняють одне іншим.

Поняття сенсор походить від англійського слова «*sense*» – відчуття, відчувати. Портативні пристрої використовували для встановлення хімічного складу середовища. Конструкція сенсору включала чутливий елемент та перетворювач. Перші хімічні сенсори відносять до кінця XIX – початку XX ст., коли з'явилися двоелектродна комірка Ф. Кольрауша (1885 р.), металевий електрод В. Нернста (1888 р.), скляний електрод М. Кремера і Ф. Габера (1906-1909 рр.). Такі прилади дозволяли проводити аналіз безпосередньо в одну стадію, оминаючи тривалу процедуру пробопідготовки.

З розвитком проточних методів аналізу у 50-х – 70-х роках XX ст. пов'язаний наступний етап розвитку хімічних сенсорів. У той час були розроблені газовий хроматограф, амінокислотний аналізатор (50-ті роки), а також іонний хроматограф (70-ті роки). З'явилася гостра необхідність в детекторах, для контролю речовини у потоці в автоматичному режимі. Однією з відмінних ознак сенсору і детектору є можливість роботи в автоматичному проточному режимі [1,2].

Розробки П. Бергвельда, який у 1972 р. поєднав іон-селективну чутливу мембрану із затвором напівпровідникового польового транзистора, вважають наступним етапом розвитку хімічних сенсорів. Ця робота призвела до розвитку іон-се-

лективних напівпровідникових польових транзисторів, а також сприяла широкому впровадженню планарної технології мікроелектроніки у виробництво дешевих мініатюрних сенсорів. Були створені набори сенсорів (*sensor arrays*). З'явилася можливість розмістити декілька самостійних сенсорів на одному напівпровідниковому кристалі і створити так звану лабораторію на чіпі (*lab-on-chip*), що має у своєму складі мікропроцесор для обробки одержаних результатів [3].

Поєднання аналізу з інтелектуальним програмним забезпеченням мало принципове значення для розвитку аналітичної хімії. По-перше, покращилася селективність визначення за рахунок інтелектуалізації технічних засобів. По-друге, з'явилася реальна перспектива створити пристрої, рівні за можливостями органам відчуттів людини: електронний ніс, електронний язик. Розвиток сучасної хемосенсоріки зробив реальним вирішення задачі оцінки узагальнених показників якості об'єктів довкілля, харчових продуктів, біологічних та фармацевтичних препаратів та інших важливих для людства об'єктів.

Історія розвитку хімічних сенсорів у XXI ст. тісно пов'язана з розвитком мікротехніки, нанохімії та нанотехнології. На сучасному етапі хімічні сенсори – це потужний засіб не лише аналітичної хімії, але і діагностики у широкому розумінні цього слова: у технології, медицині, екології та інших галузях національного господарства та у побуті.

Умовно всі сенсори можна розділити на три типи:

фізичні (їх частіше називають датчиками), що використовуються для визначення фізичних параметрів: відстані, температури, тиску, тощо;

хімічні – використовують для якісного та кількісного визначення хімічних речовин. Залежно від наявності та концентрації таких речовин у сенсорі виникає хімічний або фізичний відгук різної інтенсивності;

біосенсори – відрізняються від хімічних тим, що концентрація речовини, що визначається, вимірюється за допомогою матеріалу біологічної природи.

Зупинимось детальніше на хімічних сенсорах

Хімічний сенсор – це портативний пристрій для вибіркового і, часто безперервного, у режимі реального часу визначення концентрації речовини в одну стадію, оминаючи пробопідготовку.

Методика, так би мовити «защита» в пристрій і не змінюється. У будь-якому хімічному сенсори є такі основні компоненти: блок, де проходить хімічна реакція (хімічно-чутливий шар, або розпізнавальний елемент), блок-перетворювач (трансдюсер), що перетворює сигнал у фізичний та електронний блок обробки сигналу трансдюсера. Загальна будова хімічного сенсора зображена на рис. 1.

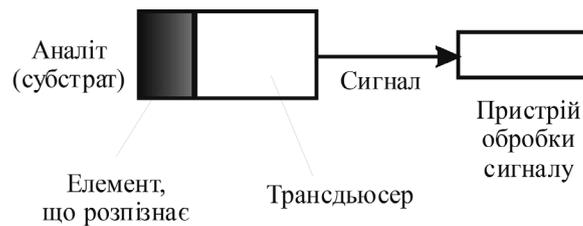


Рисунок 1 – Схема хімічного сенсора

При контакті аналіту з чутливим шаром відбувається хімічна реакція, що супроводжується зміною фізичного параметру (кольору, світіння, потенціалу, сили струму, теплоти, маси, тощо). Трансдюсер реагує на таку зміну і перетворює енергію, що виникає в ході реакції, в електричний чи світловий сигнал, величина якого вимірюється за допомогою світлочутливого або електронного пристрою. Цей сигнал і є аналітичним, оскільки він дає пряму інформацію про склад аналіту. Сучасні хімічні сенсори можуть функціонувати на принципах хімічних реакцій, за умови, якщо аналітичний сигнал виникає в результаті взаємодії аналіту з чутливим шаром, або ж на фізичних принципах, коли вимірюється фізичний параметр об'єкта, що аналізується (поглинання, або відбиття світла, маса, провідність, тощо).

Поєднання чутливого елемента і перетворювача в єдиний аналітичний пристрій не є формальною процедурою. Це принципово новий підхід до практики аналізу. Одна з суттєвих переваг сенсору порівняно з класичними аналітичними приладами – це можливість його використання за межами лабораторії в польових умовах без складного обладнання [4]. Зараз перевага надається мініатюрним сенсорам, що здатні працювати в портативному режимі з електронною обробкою аналітичного сигналу.

За типом перетворювача всі хімічні сенсори умовно можна розділити на такі групи:

1. **Електрохімічні.** Потенціометричні сенсори (іон-селективні електроди (ІСЕ); іон-селективні напівпровідникові польові транзистори (ІС-НПТ)); вольт- та амперметричні сенсори, включаючи тверді газові сенсори; кондуктометричні; напівпровідникові газові сенсори (механізм дії двох останніх не включає хімічну реакцію).

2. **Оптичні.** В оптичних сенсорах визначення може бути пов'язане з хімічною реакцією, або не

пов'язане з нею (ІЧ-газові сенсори). Залежно від типу сенсору вимірюється: поглинання, відбиття, люмінесценція чи розсіювання електромагнітного випромінювання. Діапазони довжин хвиль, що використовується в оптичних сенсорах, включають УФ, видиме та ІЧ випромінювання.

3. **Мас-чутливі (гавіметричні) сенсори.** Цей тип сенсорів базується на використанні оберненого п'єзоелектричного ефекту. Включає п'єзореzonансні сенсори та сенсори на основі поверхневих акустичних хвиль (ПАХ). Такі сенсори особливо корисні для визначення газів а також у біохімічних методах аналізу.

4. **Термочутливі сенсори.** Сенсори, що відносять до цієї групи, ще називають калориметричними. Їх дія базується на реєструванні теплового ефекту хімічної реакції за допомогою термісторів чи пеллісторів. На такому принципі базується дія деяких протипожежних сенсорів, а також ряду біосенсорів.

5. **Інші типи сенсорів, також і магнітні.**

Класифікація сенсорів за типом перетворювача наведена на рис. 2.

Серед хімічних та біохімічних сенсорів найбільш розповсюджені електрохімічні, а саме: потенціометричні та амперметричні. В таких сенсорах компонент, що визначається, реагує безпосередньо з чутливим шаром на електроді або в об'ємі розчину біля електроду. Неослабний інтерес також відмічається до оптичних сенсорів.

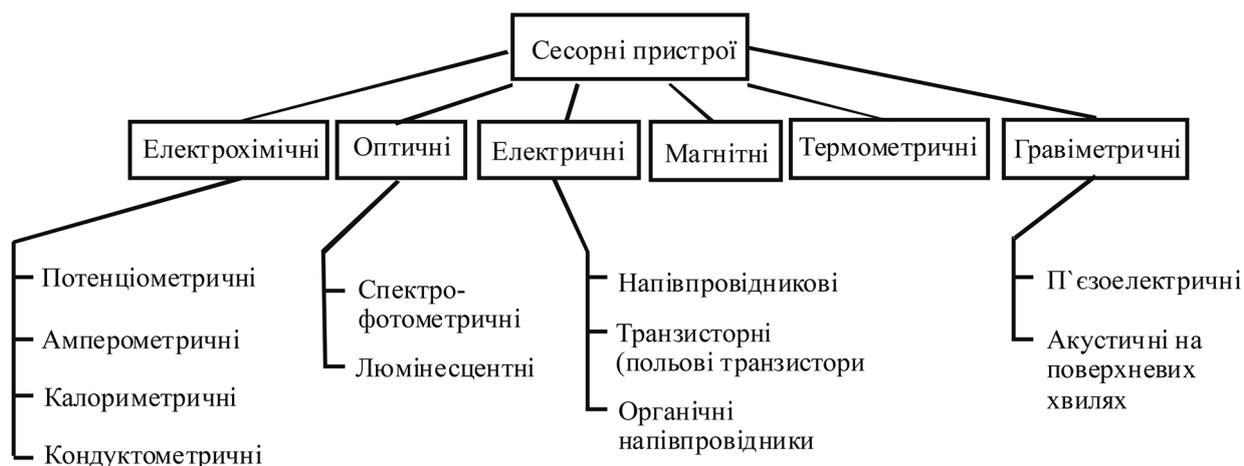


Рисунок 2 – Класифікація хімічних сенсорів

Характеристики ідеального сенсора

Виходячи з особливостей та відмінних рис хімічних сенсорів можна сформулювати вимоги, що висуваються до ідеального сенсора:

- компактність, мініатюрність;
- самокалібровка;
- швидкий відгук – час отримання аналітичного сигналу від кількох секунд до хвилин;
- автоматизація;
- регенерація та можливість багаторазового використання;
- низька вартість порівняно із стаціонарними приладами;
- можливість проведення аналізу на місці відбору проби;
- висока вибірковість до аналіту;
- достатня чутливість;
- можливість проведення напівкількісного і, навіть, кількісного визначення.

Успіхи у сфері хімічних і біохімічних сенсорів пов'язані з модернізацією чутливих елементів, їх комерційним виробництвом і більш широким використанням у повсякденному житті. Основна увага приділяється розвитку масового виробництва недорогих мініатюрних сенсорів для проведення аналізу поза межами лабораторії. У цьому сенсі перспективними є одноразові тест і сенсорні системи, на основі планарних чутливих елементів. Прикладом таких сенсорів можуть бути електрохімічні сенсори, що надруковані на принтері («*screen-printed*» (друковані) планарні електроди), де замість звичайних чорнил використовують вуглецеву пасту з відповідними добавками – модифікаторами. Для створення маке-

ту майбутнього електрода застосовують відповідні програми комп'ютерної графіки. Після цього електроди друкують на аркуші формату А4, це, так звані, «*screen-primeted*» електроди [4]. Вартість таких електродів невисока, оскільки вони виготовляються автоматизовано за планарною технологією у великих кількостях. Електрохімічні сенсори на основі таких одноразових електродів застосовуються в медичній діагностиці, контролі на підприємствах, аналізі об'єктів довкілля. Наприклад, в автомобільній промисловості щорічно випускається мільйони дешевих сенсорів на кисень, в медичній діагностиці – сенсори на глюкозу, холестерин у крові, сенсори на лактозу тощо. Цікавим напрямком розвитку сенсорів є об'єднання в один блок на полімерній чи керамічній підложці чутливого елементу сенсора, перетворювача і гнучкого екрану, на який виводиться результат вимірювання, так звана, друкована сенсорна система, «*all-printed biosensing system*». Інтелектуальні «*smart*» сенсори – інтегровані міні-прилади які розробляються шведською компанією для експрес визначення глюкози і лактози у біологічних рідинах [5]. Їх розмір не перевищує банківської кредитної картки, на одній підложці можуть міститися декілька сенсорних елементів на різні аналіти. Такі сенсорні системи одноразові та мають невисоку вартість.

З метою збільшення чутливості, скорочення часу формування сигналу аналітичного відгуку, зменшення об'єму проби і підвищення надійності, вимірювання часто проводять у проточному режимі, а також виготовляють мікросенсори, що об'єднані у набори мікрочіпів. Технологія виго-

товлення друкованих плат – мікро- чи нанолітографія, що застосовується у виробництві мікроелектронних схем, добре підходить для виробництва чіпів. У такий спосіб отримують чутливі елементи на основі напівпровідникових польових транзисторів, набори сенсорів, мікрочіпи, мікро- та нанофлюїдні системи. Для виготовлення таких планарних сенсорів використовують тонко- та товстоплівкову технології, а також інтегровані технології на поверхні керамічних, кремнієвих і полімерних пластин. Ще одним досягненням мікро- і нано-літографії є розробка дуже малих за розміром (не більше кількох мкм) сенсорів, наприклад, для застосування *in-vivo*. Мініатюрні сенсорні чіпи можна розмістити на кінчику голки чи катетера і ввести безпосередньо в організм людини. Вони потребують мінімальної кількості проби (до 100 мкл) та реагентів і мають швидкий час відгуку. Такі сенсори можна використовувати багаторазово.

Ще одним перспективним напрямком розвитку сенсорів є створення на одній підложці набору чутливих елементів – «*sensor array*». Такі системи дозволяють проводити визначення одразу декількох компонентів у невеликому (менше 1 мл) об'ємі проби, якщо кожний чутливий елемент має достатньо високу селективність по відношенню до певного аналіту. На основі таких наборів, що містять чутливі елементи невисокої вибіркової, розробляються системи для розпізнавання певної сполуки, або ряду сполук у складних об'єктах. Це, так звані «*електронний ніс*» та «*електронний язик*», системи з розпізнавання образів. Для використання наборів сенсорів необхідний досить складний математичний апарат обробки отриманих даних і попередня система калібровки (навчання) сенсорів.

Нещодавно розроблені компаніями портативні мініатюрні сенсорні пристрої на основі напівпровідникових польових транзисторів, планарних друкованих електродів, систем інтегрованої оптики, ПАХ-сенсорів можна приєднати до смартфона за допомогою спеціального модуля або, навіть, завдяки бездротовій системі передачі інформації. Після установки відповідної програми, смартфон починає відігравати роль блоку обробки інформації. У майбутньому мініатюрні сенсори, мікрофлюїдні системи і чіпи, друковані сенсорні системи складуть основу лабораторій на-чіпі (*lab-on-chip*), що дозволить значно скоротити час аналізу, витрати реагентів та обладнан-

ня, об'єм проби, що аналізується, максимально автоматизувати процес аналізу, а також досягти високої чутливості і селективності визначення із збереженням необхідної точності [6].

Протягом останніх років цікавість до розвитку сенсорів носить експонентний характер. Можна обґрунтовано прогнозувати, що в найближчому майбутньому людство стане свідками появи цілого ряду пристроїв мультисенсорного типу, інтегрованих в портативні прилади спеціального призначення. За своїми основними технічними параметрами такі пристрої не будуть поступатись приладам сучасної аналітики.

Висновки

Актуальність і практична значущість сенсорів обумовлена можливістю виявлення цілого ряду критично важливих для безпеки людей забруднювачів. Вирішення цієї екологічної проблеми має пріоритетне значення для електронної, хімічної та нафтогазової промисловостей (видобуток, транспортування та зберігання), військових технологій тощо.

ЛІТЕРАТУРА

1. Чвірук В. П. Електрохімічний моніторинг техногенних середовищ. / В. П. Чвірук, Ю. С. Герасименк, С. Г. Поляков. – Київ: Академперіодика, 2015. – 322 с.
2. Principles of Chemical and Biological Sensors, Ed. By D. Diamond, John Wiley and Sons Inc., New-York, 1998.
3. Коробова І. В. Хімічні сенсори як засоби екологічного контролю вмісту поліелектролітів у водних розчинах / І. В. Коробова, Г. С. Маслак, О. В. Мікуленк. // Topical issues of modern science, society and education. Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. SPC “Sci-conf.com.ua”. – 2021. – С. 98–102.
4. Набиванець Б. Й. Аналітична хімія природного середовища / Б. Й. Набиванець, В. В. Сухан, Л. В. Калабіна. – Київ: Либідь, 2018. – 301 с.
5. Полужин І. Фізико-хімічні методи аналізу стану об'єктів навколишнього середовища / І. Полужин. – Львів: Львівська політехніка, 2016. – 543 с.
6. Miguel Valcarcel Bartolomer M. Simonet, Soledad Car rdenas Beatriz Suarez, Present and future applications of carbon nanotubes to analytical science, Anal Bioanal Chem (2005) 382: pp.1783-1790.

УДК 624.131: 626.8:711

ФІЛЬТРАЦІЙНІ РОЗРАХУНКИ ЗАХИСНИХ СПОРУД ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕОКУПОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ

Маршалл Д. І.

Київський національний університет будівництва і архітектури
проспект Повітряних Сил, 31, м. Київ, 03037
ORCID ID 0000-0003-2984-3979

Процеси підтоплення та забруднення водних ресурсів на деокупованих територіях вимагають розроблення удосконаленої методики підходів до фільтраційних розрахунків проходження забрудненої води через пошкоджені захисні екрани та проведення аналізу міграції забруднюючих речовин водоносним горизонтом. В статті розглядається питання теоретичного обґрунтування фільтраційних втрат внаслідок пошкодження захисного екрану на етапі підпертої фільтрації. На прикладі магістрального каналу Інгулецької зрошувальної системи, який зазнав значного забруднення встановлено, що при розрахунках можна знехтувати умовним коефіцієнтом фільтрації бетонного облицювання внаслідок тривалої експлуатації та проходження військових дій, а фільтраційні втрати води розраховувати тими ж методами що і для каналу без облицювання. Первинне відновлення системи доцільно проводити місцевими будівельними матеріалами, що економічно значно вигідніше. При цьому влаштування облицювання вимагає теоретичного обґрунтування його товщини та конструкції. Цей вибір пропонується здійснювати шляхом визначення величини перепаду напору води при фільтрації через облицювання залежно від його конструкції.

В статті пропонується влаштування приканального дренажу вздовж магістрального каналу для можливості як запобігання підтоплення та засолення ґрунту так і можливості повторного використання дренажної води після її відповідної водопідготовки. Показано, що при розрахунку фільтраційних втрат води з магістрального каналу в трубчастий дренаж доцільно враховувати фільтраційний опір облицювання каналу. Наведено залежність втрат напору на облицювання, за якою можна виконати такий розрахунок та ви-

значити ефективність застосування протифільтраційного захисту з різними конструктивними особливостями.

Ключові слова: відновлення територій, фільтраційні втрати, кріплення меліоративного каналу, фільтраційний опір, дренаж каналу.

Filtration calculations of protective structures for restoring deoccupied territories. Marshall D.

The flooding and pollution of water resources on the de-occupied territories require developing and improving the methods of filtration calculations for the polluted water that passes through damaged protective screens, as well as the analysis of pollutant migration through the aquifer. The article deals with the issue of theoretical substantiation of filtration losses due to damage to the protective screen at the stage of supported filtration. Using as an example the main channel of the Inhulets irrigation system, which has undergone significant pollution, it was established that in the calculations, the conditional filtration coefficient of the concrete cladding based on the long-term operation and the impact of active hostilities can be ignored, and the filtration losses of water can be calculated using the same methods as for the canal without cladding. Primary restoration of the system can be carried out with local building materials, which is more economically beneficial. The arrangement of the cladding requires a theoretical justification of its thickness and construction. This choice is to be made by determining the magnitude of the water pressure drop when filtering through the cladding, depending on its design.

The article proposes arranging a channel

drainage along the main channel to prevent flooding and salinization of the soil, as well as reuse the drainage water after appropriate water treatment. It is shown that when calculating the filtration losses of water from the main channel to the tubular drainage, it is advisable to take into account the filtration resistance of the channel cladding. The dependence of pressure loss on the cladding is presented, according to which such a calculation can be performed and the effectiveness of the anti-filtration protection with various design features can be determined.

Keywords: *restoration of territories, filtration losses, melioration channel, filtration resistance, channel drainage.*

Вступ

Процеси підтоплення та забруднення водних ресурсів внаслідок військових дій потребують оцінки та прогнозу подальшого розвитку подій на деокупованих територіях. Військові дії та руйнування дамби Каховської ГЕС завдали значної шкоди меліоративним системам південного регіону країни. Пошкодження гідротехнічних споруд на цих територіях потребує розроблення вдосконаленої методики підходів до фільтраційних розрахунків споживання забруднених вод на меліоративних системах з метою їх відновлення. Однією з таких зрошувальних систем, яка потребує першочергового відновлення в межах існуючих міжгосподарських і внутрішньогосподарських каналів та наявного резерву потужностей для забору та подачі водних ресурсів на зрошення, є Інгулецька зрошувальна система. Пошкодження обшивки каналу внаслідок тривалої експлуатації ускладнилося пошкодженнями, спричиненими військовими діями на території [1, 2]. Середнє значення коефіцієнта фільтрації пошкодженого облицювання можна прийняти рівним $1 \cdot 10^{-2}$ м/добу [3]. Магістральний канал системи отримав значну частину забруднення після його затоплення внаслідок руйнування дамби Каховської ГЕС. Після відходу води виникла необхідність визначення зон впливу каналу за умови відновлення підпертої схеми фільтрації. А враховуючи дефіцит водних ресурсів для потреб водокористувачів даного регіону, перехоплення дренажного стоку приканальним дренажем та його повторне використання є доцільним та економічно обґрунтова-

ним. Крім того, схема використання приканального дренажу запобігає забрудненню і виснаженню підземних вод. Інженерно-практичне завдання облаштування водовідведення фільтраційних вод з урахуванням місцевих умов вирішується завдяки використанню удосконаленої існуючої теоретичної бази фільтраційних розрахунків і методів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням теоретичних розрахунків фільтраційних втрат та апробації цих методів у польових умовах присвячено низку праць вітчизняних та зарубіжних авторів [4-12]. У роботах цих авторів використовувалися схеми як для умов підпертої фільтрації, так і для ненасиченої зони. Так, в роботі [5] розрахунки фільтраційного притоку в дренаж розглядалися для двошарового водоносного горизонту, а русло каналу розглядалося без облицювання. У роботі [7] автори розглянули вплив фільтраційного опору облицювання на втрати води з меліоративного каналу в умовах підпертої фільтрації.

Враховуючи економічну доцільність відновлення зрошувальних систем з використанням місцевих матеріалів у сучасних умовах, був проведений аналіз ефективності використання ґрунтового облицювання на пошкоджених ділянках магістрального Інгулецького каналу. Для протифільтраційного екрану на пошкоджених ділянках русла було пропонувано використовувати третій шар лесоподібних порід, що представлений темно-бурими та червонувато-бурими важкими суглинками [13]. Ефективність каналу при різних значеннях фільтраційного опору кріплення визначали за співвідношенням коефіцієнтів фільтрації кріплення та ґрунтової основи, коефіцієнт водопровідності при цьому приймався $3,5 \text{ м}^2/\text{добу}$, інтенсивність випаровування 400 мм/рік , значення критичної глибини залягання ґрунтових вод $3,5 \text{ м}$, середній коефіцієнт фільтрації для ґрунту траси русла $0,25 \text{ м/добу}$ [14].

Про ефективність використання різних видів сучасного облицювання можна дізнатися з даних Керівництва до ДБН В.2.4.-1-99 «Меліоративні системи та споруди» [15]. Як показали роботи окремих авторів, методи математичного моделювання можуть бути використані для створення постійних моделей на розглянутих об'єктах, як найбільш ефективний підхід для дослідження фільтрації та подальшого управління

на зрошуваних землях [4, 6, 16-18]. Зазвичай, це концептуальні моделі фільтрації певної ділянки фільтрації, що відображає найважливіші елементи схематизації об'єкту. Аналіз геолого-гідрогеологічних умов території Півдня України дав змогу розглядати гідродинамічну модель як тришарову з витокком, що складається з першого водоносного горизонту підземних вод у четвертинних відкладах з вільною поверхнею, окремої напівпроникної шар потужністю 5-10 метрів, а основний водоносний горизонт – у неогенових відкладах, які використовувалися для централізованого водопостачання населення цього регіону [6, 18]. В роботі [8] отримано прогнозні розрахунки впливу фільтрації з каналу без влаштування приканального дренажу на 5, 10 та 25 років. В результаті розрахунків для першої ділянки маршруту довжиною 20 км отримано такі дані: вплив фільтрації пошириться по відстані через 5, 10 та 25 років відповідно на 488, 631 і 856 м; на другій ділянці довжиною 13,35 км відповідно на 407, 531 і 736 м, на третій ділянці довжиною 20 км відповідно на 651, 822 і 1059 м. Загалом, вплив фільтраційних втрат з магістрального каналу з кожного боку поширюватиметься вздовж траси смугою, ширина якої змінюватиметься від 407 до 651 м через 5 років і від 736 до 1059 м через 25 років.

В умовах зростаючого дефіциту водних ресурсів у цьому регіоні дренажний стік із зрошуваних земель може розглядатися як джерело додаткового водопостачання для зрошення чи інших потреб господарської діяльності після відповідної очистки води. Аналіз існуючих рішень та розрахунків сучасних методів фільтрації дав можливість здійснити теоретичне обґрунтування сучасних підходів до розрахунку фільтраційних втрат на відкритому магістральному каналі з перехопленням дренажних вод приканальним дренажем з метою їх подальшого раціонального використання [21].

Мета дослідження

Метою цих досліджень є обґрунтування інженерних розрахунків для оцінки та прогнозування фільтраційних втрат з магістрального каналу з приканальним дренажем. Результати досліджень будуть корисними при прийнятті управлінських рішень щодо охорони водних об'єктів від забруднення та підтоплення.

Результати досліджень

В роботі [13] описані умови існування розрахункової схеми. При односторонньому надходженні в трубчастий дренаж з боку магістрального каналу витрата води розраховується за формулою:

$$\frac{q_{g1}}{K} = \frac{h_1^2 - h_g^2}{2(L + Fclad + Fq - 0,5r)} + \frac{h_g H}{L + Fq}, \quad (1)$$

де L – відстань від узрізу води в каналі до осі рубчастого дренажу, м; h_1 – напір води в магістральному каналі над водоупором, м; h_g – висота закладання дренажу над водоупором, м; r – робочий радіус дрени, м; $Fclad$ – фільтраційний опір на недосконалість водоносного горизонту, значення якого в залежності від типу ґрунту і товщини його шару рекомендується приймати за методикою, викладеною в роботі [5], м; $H = h_1 - h_g$; Fq – фільтраційний опір недосконалісті трубчастого дренажу, визначений за формулами, рекомендованими в роботі [5], м.

Рівні ґрунтових вод на приканальній території можна розраховуються за формулою:

$$y = h_g \left[+ \frac{1 - \alpha_1}{1 + \alpha_1} (h_1 - h_g) + \frac{(1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_y}) q_2 x_0}{(1 + \alpha_1) T_2} \right], \quad (2)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + \frac{h_g A}{L_0}}, \quad \alpha_y = \frac{1}{1 + \frac{h_g A}{x_0}}, \quad (3)$$

$$A = 1,47 \frac{1}{\sin \frac{\pi d g}{2 h g}},$$

$$T_1 = k m_1, \quad T_2 = k m_2,$$

$$m_1 = \frac{h_g + h_1}{2}, \quad m_2 = \frac{y + h_g}{2} \approx h_g, \quad (4)$$

Про ефективність даного підходу свідчить розрахунок параметрів фільтрації для типового поперечного перерізу магістрального Інгулецького каналу з перехоплюючим трубчастим дренажем та обшивкою з місцевих каолінів на погонний метр каналу. Для екрану з місцевих матеріалів з коефіцієнтом фільтрації $1 \cdot 10^{-6}$ м/добу величина фільтраційного опору при товщині 20 см становить 40,7 м. При цьому фільтраційний потік на погонний метр з основного русла становить

0,347 м²/добу. Ефективність застосування ґрунтового покриття на пошкоджених ділянках можна також визначити за графіком (рис. 1).

Результати обговорення
Використання місцевих матеріалів (червоного каоліну) при реконструкції меліоративних

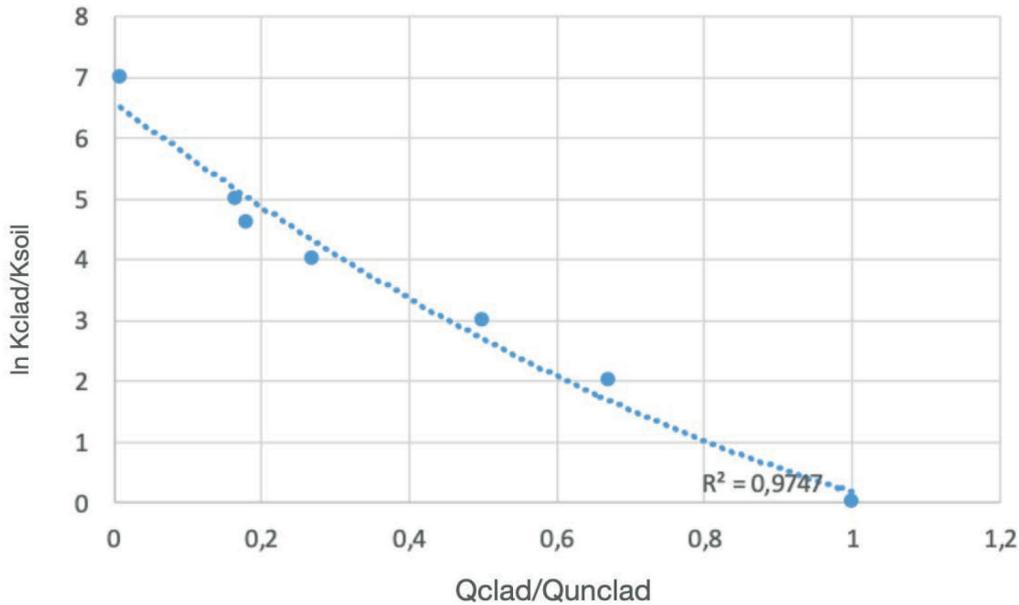


Рисунок 1 – Ефективність застосування ґрунтового облицювання на пошкоджених ділянках Інгулецького магістрального каналу

На рис. 1, де величина Q_{clad}/Q_{unclad} – величина співвідношення фільтраційних втрат з каналу з облицюванням та без нього, з відповідними коефіцієнтами фільтрації K_{clad}/K_{unclad} .

Але слід зазначити, що ефективність використання екранів з місцевих глинистих матеріалів вивчалася при товщині 20 см. При різній товщині і конструкції обшивки фільтраційний опір конструкції при фільтраційних втратах з магістрального каналу можна визначити за величиною перепаду гідравлічного напору під екраном (5) або наближеним методом, описаним в роботі [7]. Втрати напору при проходженні через захисний екран залежно від умовного коефіцієнта фільтрації можна визначити за формулою:

$$h_{clad}(0, t) = -H_k + (H_k + \delta) \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2}{\mu_n^2} \exp \left(-\mu_n^2 \frac{\alpha t}{\delta^2} \right) \right] \quad (5)$$

де μ_n є коренем трансцендентного рівняння, що дорівнює $\mu_n = (2n-1)\pi/2$, $\alpha = \frac{K_{clad}\delta}{n_{clad}}$, n_{clad} – пористість захисного екрану, t – час промочування, H_k – глибина води в каналі.

систем є економічно доцільним і виправданим. Враховуючи сорбційні властивості цих матеріалів, у подальшому доцільно перевірити утримання забруднень облицюванням такого типу. Влаштування дренажу каналу по трасі магістральних каналів дозволить мінімізувати фільтраційні втрати та повертати частину води на різні господарські потреби після відповідної водопідготовки [19-22]. Розрахунки фільтраційних втрат води з магістрального русла з урахуванням фільтраційного опору кріплення каналу свідчать про зменшення зони впливу русла за рахунок падіння тиску на кріплення, який пропонується розраховувати за допомогою формули (5).

Висновки

Проведено аналіз теоретичних підходів щодо визначення витрат на фільтрацію з меліоративних каналів внаслідок наявних пошкоджень під час тривалої експлуатації та бойових дій на об'єкті. На прикладі окремих пошкоджених ділянок основного русла Інгулецької зрошувальної системи доведено, що використання природних місцевих матеріалів значно зменшить фільтраційні втра-

ти (до 0,347 м²/добу з погонного метра проти 1,763 м²/добу з погонного метра).

Необхідні подальші дослідження щодо оцінки ступеня забруднення водних ресурсів за рахунок підземного живлення, що потребують розгляду формування гідрохімічних процесів на цій території.

Дані дослідження можуть бути застосовані при розробленні проектів ефективного інженерного захисту від підтоплення зрошувальних систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ворошнов С. М. Сучасний технічний стан каналів Інгулецької зрошувальної системи та нові конструкції облицювань із використанням геосинтетичних матеріалів. / С. М. Ворошнов, Я. В. Шевчук, О. Ю. Юзюк. // *Механізація та електрифікація сільського господарства*. – 2018. – №8. – С. 232–240.
2. Волошкіна О. Теоретичне обґрунтування визначення параметрів забруднення підземних вод від зруйнованих меліоративних споруд, водосховищ та затоплених полігонів. Екотехногенні наслідки руйнування гідротехнічних споруд. Прогнози та перспективи відновлення. [Електронний ресурс] / О. Волошкіна, Д. Маршалл, Я. Шевчук // *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://drive.google.com/file/d/16Lr4eXDwnO0go8maanXvEn0mgyV2RlkX/view2..>
3. Маршалл Д. І. Оцінка визначення параметрів забруднення підземних вод від зруйнованих меліоративних споруд, хвостосховищ та затоплених полігонів. / Д. І. Маршалл, Ю. В. Шевчук. // *Екологічна безпека та природокористування*. – 2023. – №48. – С. 21–31.
4. Телима С. В. Щодо використання мінералізованих вод для зрошення в умовах підтоплення. / С. В. Телима. // *Містобудування та планування території*. – 2014. – №52. – С. 411–417.
5. Олейник А. Я. Геогидродинамика дренажа / А. Я. Олейник. – Киев: Наукова думка, 1984. – 284 с.
6. Моделювання і розрахунки внутрішньодренної гідравліки при роботі підземних водозаборів і дренажів / С. В.Телима, Є. О. Олійник, С. М. Курганська, О. В. Харламова. // *Екологічна безпека та природокористування*. – 2015. – №7. – С. 33–43.
7. Березницька Ю. О. Моделювання підтоплення із споруд з екранами для оцінки ефективності природоохоронних заходів / Ю. О. Березницька, О. С. Волошкіна. // *Екологічна безпека і природокористування*. – 2011. – №7. – С. 168–175.
8. Modeling of Pollution Spreading Problems on Irrigated Lands/S. Telyma, O. Voloshkina, O. Zhukova, R. Sipakov. // *Conference: World Environmental and Water Resources Congress*. – 2023. – С. 493–508. DOI: 10.1061/9780784484852.048
9. Study of seepage losses from irrigation canals using radioactive tracer technique [Електронний ресурс] / [A. Manzoor, A. Jamil, A. Tari та ін.] // *PINSTECH-170 Revision*. – 2004. – Режим доступу до ресурсу: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/039/38039641.pdf.
10. Elsayed E. Numerical Canal Seepage Loss Evaluation for Different Lining and Crack Techniques in Arid and Semi-Arid Regions: A Case Study of the River Nile, Egypt. [Електронний ресурс] / E. Elsayed, M. Zelenakova, I. Abd-Elaty // *Water*. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/21/3135>. <https://doi.org/10.3390/w13213135>
11. El-Molla D. Seepage losses from trapezoidal earth canals with an impervious layer under the bed/ El-Molla D., El-Molla M. / *Water Practice and Technology*. – 2021. – №16 (2). – С. 530–540. <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.010>.
12. Investigation of irrigation canal seepage losses through use of four different methods in Hetao irrigation district, China [Електронний ресурс] / Q.Zhang, J. Chai, Z. Xu, Y. Qin // *Journal of Hydrologic Engineering*. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0001470>. doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001470](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001470).
13. Marshall D. Ways of rational use of water resources in the conditions of post-war reclamation systems in the south of Ukraine / Marshall D., Zhukova O./ *Journal Environmental Problems*. – 2023. – №8 (4). – С. 208-209. DOI: <https://doi.org/10.23939/ep2023.04.205>

14. Маршалл Д. І. Деякі питання відновлення зрошувальних систем півдня України. / Д. І. Маршалл. // Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми екології та енергозбереження», вересень 21-22. Миколаїв. – 2023. – С. 79–80.
15. ДБН В.2.4-1-99 Меліоративні системи та споруди. Затверджено Наказом Держбуду України від 25.06.1999, №153.
16. Swamee P. K. Design of Minimum Seepage Loss Canal Sections, J. Irrig. Drain. / Swamee P. K., Mishra G. C., Chahar B. R./ – 2000. – № 126 (1). – P.28-32.
17. Ghazaw Y. M. Design Charts of Optimal Canal Section for Minimum Water Loss, J. of Engineering and Computer Sciences. – 2010. – №3(2). – P. 73-95.
18. Телима С. В. Щодо використання мінералізованих вод для зрошення в умовах підтоплення. / С. В. Телима. // Містобудування та планування території. – 2014. – №52. – С. 411–417.
19. Козленко Є. В. Дренажний стік як додаткове джерело водних ресурсів на Інгулецькій зрошувальній системі. / Є. В. Козленко, О. В. Морозов, В. В. Морозов. // Аграрні інновації. – 2021. – №5. – С. 52–59. DOI: <https://doi.org/10.32848/agra.innov.2021.5.9>
20. Морозов О. В. Оцінка якості зрошувальної води в системі еколого-оздоровчого моніторингу / О. В. Морозов. // Водні біоресурси та аквакультура.. – 2020. – №2. – С. 192–209.
21. Удосконалення технологій знезалізнення та підземного водопостачання в автоматизованих системах сільськогосподарського водопостачання / [П. Д. Хоружий, В. Д. Левицька, С. Р. Стасюк та ін.]. // Меліорація та водне господарство. – 2020. – №111. – С. 186–194. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202001-227>.
22. Нові технологічні рішення систем водопостачання в сучасних умовах / Є. М.Мацелюк, Д. В. Чарній, В. Д. Левицька, С. В. Марисик. // Меліорація та водне господарство. – 2021. – №2. – С. 201–209. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-303>.
-
-

УДК 556.5

АНАЛІЗ ПОЛЬОВИХ ГІДРОХІМІЧНИХ, РАДІОЛОГІЧНИХ ТА ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОВЕРХНЕВИХ І ПІДЗЕМНИХ ВОД РАЙОНУ РОЗТАШУВАННЯ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

Улицький О. А.¹
olegulytsky@gmail.com.

Яненко А. М.¹

¹Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, м. Київ, 03035

Тищенко Ю. Є.²

²Державна установа «Інститут геохімії навколишнього
середовища НАН України»,
пр-т Академіка Палладіна, 34а, м. Київ, 03142

Проведено аналіз польових гідрохімічних, радіологічних та лабораторних досліджень поверхневих та підземних вод в районі Каховського водосховища. В роботі використувався комплекс науково-практичних методів, які базуються на аналітичних розрахунках даних польових робіт, проводився аналіз науково-технічної літератури та інших інформаційних джерел. Було досліджено геоінформаційні методи відображення просторової інформації різної спрямованості та виконаний аналіз сучасного рельєфу. Також були використанні підходи системного аналізу умов і особливостей формування екологічної ситуації на території Каховського водосховища та пошуку ефективних заходів для покращення та відновлення екологічного стану, спрямованих на екологічну збалансованість постраждалих територій.

Програма досліджень включала вирішення таких питань: підготовчі роботи; польові дослідження; лабораторні вимірювання проб ґрунту; радіологічні та дозиметричні вимірювання; гідрохімічні вимірювання; розрахування питомої активності природних радіонуклідів; їх узагальнення та аналіз, і насамкінець, відповідну підготовку звітних матеріалів.

Повномасштабна війна і, як наслідок еколо-

гічна катастрофа, що пов'язана з руйнуванням Каховського гідровузла, негативно впливають на подальший розвиток соціально-економічного становища України. З метою подолання незворотних змін, викликаних руйнуванням Каховського гідровузла, набуває актуальності рішення Уряду щодо можливої відбудови Каховської ГЕС з урахуванням всебічного аналізу наслідків та подальших можливостей залучення наукової спільноти для вирішення проблем подальшого розвитку регіону.

Ключові слова: *Каховське водосховище, екологічна ситуація, гідробіологія, дозиметричні вимірювання, гідрохімічні вимірювання, радіологія.*

Hydrochemical and radiological analysis of the surface waters and underground waters in the area of the kakhovsky reservoir. *Ulytskyi O., Yanenko A., Tyshchenko Yu.*

Hydrochemical and radiological testing of both the surface and underground waters in the area of the Kakhovsky Reservoir was conducted. A number of scientific and practical methods were used based on analytical calculations of the fieldwork data. An analysis of scientific literature and other information sources was conducted.

Geo-informational methods of displaying spatial information and modern terrain analysis methods were studied. An analysis of the environmental conditions of the Kakhovsky Reservoir was carried out. Effective ways to improve and restore the environmental balance of the affected territories were studied.

The research included: preparatory work; field research; laboratory analysis of soil samples; radiological and dosimetric analysis; hydrochemical analysis; calculating the activity of natural radionuclides; summarising and reporting the findings.

In order to properly manage the damages to the environment caused by the destruction of the Kakhovsky hydroelectric plant and find new ways to boost the development of the region, there needs to be further involvement from the scientific community regarding the possible reconstruction of the Kakhovsky hydroelectric plant.

Keywords: *Kakhovsky Reservoir, environmental situation, hydrobiology, dosimetric measurements, hydrochemical measurements, radiology.*

Постановка проблеми та актуальність

Визначення екологічної доцільності відбудови Каховського гідровузла та його наповнення, в тому числі обґрунтування екологічних, технічних, організаційних та інших заходів з метою відновлення екологічного стану Нижнього Дніпра та покращення екосистеми. Надання пропозицій

щодо формування водної екосистеми за умови запобігання біологічним загрозам та підтримання відповідної якості води, відтворення рибництва, збереження рідкісних видів тваринного та рослинного світу.

Площа Каховського водосховища складала понад 2 тис. км². Наразі внаслідок надзвичайної ситуації більша частина цієї площі осушена, поверхня вкрита мулом, а також суттєво забруднена речовинами, які протягом тривалого періоду існування осідали на дно водосховища. Фактично екосистема водосховища та її біота, від найпростіших організмів до більш розвинених (риб) значно постраждала. Натепер доцільне проведення натурних геохімічних та радіологічних досліджень з відбором проб ґрунтів. Натурні інструментальні вимірювання та відбір проб виконані в пунктах опробування (ПО).

Аналіз існуючого стану

Проведення натурних геохімічних та радіологічних досліджень з відбором проб ґрунтів були виконані Державною установою «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», восени 2023 року.

Об'єктом досліджень були процеси і явища, які відбулись під час руйнування дамби Каховського водосховища і які призвели до виведення з експлуатації насосних станцій водозаборів, що унеможлиблює акумуляцію водних ресурсів та регулювання стоку на територіях Дніпропетровської, Запорізької, Кіровоградської та Микола-



Рисунок 1 – Територія досліджень

ївської областей, а також показники якості елементів довкілля що дозволило оцінити вплив на екологічний стан Нижнього Дніпра.

Натурні інструментальні вимірювання та відбори проб виконані фахівцями інституту спільно з науковцями Держаної екологічної академії післядипломної освіти та управління в пунктах опробування (ПО) які розташовані на землях, що донедавна були дном Каховського водосховища та на землях колишнього прибережного суходолу [21]. Польові роботи були проведені фактично на територіях поблизу та в населених пунктах: с. Мар'янське, Зеленодольської міської територіальної громади; с. Грушівка, однойменної селищної територіальної громади (СТГ), обидва Криворізького району; сіл Набережне та Покровське, обидва Покровської СТГ Нікопольського району Дніпропетровської області; а також – с. Нововоронцовка, однойменної СТГ у Бериславському районі Херсонської області (рис. 1).

Всього дослідження проведені у 23 ПО. Відібрано 26 проб ґрунтів (з них 15 донних відкладів, зокрема, на трьох ПО – по дві шпурові проби з різних глибин) та 11 проб води (з них 10 – підземні та ґрунтові води з приватних свердловин та колодязів).

Програма та методи досліджень

Програма досліджень включала: підготовчі роботи; польові та лабораторні дослідження; їх узагальнення; аналіз та підготовку звітних матеріалів.

Підготовчі роботи складаються з плану робіт з визначенням пунктів опробування та маршрутів; підготовкою та тестування апаратури досліджень; інструктажем персоналу тощо.

Польові роботи відбувались з визначенням ідентифікація пунктів опробування з геопозиційною супутниковою прив'язкою на місцевості; проводилися радіаційні вимірювання; були зроблені експрес-аналізи з фіксацією результатів; відбиралися проби води, ґрунтів та донних відкладів.

Польові радіометричні дослідження включають вимірювання:

- потужності еквівалентної дози гамма-випромінювання на висоті 1 м і 0,1 м від поверхні ґрунту та у шпурах глибиною до 1,0 м;
- альфа-випромінювання радону-222; щільності потоку радону з поверхні ґрунту.

Польові гідрохімічні вимірювання включають експрес-тести:

- температури;
- рН;
- абсолютного та відносного вмісту розчинного кисню;
- електропровідності, жорсткості та солоності.

Лабораторні вимірювання проб ґрунту включали:

- вимірювання інтегральної гамма-активності;
- гамма-спектрометрію;
- альфа-, бета-радіометрію;
- атомно-емісійний спектральний аналіз валового вмісту мікроелементів;
- атомно-абсорбційний спектрофотометричний аналіз вмісту мобільних форм металів у витяжках проб з амонійно-ацетатним буфером.

Апаратурне забезпечення натурних досліджень складається з мобільної дозиметричної та радіометричної апаратури для польових експрес-аналізаторів радіоактивності середовища: вимірювальний комплекс радіометр радону «Альфарад+» та дозиметр гамма-випромінювання пошуковий «Ритм-5 ВД». Для хімічних аналізів води було використано портативний прилад для експрес-аналізів проб: Оксиметр AZ –8603/рН-метр/кондуктометр/TDS-метр/солемір.

Щільність потоку радону (ЩПР) вимірювалась на поверхні ґрунту згідно методичних рекомендацій з експлуатації вимірювального комплексу «Альфарад+». Цей прилад дозволяє проводити вимірювання радіоактивних еманцій хімічно інертного газу радону – продукту альфа-розпаду дочірнього радіоактивного елементу урану (радію) як об'ємної активності радону у повітрі, воді та ґрунті, так і щільність потоку радону з поверхні ґрунту за допомогою спеціальних пробовідбірних пристроїв як у закритих приміщеннях так і на відкритому повітрі.

Еманация радію – радон (Rn) має масове число 222 і атомний номер 86. Він в 110 разів важче водню, в 55 разів – гелію, в 7,5 разів важче за повітря. Радон – це газ без кольору. Він краще за інші інертних газів розчиняється у воді (в 100 об'ємах води розчиняється до 50 об'ємів радону).

Радон вивільняється (еманує) із земної кори усюди. Він накопичується в порах та тріщинах гірських порід, а частина радіоактивних еманцій, виділених на місці чи привнесених в ґрунтове повітря, бере участь в газовому обміні між ґрунтовим шаром та атмосферою.

Концентрація еманцій радону в ґрунтовому повітрі насамперед, залежить від двох основних факторів: інтенсивності виділення його в газоподібне середовище та концентрації в близько залеглих гірських породах радіоактивних елементів, так званих примордіальних (первісних) радіонуклідів сімейства урану.

Пошукові критерії вимірювання еманції радону пов'язані з тектонічно ослабленими зонами, тріщинуватими ділянками вмштуючих порід, наявністю глибоких тектонічних порушень. Оскільки така геологічна будова полегшує вивільнення радону із гірських порід в приповерхневі шари, відповідно глибинність методу для цих умов, також збільшується.

Вимірювання щільності потоку родону (ексхалації) (ЩПР) базується на визначенні активності радону, накопиченого за рахунок надходження з поверхні ґрунту відомої площі у вимірювальній камері чи пробовідбірнику за час прокачування повітродувкою протягом 5 хвилин. Перед вимірюванням поверхня ґрунту підлягає додатковій підготовці, що включає очищення, видалення рослинності та коріння, вирівнювання і спусування. Час експозиції однієї проби складає 20 хвилин.

Лабораторні вимірювання альфа- та бета-активності проб ґрунту виконані на радіометрі «Супутник». Бета-альфа-радіометр з часовою селекцією радіоактивних випромінювань «Супутник» призначений для вимірювання радіоактивності по альфа- та бета-випромінюванню методом реєстрації бета-альфа затриманих співпадінь в порошкових пробах (вагою 20 г) гірських порід та ґрунтів при геохімічних дослідженнях.

Після вимірювання кількості імпульсів розраховується активність по альфа- і бета-випромінюванню проб, що виражене у відсотках (%) масового еквіваленту урану та/або торію в рівновазі, що також може бути перераховано у питому активність по еквіваленту урану та/або торію.

Гамма-спектрометричний аналіз ґрунтів виконувався на спектрометрі гамма-випромінювання «АТОЛ-1 М» з блоком детектування АІ-1024, призначеному для реєстрації спектрів гамма-випромінювання та ідентифікації радіонуклідів; вимірювання активності радіонуклідів в різних речовинах у геометрії Марінееллі.

Вимірювання інтегральної питомої активності проб ґрунту були виконані на спектрометрі-ра-

діометрі «Foodligh» в режимі роботи радіометра у геометрії Марінееллі. Прилад «Foodligh» був створений після аварії на АЕС «Фукушіма» для радіаційного моніторингу сипучих зразків, проб ґрунту та показав хороші результати.

Нормативно-методичне забезпечення польових та лабораторних робіт виконувалося згідно вимог керівних документів з питань екологічної та радіаційної безпеки [1-16].

Радіологічні та дозиметричні вимірювання

Радіаційний фон або потужність експозиційної (еквівалентної) дози (ПЕД), гамма-випромінювання середовища умовно формується двома складовими: природною та техногенною. Усереднені глобальні показники гамма-фону для 45 північної широти складають: 9,9 мкР/год. (0,087 мкЗв/год.); з них – 4,1 мкР/год. (0,036 мкЗв/год.) – за рахунок космічної складової, 5,8 мкР/год. (0,051 мкЗв/год.) – за рахунок випромінювання примордіальних (первісних) радіонуклідів (ПРН), розсіяних у ґрунті (калію-40, урану-238 та торію-232). Внесок у радіоактивність середовища «техногенних» радіонуклідів відбувається внаслідок потрапляння у довкілля при поводженні з радіоактивними матеріалами або під час радіаційних аварій.

Потужність експозиційної (еквівалентної) дози (ПЕД) є основним показником, який використовується при оцінюванні впливу зовнішнього опромінювання на людину та інші біологічні об'єкти.

Результати вимірювань наведені в табл. 1. з координатною прив'язкою пунктів опробування. Також у таблиці наведені усереднені результати вимірювань та фонові показники (квартиль 75%). Відповідно до методики радіаційних досліджень радіаційний фон приймається однорідним при відхиленні результатів вимірювань не більше, ніж на 30 % від середнього [17, 18].

Як видно з таблиці 1, виміряні усереднені показники «природної» ПЕД, загалом близькі до пересічних для України, однак аномальні перевищення зафіксовані у чотирьох ПО.

Радіометрія радону

Радон (Rn) – радіоактивний газ, продукт розпаду радію, є основним фактором внутрішнього опромінювання та потрапляє в організм людини через органи дихання. Небезпека якого пов'язана

Таблиця 1

Результати дозиметричних вимірювань

№ ПО	Місце відбору	X	Y	ПЕД природний, мкЗв/год.	ПЕД «техногенний», мкЗв/год.	ПЕД шпур, мкЗв/год.
Профіль I						
1	с. Мар'янське, біля "Нібулону";	33,936942	47,556735	0,08	0,4	
2	100 м південно-західніше ПО1;	33,935809	47,556172	0,08	0,32	
3	біля а/д моста, 750 м від ПО1;	33,932358	47,551136	0,06	0,2	
Профіль II						
4	с. Грушівка (Ленінське) - насосна;	33,983198	47,569973	0,07		0,17
5	с. Грушівка (Ленінське) - насосна;	33,98292	47,570482	0,07		0,14
6	с. Грушівка (Ленінське) - насосна;	33,982563	47,570975	0,07		0,1
Профіль III						
7	с. Грушівка (Ленінське);	34,006358	47,561027	0,09		0,18
8	с. Грушівка (Ленінське);	34,005984	47,561698	0,09		0,14
9	с. Грушівка (Ленінське);	34,004935	47,562629	0,1		0,14
10	с. Грушівка (Ленінське); берег; «фонова» ПЕД	34,006282	47,56304	0,11		0,13
Профіль IV						
11	1,3 км східніше с. Грушівка, дамба;	34,059846	47,57999	0,08		0,12
12	1,3 км східніше с. Грушівка, дамба;	34,062325	47,580248	0,07		0,15
13	1,3 км східніше с. Грушівка, дамба;	34,067275	47,581078	0,07		0,18
15	с. Мар'янське, свердловина, 18 м	33,916718	47,560612	0,13	0,16	
14/16	с. Мар'янське, свердловина (ПО14)	33,920153	47,543806	0,13	0,2	
17	с. Нововоронцовка (Херсонська обл.), св. 15 м	33,915922	47,510997	0,14	0,24	
18	с. Нововоронцовка, колодязь 6 м	33,91768	47,491768	0,18	0,29	
19	с. Грушівка (Ленінське), св. 35 м	33,997041	47,579592	0,21	0,4	
20	с. Грушівка (Ленінське), колодязь 2,35 м	34,011502	47,575279	0,17	0,26	
21	с. Набережне, св. 28 м	34,096479	47,578863	0,08	0,16	
22	с. Набережне, св. 30 м	34,097002	47,580411	0,08	0,13	
23	с. Покровське, св. 31 м	34,146845	47,567275	0,13	0,25	
24	с. Покровське, св. 29 м	34,141506	47,563316	0,2	0,24	
Середнє				0,108	0,25	0,145
Квартиль 3 (75 %) – фон				0,13	0,29	0,165
Межа однорідності (130 % середнього)				0,14	0,325	0,189

Примітка: виділені червоним кольором показники, перевищують фонові значення та межу однорідності показників

Результати вимірювання ЩПР

№ ПО	Місце відбору	Опис поверхні	X	Y	ЩПР, мкБк/ (м ² с)
1	с. Мар'янське, біля "Нібулону", профіль 1	донні відклади: пісок	33,936942	47,556735	1
2	100 м південно-західніше ПО1, профіль 1	донні відклади: пісок	33,935809	47,556172	1
3	біля а/д моста, 750 м від ПО1, профіль 1	донні відклади: пісок, дрейсена	33,932358	47,551136	1
4	с. Грушівка (Ленінське) - насосна; профіль 2	донні відклади: мул	33,983198	47,569973	1
5		донні відклади: 0-30 см - супісок, +30 см - мул	33,98292	47,570482	9
6		донні відклади: 0-30 см - супісок, +30 см - мул	33,982563	47,570975	8
7	с. Грушівка (Ленінське); профіль 3	донні відклади: мулистий суглинок суцільний	34,006358	47,561027	16
8		донні відклади: мулистий суглинок суцільний	34,005984	47,561698	12
9		донні відклади: мулистий суглинок суцільний	34,004935	47,562629	1
10	с. Грушівка (Ленінське); берег; «фоновий» замір	грунт, малогумусний чорнозем	34,006282	47,56304	15
11	1,3 км східніше с. Грушівка, дамба; профіль 4	донні відклади: дрейсена, супісок	34,059846	47,57999	3
12		донні відклади: дрейсена, супісок	34,062325	47,580248	5
13		донні відклади: дрейсена, супісок, мул	34,067275	47,581078	7
15	с. Мар'янське, свердловина, 18 м	грунт, родючий шар	33,916718	47,560612	9
16	с. Мар'янське, свердловина (ПО14)	грунт, родючий шар	33,920153	47,543806	11
17	с. Нововоронцовка (Херсонська обл.), св. 15 м	грунт, родючий шар	33,915922	47,510997	12
18	с. Нововоронцовка, колодязь 6 м	грунт, родючий шар	33,91768	47,491768	20
19	с. Грушівка (Ленінське), св. 35 м	грунт, родючий шар	33,997041	47,579592	26
20	с. Грушівка (Ленінське), колодязь 2,35 м	грунт, родючий шар	34,011502	47,575279	19
21	с. Набережне, св. 28 м	грунт, родючий шар	34,096479	47,578863	4

Продовження табл. 2

№ ПО	Місце відбору	Опис поверхні	X	Y	ЩПР, мкБк/ (м ² с)
22	с. Набережне, св. 30 м	грунт, родючий шар	34,097002	47,580411	2
23	с. Покровське, св. 31 м	грунт, родючий шар	34,146845	47,567275	14
24	с. Покровське, св. 29 м	грунт, родючий шар	34,141506	47,563316	18
Середнє					9,7
«Фон» (3 квартали)					14,75

Примітка: виділені показники, які перевищують фонові значення

з властивістю накопичуватися у слабо провітрюваних приміщеннях (підвалах, погребях), оскільки радон у 7,5 рази важчий за повітря.

Кількісні параметри надходження радону з ґрунту у повітря – ексхалації, або щільність потоку радону (ЩПР), суттєво коливаються залежно від ґрунтових умов та погодних факторів (вітер, волога, температура), пори року, часу доби тощо. Виміряні у різний час показники ЩПР, переважно характеризуються високою мозаїчністю просторового розподілу.

Усереднені для території України, показники ЩПР складають приблизно 11 мБк/см². Водночас, даний показник не визначений Нормами радіаційної безпеки України [20].

Під час польових робіт проведені вимірювання щільності потоку радону (ЩПР) з ґрунту. Результати роботи наведено в таблиці 2.

Як видно з таблиці 2, усереднені показники ЩПР, виміряні на досліджуваній території, дещо нижчі, порівняно з середніми по країні. У шести пунктах опробування відмічені показники, які перевищують «фонові» для досліджуваної території (решта показників нижче місцевого «фону»). У межах сельбищних територій ґрунтовий покрив переважно, більш сприятливий для ексхалації радону-222.

Гідрохімічні вимірювання

При виконанні натурних досліджень були проведені експрес-аналізи поверхневих та підземних вод. Проводились вимірювання температури, водневого показника, вмісту та насиченості розчиненого кисню, солоності, жорсткості та електропровідності проб води.

Експрес-аналізи виконані у тих же ПО, в яких було проведено відбір проб води.

Всі проби води мають тенденцію у бік кислот-

ності, причому здебільшого, водневий показник (рН) не відповідає установленій нормі для питної води.

Більшість проб води не відповідають нормі за вмістом солей, половина – за вмістом розчиненого кисню.

Отже, вода з підземних джерел, яка використовується населенням обстежених сіл, не відповідає вимогам для води питного використання і як наслідок, призводить до засолення ґрунтів при поливі.

Відбір проб води та ґрунту

Відбір проб води проведений у тих же ПО, у яких виконувались радіологічні вимірювання. Вода з поверхневих джерел та колодязів відбиралася гідрогеологічною желонкою в контейнер.

Відбір проби ґрунту здійснювався такими способами:

- методом «конверту» з верхнього шару 0-10 см, після видалення трави та коріння;
- у шпурі пошарово або інтегрально.

Проби ґрунту були зібрані в поліетиленові мішечки.

Слід відзначити, що потужність алювію донних відкладів суттєво перевищує 1 м в глибину, тобто майже всі проби на колишній акваторії досить гомогенні і, здебільшого, включають крім супіщаної і суглинистої фракцій, мулові відклади (чорного та/або зеленого кольору) та мертві молюски (дрейсена). З огляду на викладене, пошаровий відбір виконано лише у трьох ПО – по два горизонти в кожному.

Пробопідготовка в лабораторних умовах включає всі необхідні для аналітичних досліджень процедури: фільтрування, висушування, випарювання, подрібнення, перетирання та гомогенізацію тощо.

Лабораторні аналізи проб

Показники інтегральна питомої активності (ША) характеризують насамперед, наявність таких радіонуклідів як радіоактивний цезій 134 та 137, (які після Чорнобильської аварії визначають радіаційний фон у ґрунті техногенно-забруднених територій), а також – радіокалій (К-40).

За результатами хімічних аналізів, пересічні рівні ША коливаються у межах 50-150 Бк/кг.

На досліджуваній території середнє значення ША відповідає максимальним пересічним показникам для території України.

Спектрометрія: ефективна питома активність природних радіонуклідів

Радіокалій (К-40) – визначений у всіх пробах, торій-232 та радій-226 – майже в усіх, у більшості – вісмут-214, у трьох пробах – актиній-228, в одній – кобальт-60. Також у трьох пробах зафіксовано незначні активності радіоцезію (Cs-136) котрий, на відміну від решти є «техногенним» радіонуклідом, присутність якого пов'язана з наслідками аварії на ЧАЕС у 1986 році.

Радій (Ra-226) – продукт розпаду урану-238, є джерелом формування гамма-випромінювання (У-випромінювання). Середня питома активність радію у ґрунтах для території України складає 33 Бк/кг, та коливається залежно від наявності мінералів, що містять уран [19]. Середня активність Ra -226 на досліджуваній території приблизно на 25% вища. У шести ПО активності Ra-226 виходять за межі фонових.

Середня питома активність Th-232 у ґрунтах для території України складає 30 Бк/кг, коливається залежно від наявності мінералів, що містять торій. На досліджуваній території активність торію-232 приблизно на 33% вища. Як і для Ra-226, активності Th-232 у шести ПО виходять за межі фонових для досліджуваної місцевості [19].

Відповідно до п. 8.6.1.1 [20], Аеф визначається по величині ефективної питомої активності природних радіонуклідів Ra-226, Th-232 та К-40 за формулою:

$$A_{ef} = A_{Ra} + 1,31A_{Th} + 0,085A_K \text{ (Бк/кг)},$$

де, 1,31 та 0,085 – зважуючі коефіцієнти для Th-232 та К-40, відповідно, до Ra-226.

Матеріали Аеф яких ≤ 370 Бк/кг належать до І класу небезпеки і можуть використовуватись без

обмежень (п. 8.6.1.2); при $370 \text{ Бк/кг} \leq A_{ef} \leq 740 \text{ Бк/кг}$ – II класу (п. 8.6.1.3) – можуть використовуватись для промислового та дорожнього будівництва; при $740 \text{ Бк/кг} \leq A_{ef} \leq 1350 \text{ Бк/кг}$ – III класу (п. 8.6.1.4) – можуть використовуватись: в населених пунктах – для будівництва підземних споруд; за межами населених пунктів – для дорожнього будівництва, спорудження гребель та промислових об'єктів з обмеженим часом перебування людей; для матеріалів, які мають естетичну цінність Аеф не повинна перевищувати 3700 Бк/кг (п. 8.6.1.5) [20].

Всі проби за Аеф не перевищують рівні активності, встановлені для матеріалів I класу небезпеки. У шести ПО Аеф виходить за межу фонових для території досліджень значень.

Аналіз отриманих результатів. Висновки

Результати радіологічних досліджень визначають загальну тенденцію: показники радіаційної ситуації в межах населених пунктів гірші, ніж на іншій досліджувальній території. Колишня акваторія Каховського водосховища у радіаційному плані не відрізняється від територій поза населеними пунктами, за винятком ПЕД, виміряної в шпурах.

Аналіз радіоекологічних аспектів проведених досліджень ґрунтового покриву в межах території досліджень показує наступне:

- дозові навантаження внаслідок зовнішнього опромінювання практично не відрізняються від інших територій України; водночас «техногенний» радіаційний фон, сформований будівельними матеріалами (гранітами), які використовувались для улаштування доріг з твердим покриттям і берегоукріплення;
- усереднені показники ексхалації радону не перевищують пересічні рівні;
- показники інтегральної питомої активності аномальні в населених пунктах, особливо в селах Мар'янське та Грушівка; усереднені показники ША також досить високі, порівняно з усередненими рівнями;
- активність природних радіонуклідів у ґрунтах не перевищує рівні, які можуть бути визначені як такі, що не забезпечують належні рівні радіаційної безпеки.

Головним чином, отримані результати дозиметричних, радіометричних та спектрометричних вимірювань узгоджуються між собою та під-

тверджують відсутність суттєвих загроз радіоекологічного характеру.

Результати більшості гідрохімічних експрес-тестів показують, що поверхневі та підземні води на території досліджень мають дуже низьку якість та непридатні для питного водокористування.

Зокрема, водневий показник (рН) в усіх без винятку пробах води має тенденцію до підвищеної кислотності і, здебільшого, виходить за унормовані межі.

Мінералізація проб води також виходить за межі ГДК, у ряді випадків – суттєво; лише ґрунтові води, що відібрані з колодязів місцевих жителів можуть вважатися умовно придатними для питних потреб.

А вміст розчинного кисню в підземних водах, здебільшого, виходить за межі ГДК.

У такий спосіб, під час проведення натурних геохімічних та радіологічних досліджень у вересні 2023 року, з відбором проб ґрунтів (донних відкладів), поверхневих та підземних вод у районі розташування центральної частини Каховського водосховища в Херсонській та Дніпропетровській областях виявлено окремі локальні перевищення потужності еквівалентної дози (ПЕД) випромінювання порівняно з місцевим радіаційним фоном. Зокрема, на глибині 1 м від поверхні ПЕД помітно вище, ніж над поверхнею, в середньому у 1,9 рази, максимум – у 2,6 рази. Середній фон на поверхні ложа водосховища складає 0,082 мкЗв/год., у глибині – 0,145 мкЗв/год.

Попередні результати визначення вмісту мікроелементів (28 металів та сірки) у ґрунтах площ, які не знаходились в межах колишньої акваторії водосховища та донних відкладах показують, що геохімічний фон осадових відкладів за 70 років існування Каховського водосховища змінився несуттєво. У донних відкладах, порівняно з ґрунтами, дещо знизилися (на 10-30%) валові вмісти таких елементів: Fe, Pb, Zr, Bi, Ba; суттєво (у 2-3 рази) знизилися вмісти: Cu та В; дещо зросли (на 10-30 %) вмісти: Ti, Mn, Ni, Cd, Be, La, Yb та Ge; суттєво зросли (в 1,5-2 рази) вмісти: Sn, W, Li та Sc; залишились практично на тому ж рівні вмісти: V, Co, Cr, Zn, Ga, Nb, Mo, P, Y а також S.

Порівняння результатів аналітичних визначень різних фракції донних відкладів (мул, суглинок, супісок), відібраних з різних глибин у шпурах показує, що мулиста фракція за валовим

вмістом більшості мікроелементів суттєво переважає інші фракції.

Відтак, завдяки знаходженню мікроелементів у міцно фіксованих формах в мулах донних відкладів їх геохімічний склад змінився практично несуттєво за роки існування водосховища.

Порівняно з кларковими (фоновими для літосфери) вмістами мікроелементів показує, що ґрунти, донні відклади багаті на свинець, кадмій, фосфор, лантан, ітрій та бор; бідні на цинк, нікель, мідь, вольфрам, галій, літій та берилій; вміст решти елементів – посередні.

Як показали натурні обстеження, донний алювій має значну товщу, його однорідний шар перевищує можливості шпурового буріння. Тому, для детального вивчення крейдових відкладів (КВ), доцільно отримання бурового керну до глибин залягання першого від поверхні водоносного горизонту.

Описані у даній статті результати натурних досліджень колишньої акваторії Канівського водосховища та прилеглих прибережних територій стосуються ділянки площею приблизно 100 км². Тому встановлені попередні результати характеризують об'єкт досліджень частково.

ЛІТЕРАТУРА

1. Методические указания по проведению обследования сельхозугодий в хозяйствах загрязненной радионуклидами зоны в 1991-1992 г. – Киев, 1991. – 11с.
2. Хомутінін Ю. В. Инструкция по отбору проб почв при радиационном обследовании загрязненной местности. / Ю. В. Хомутінін, С. Є. Левчук, В. В. Павлюченко. – М, 1987. – 10 с.
3. Тимчасові вимоги до проведення комплексного моніторингу та оцінки радіологічної якості забруднених територій в різних ландшафтно-геохімічних зонах: Методичні рекомендації. К., 1996. 24 с.
4. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.V.20. American Public Health Association, 1998. 1220 с.
5. СОУ-Н ЯЕК 0.034:2013 Виконання польових та лабораторних робіт з дослідження радіаційного стану вод поверхневих водойм для виявлення впливу на них підприємств ядерно-енергетичного комплексу України. Методичні вказівки. Нормативний документ Міністерства енергетики

та вугільної промисловості України. К., 2013.

6. СОУ-Н ЯЕК 0.030:2012 Виконання польових та лабораторних робіт з дослідження радіаційного стану ґрунтів для виявлення впливу на них підприємств ядерно-енергетичного комплексу України. Методичні вказівки. Нормативний документ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України. К., 2012.

7. ДГН 6.6.1-6.5.061-98 Норми радіаційної безпеки України НРБУ-97.

8. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10) Ю, затверджені наказом Міністерства охорони здоров'я України 12.05.2010 р., № 400.

9. ДСанПіН. Вода питна. Гігієнічні вимоги до якості води централізованого господарсько-питного водопостачання, МОЗ України, 1997 р.

10. НД: «Гігієнічні нормативи якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення» затверджені наказом Міністерства охорони здоров'я України 02.05.2022 № 721, зареєстровано у Міністерстві юстиції України 16.05.2022 року за № 524/37860.

11. ДСанПіН 2.2.4-171-10 Державні санітарні норми та правила. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною.

12. ДСТУ ISO 5667-2-2003 Якість води. Відбір проб. Частина 2. Настанови щодо методів відбирання проб. Діючий від 2004-01.07. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України. 2003.

13. ДСТУ ISO 5667-4-2003 Якість води. Відбирання проб. Частина 4. Настанови щодо відбирання проб із природних та штучних озер. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України. 2003.

14. ДСТУ ISO 5667-6:2009 Якість води. Відбирання проб. Частина 6. Настанови щодо відбирання проб води з річок та і струмків. Діючий від

2011-01.07. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України. 2011.

15. ДСТУ ISO 5667-3:2001 Якість води. Відбирання проб. Частина 3. Настанови щодо зберігання та поводження з пробами. Діючий від 2003-01.01. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України. 2001.

16. ДСТУ ISO 5667-14:2005 Якість води. Відбирання проб. Частина 14. Настанови щодо забезпечення якості відбирання та оброблення проб природних вод. Діючий від 2006-01.07. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України. 2005.

17. ДСТУ ISO 10703-2001 Захист від радіації. Визначання об'ємної активності радіонуклідів методом гамма-спектрометрії з високою роздільною здатністю. Діючий від 2003-07.01. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ». 2003. 19с.

18. СОУ 74.14-37-425:2006 Якість ґрунту. Методи відбору проб ґрунту для радіаційного контролю. Діючий від 2006-01.01. Вид. офіц. Київ: Український науково-дослідний інститут сільськогосподарської радіології Національного аграрного університету. 2006.

19. Коваленко Г. Д. Радиоекологія України / Г. Д. Коваленко. – Харків: ИД «ИНЖЭЖ», 2013. – 344 с.

20. Про введення в дію Державних гігієнічних нормативів «Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)» [Електронний ресурс]. – 1997. – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97#Text>.

21. «Розробка рекомендацій щодо доцільності відбудови Каховського гідровузла та наповнення Каховського водосховища для забезпечення надійної експлуатації водозаборів комунального та промислового водопостачання та відновлення екологічного стану і біорізноманіття Нижнього Дніпра: звіт про НДДКР (заключний) / – Київ, 2023. – 900 с. – №ДР 0123U103857.

УДК 622.273:65.011.12 (088.8)

ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНОГЕННО-ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ РОЗРОБКИ ПРИПОВЕРХНЕВИХ ЗАПАСІВ РУДНИХ РОДОВИЩ

Ляшенко В. І.

Державне підприємство «Український науково-дослідний та проектно-розвідувальний інститут промислової технології»,
б-в Свободи, 37, м. Жовті Води, Дніпропетровська область, 52204

Дудар Т. В.

Національний авіаційний університет,
просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058

Стусь В. П.

Дніпровський державний медичний університет,
вул. Володимира Вернадського, 9, м. Дніпро, 49044

Шаповалов В. А.

Криворізький національний університет,
вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг,
Дніпропетровська обл, 50000

В статті розглядаються питання екологічної безпеки при розробці приповерхневих запасів рудних родовищ в порушених зонах геологічного розрізу до глибин від 120 до 150 м. При цьому забезпечується максимальне вилучення корисної копалини та зниження проникнення небезпечних речовин (газів) на денну поверхню.

У ході дослідження авторами було проаналізовано літературні джерела та патентна документація в сфері розробки запасів родовищ під охоронними об'єктами (інженерні споруди). Проводились обґрунтування технологічних та геомеханічних параметрів експлуатаційних блоків. Авторами проведені лабораторні та виробничі експерименти, а також зроблено фізичне моделювання.

Доведено, що зустрічно-направлене ініціювання свердловинних зарядів у комплексі з використанням неелектричних засобів їх підривання дозволяє збільшити тривалість вибухової дії на масив, спричиняє позитивний вплив на стійкість стелини за рахунок зниження в 1,7-2,3 рази динамічної дії вибуху, що зменшує в 1,5 рази ви-

хід радіоактивних газоподібних речовин через тріщини на денну поверхню. Окрім цього, забезпечується й більш якісне подрібнення уранових руд: вихід негабариту, порівняно з традиційним способом відбійки гірського масиву зменшується на 20-24% відповідно.

Показано, що вирішальне значення на стійкість оголень мають такі значення: структурна порушеність масивів гірських порід тектонічними тріщинами; час існування оголень; кут нахилу оголення до горизонту; черговість відпрацювання блоку (камери) та глибина робіт. Породні та рудні масиви родовищ складної структури класифікують за показниками тріщинуватості та блочності. Оцінкою стійкості горизонтального та вертикального оголень прийнято еквівалентний проліт.

Виконано оцінку та зроблено прогноз різних форм прояву гірського тиску за коефіцієнтом концентрації напруг в межах $0,91 < K_v < 0,70$, з урахуванням умов пружної поведінки гірських порід. Як допустиму відносну деформацію прийнято її величину $\varepsilon = 0,0002-0,0003$, що забез-

печує гірничотехнічну і екологічну безпеку та стійкість гірських масивів при багаторазовому провадженні вибухових робіт. Обґрунтовано, що при зустрічно-направленому ініціюванні із застосуванням неелектричних засобів підривання свердловинних зарядів вихід негабариту (v_n) зменшується і знаходиться в експоненційній залежності від лінії найменшого опору (W) типу $v_n = 5,57 \times e^{0,022W}$. Це дозволяє збільшити вагу зарядів вибухових речовин (ВР) на одне уповільнення в межах віяла свердловин із 300 до 1250 кг та знизити швидкість сейсмічних коливань масиву стелини з 0,46 до 0,28 см/с.

Ключові слова: родовище, камерна система, закладка, міцність, безпека, гірничотехнічні показники, екологічна, навколишнє середовище.

Enhancing the environmental safety while developing the near-surface ore deposits.
Liashenko V., Dudar T., Stus V., Shapovalov V.

The article considers issues of environmental safety in the development of near-surface reserves of ore deposits in disturbed zones of the geological section to depths of 120 to 150 meters. At the same time, maximum extraction of useful minerals and reduction of penetration of dangerous substances (gases) on the day surface is ensured.

In the course of this research, publications and patent documentation in the field of deposit development under protected facilities (engineering structures) were analyzed. At the same time, the substantiation of the technological and geomechanical parameters of the operating blocks was carried out, laboratory and production experiments were conducted, and physical modeling was also carried out.

It has been proven that counter-directed initiation of well charges in combination with the use of non-electric means of their detonation allows to increase the duration of the explosive action on the massif, causing a positive effect on the stability of the wall due to a 1.7–2.3 times decrease in the dynamic action of the explosion, which in 1.5 times reduces the release of radioactive gaseous substances through cracks to the day surface. In addition, higher-quality crushing of uranium ores is ensured: the output of oversize, compared to the traditional method of crushing the mountain massif, is reduced by 20–24%, respectively.

It is shown that the following values are decisive for the stability of outcrops: structural disruption of rock massifs by tectonic cracks; time of exposure; the angle of exposure to the horizon; sequence of working out the block (chamber) and depth of work. Rock and ore massifs of deposits of complex structure are classified according to indicators of fracture and blockiness. An equivalent span is used to assess the stability of horizontal and vertical exposures.

An assessment and a forecast of various forms of rock pressure manifestation were made based on the stress concentration coefficient in the range of 0.91 Kv 0.70, taking into consideration the elastic behavior of rocks. Its value = 0.0002–0.0003 is accepted as the permissible relative deformation, which ensures mining technical and environmental safety and stability of rock massifs during repeated blasting operations. It is substantiated that with counter-directed initiation using non-electric means of detonating well charges, the oversize output (v_n) decreases and is exponentially dependent on the line of least resistance (W) of the type $v_n = 5.57 \times e^{0.022W}$. This makes it possible to increase the weight of explosive charges by one deceleration within the borehole fan from 300 to 1250 kg and reduce the rate of seismic oscillations of the rock massif from 0.46 to 0.28 cm/s.

Keywords: deposit, chamber system, solidity, mining technical indicators, environmental safety.

Постановка проблеми

Підземні гірничі роботи під об'єктами, які охороняються (промислові зони, житлові агломерації, водні та сільськогосподарські угіддя) при невеликій глибині (менше 150–120 м) є технологічно складними, небезпечними і в науково-технічній літературі висвітлені недостатньо [1,2]. Під час розробки таких рудних родовищ необхідно збереження не тільки земної поверхні із спорудами та будинками, а також мінімізувати можливий вихід шкідливих елементів у навколишнє середовище і, як наслідок, знизити їх негативний вплив на населення що проживає в зоні його впливу [3, 4]. Тому підвищення техногенно-екологічної безпеки розробки приповерхневих запасів рудних родовищ в енергопорушених масивах на невеликій глибині від земної поверхні, а також технічних та технологічних заходів її збереження та об'єктів, які охороняються – має важливе

наукове, практичне та соціальне завдання, яке потребує невідкладного вирішення [5, 6]. Наукові та практичні результати були отримані під час виконання науково-дослідних робіт за наступними науковими темами: «Дослідження напруженого стану гірничого масиву, здатного до прояву гірничого тиску, оцінка стійкості камер та обґрунтування їх безпечних параметрів на шахтах ДП «СхідГЗК» (номер державної реєстрації 0105U001957) та «Сейсмічний моніторинг дії вибухових робіт у межах гірничого відведення шахт ДП «СхідГЗК» (номер державної реєстрації №0109U002127). Означена робота є продовженням досліджень, основні наукові та практичні результати яких найбільш детально наведені в роботах [7, 8].

Мета дослідження – підвищення техногенно-екологічної безпеки розробки приповерхневих запасів рудних родовищ в енергопорушених масивах на глибині менше 150-120 м під об'єктами які охороняються. При цьому забезпечується максимальне вилучення руди, надійне збереження об'єктів, що охороняються та зниження проникнення небезпечних речовин на денну поверхню.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

1. Встановити залежності геомеханічних та сейсмобезпечних параметрів оголень енергопорушених масивів та міцності закладки від ймовірності руйнування запобіжної стелі для умов розробки приповерхневих запасів руд.

2. Дослідити вплив на стійкість оголень енергопорушених масивів та міцності закладки від динамічної дії вибуху та можливого виходу шкідливих газоподібних речовин через тріщини на земну поверхню.

3. Рекомендувати науково обґрунтовані та безпечні параметри оголень енергопорушених масивів, міцності закладки та техногенних камер при розробці приповерхневих запасів руд.

Аналіз останніх досліджень та публікацій
Авторами статті були використані комплексні методи, що містять: аналіз та наукове узагальнення літературних джерел та виробничої інформації для визначення завдань дослідження; метод розрахункових функціональних характеристик та експериментальних досліджень для обґрунтування стійкості відкладень та ціликів та визначення впливу гірничого виробництва на природ-

не середовище. Було узагальнення теоретичних результатів досліджень для виявлення ступеня впливу різних факторів на стійкість відкладень та ціликів, а також вихід газоподібних шкідливих речовин на денну поверхню. Був опрацьований звукометричний метод з метою оцінки стану відкладень на конструктивні елементи камерних систем розробки; а також метод дослідження хвильових процесів за стандартними та новими методиками [9, 10].

Оцінювання стійкості покрівлі виробки правильної форми здійснюється за величиною еквівалентного прогону постійної ширини та обмеженої довжини цієї покрівлі. Дане оцінювання отримало назву методу еквівалентних прогонів і надає достовірні результати. Значення еквівалентного прогону визначаються за методиками відомих вчених Протодьяконова М. М., Слесарева В. Д., Борисова А. А., Ветрова С. В., Волощенко В. П., Хоменко О. Є., а також Бондаренко В. І., Борисенко С. Г., Капленко Ю. П., Кононенко М. М., Кузьменко О. М., Лавриненко В. Ф., Нігматулін В. С., Усатий В. Ю., Ступнік М. І., Фаустов Г. Т., Цариковський В. В., Чистяков Є. П. При цьому зі збільшенням глибини розробки стійкий еквівалентний прогін зменшується, що пояснюється зростанням гірського тиску, а при зменшенні глибини розробки, навпаки збільшується. У той же час, при проведенні досліджень у промислових умовах при відпрацюванні Мічурінського родовища встановлено, що зі зменшенням глибини ведення гірничих робіт стійкий еквівалентний прогін, відповідно зменшується. Аналіз стану горизонтальних відслонень, розташованих на глибинах від 40-50 м до 15-200 м, показує, що на їх стійкість істотно впливає близькість поверхні.

Постановка завдання та його вирішення
Дослідження безпеки підземної розробки рудних родовищ складної структури з урахуванням геомеханічного і сейсмічного обґрунтування раціональних параметрів експлуатаційних блоків виконувалися багатьма фахівцями у розвинених гірничодобувних країнах світу [4]. Зокрема, в Україні це: ПрАТ «Запорізький залізорудний комбінат» (ПрАТ «ЗЗРК»); ДП «Український науково-дослідний та проектно-розвідувальний інститут промислової технології» (ДП «УкрНД-ПІІ промтехнології»); Державне підприємство

«Східний гірничо-збагачувальний комбінат» (ДП «СхідГЗК»); Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» та Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова (ІГТМ НАН України); «Криворізький національний університет» (ДВНЗ КНУ).

Питаннями управління напружено-деформованого стану (НДС) гірського масиву і сейсмічної дії вибуху також займалися в Республіці Казахстан, зокрема «Східний науково-дослідний гірничо-металургійний інститут кольорових ме-

роди мають коефіцієнт міцності (за шкалою професора Протод'яконова М. М.) $f = 14-18$, вони масивні та мають неслоїсту будову. У напрямку поверхні відбувається істотне погіршення кількісних та якісних показників тріщинуватості як у окремих покладах, так і по родовищу загалом. На верхніх горизонтах породи вивітрені, коефіцієнт f знижується до 6. Родовище розробляється камерною системою розробки із закладкою виробленого простору сумішшю, що твердіє, різного складу та міцності (рис. 1).

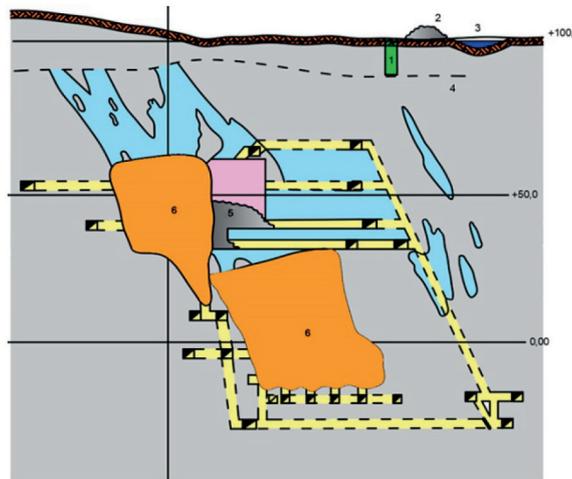


Рисунок. 1 – Камерна система розробки з торцевим випуском руди

1 – протифільтраційна завіса; 2 – дамба; 3 – річка Інгул; 4 – нижня межа кори вивітряння; 5 – відбита руда; 6 – камери відпрацьовані та погашені закладкою, що твердіє

талів» (ВАТ «ВНІКМЕТ»). А за кордоном, вищезгадані дослідження проводилися в США, Німеччині, Франції, Чилі та Австралії [6].

Результати проведеного аналізу дозволяють зробити висновок про те, що важливим для вирішення цього питання є утворення техногенних порожнеч. Означене впливає на виникнення і перерозподіл НДС масиву гірських порід, а також сприяє підвищенню технологічної та екологічної безпеки навколишнього середовища в зоні впливу гірничих робіт [7].

Запаси Мічуринського родовища, значна частина якого залягає в зоні впливу річки Інгул та її руслового потоку, оточена промисловими та цивільними будівлями (селище Кізельгур, місто Кропивницький, село Українка) та спорудами представлена рудними тілами різної потужності та кутом падіння. Довжина рудних тіл складає за простяганням від 600 до 700 м (переважно 100-250 м), за падінням від 150 до 400 м. Руди і по-

Параметри блоку: висота 60-120 м; довжина 20-60 м; ширина 15-20 м (при розташуванні камер у хрест простягання) або дорівнює потужності рудного тіла (при розташуванні камер по простягання); висота поверху до 15 м (у виняткових випадках до 17-18 м); висота днища 8-11 м (максимум 13 м з горизонтом вторинного дроблення); відстань між випускними дучками 8-10 м. У процесі понад 50-річного відпрацювання родовища камерна система розробки з відбійкою руди з підповерхових штреків (ортів) і закладкою твердіють, добре освоєна сумішами, має високу продуктивність праці, порівняно низьку собівартість продукції і найголовніше – високу інтенсивність, що дуже важливо при залученні в експлуатацію покладів підрічного цілика Мічуринського родовища.

Для оперативного контролю та прогнозу напружено-деформаційного стану (НДС) гірничого масиву застосовувалися переносні звукометрич-

ні прилади, які були розроблені та виготовлені Науково-виробничим комплексом (НВК) автоматики та механіки спільно з Ремонтно-механічним заводом (РМЗ) (ДП «СхідГЗК»).

Для гарантування безпеки гірничих робіт у зоні впливу гирла р. Інгул та порожнин відпрацьованих камер був виконаний прогноз НДС та оцінку умов динамічного прояву гірничого тиску. А також відпрацьована організація системи геомеханічного та сейсмічного моніторингу за стійкістю оголень камер [11].

З метою охорони підземних виробіток від потрапляння вод р. Інгул, особливо в період весняного паводку, вздовж гирла у зоні впливу гірничих робіт із порід було збудовано дамбу та із суглинку протифільтраційну завісу до глибини нижньої межі кори вивітрювання. Така завіса виконує роль напівактивних водопроникних хімічно активних бар'єрів (ВХАБ) та біологічних технологій. Це забезпечує зниження ступеня забрудненості металами ґрунтових та поверхневих вод, ґрунтів та відкладень [12]. Для контролю ефективності роботи ВХАБ необхідно збудувати спостережну мережу свердловин, яка надає можливість контролювати вхідні та вихідні потоки підземних вод.

Основні науково-технічні положення обґрунтування безпечних параметрів камер виконані авторами на основі багаторічної статистичної бази та за результатами відпрацювання аналогічних рудних покладів родовища у тому числі:

- вибору системи розробки із закладкою для окремих покладів з урахуванням їх геомор-

фологічних та геомеханічних особливостей;

- визначення безпечних геометричних параметрів експлуатаційних блоків залежно від часу відпрацювання та просторового положення у вміщувальному масиві. А також від структурного стану рудного та вміщуючого масивів, безпечних технологічних параметрів суміші, що твердіє для закладки виробленого простору.

Під час проведення досліджень у промислових умовах відпрацювання Мічуринського родовища встановлено, що із зменшенням глибини ведення гірничих робіт стійкий еквівалентний проліт зменшується. Аналіз стану горизонтальних відкладень, розташованих на глибинах від 40 до 200 м доводить, що на їхню стійкість істотно впливає близькість денної поверхні. Отримана інформація про стан відкладень оброблялася за ознаками стійкості, що оцінювалася за даними апаратних та візуальних спостережень (рис. 2).

За підсумками комплексних досліджень, в натурних умовах оцінювалася стійкість цих відкладень: була проведена оцінка понад 100 оголень, у тому числі близько 40% виявилися нестійкими (рис. 3). Межею між стійкою та нестійкою зонами є сукупність граничних значень функцій еквівалентних прольотів від глибини розробки [13, 14]. Статистична обробка вихідної інформації дозволила встановити залежність стійкого еквівалентного прольоту від його глибини розташування. Якби значення вихідних величин були точними, при запасі міцності більше одиниці ймовірність його руйнування була б нульовою.

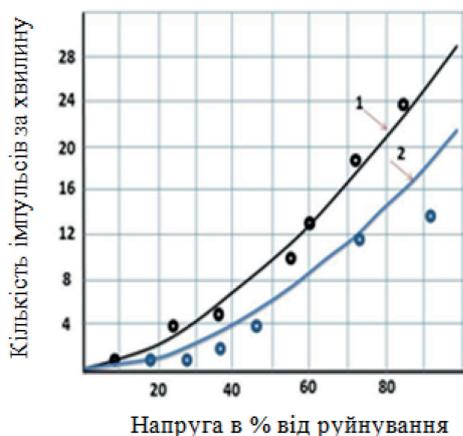


Рисунок 2 – Залежність частоти звуків руйнування

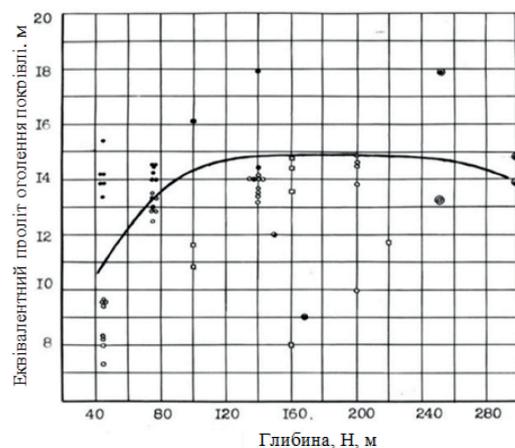


Рисунок 3 – Графік обчислених значень еквівалентних прольотів оголень порід покрівлі

Безпечні параметри камер для рудних родовищ

Найменування параметрів	Розрахункові формули
Сейсмобезпечна маса заряду на одне уповільнення, кг (Q):	
<ul style="list-style-type: none"> • для гірського масиву • для закладного масиву: при нормальному розташуванні віялових зарядів; • при паралельному розташуванні віялових зарядів 	$Q = \left[\frac{U_d}{K} \right]^{\frac{3}{n}} \cdot r^3$ $Q = \left(\frac{2\sigma_{p.з.} \cdot g \cdot 1000}{85 \cdot \gamma \cdot C_p} \right)^{2,34} \cdot r^3$ $Q = \left(\frac{\sigma_{смс} \cdot g}{0,290 \cdot \gamma \cdot C_p} \right)^{1,44} \cdot r^3$

Примітка. У формулах позначено: U_d – допустима швидкість зміщення масиву, яка визначається експериментальним шляхом, см/сек; K – коефіцієнт, що залежить від умов підривання ($K_v = 100 - 600$);

n – показник ступеня згасання сейсмовибухових хвиль ($n = 1,2-2,0$); $\rho = \frac{\sqrt[3]{Q}}{r}$ – наведена маса заряду ВР, кг; r – відстань між камерами (від епіцентру вибуху до оголення), м; $\sigma_{p.з.}$, $\sigma_{смс}$ – відповідно, межа міцності закладки на розтягування та стиск, МПа; g – питома витрата ВР на відбійку руди, кг/м³; γ – щільність руди, т/м³.

У виробничих умовах може скластися ситуація, коли на якійсь ділянці цілика межа міцності порід буде мінімальною, а напруга – максимальною. За подібних умов починається руйнування цілика. І навіть запровадження запасу міцності $n = 3$, що рекомендується більшістю дослідників, який завжди гарантує забезпечення стійкості конструктивних елементів.

де O, \bullet – відповідно, стійкі та нестійкі середньо і сильнотріщинуватий масив оголення від величини напруги для різних типів порід.

За результатами багаторічних досліджень, проведення комплексу науково-дослідних робіт під час підземної розробки родовищ складної структури в енергопорушених масивах, автори статті пропонують розрахункові формули щодо обґрунтування сейсмічно безпечних параметрів камер (табл. 1).

Сейсмічна стійкість оголень та земної поверхні. Незначний розвиток тріщин, окремі вивали порід з ділянок, раніше ослаблених вибуховими роботами, спостерігаються при $U_v = 20-50$ см/с [15, 16]. Інтервал швидкостей у таких межах приймаємо як допустимий для різних об'єктів у зонах загрозливих динамічному прояву гірського тиску різних форм. Оці-

нюючи сейсмічний вплив вибуху на споруди, в гірських масивах деформації гірських порід не повинні перевищувати меж пружності.

Кількісні параметри сейсмічного впливу вибуху для конкретних гірничо-геологічних умов рудних шахт встановлюються на підставі закономірностей поширення сейсмовибухових коливань у різних середовищах. Коли відношення відстані від пункту реєстрації r до висоті поверху (віяла свердловин) h перевищувала величину $r/h \geq 2,5$ групу свердловинних зарядів розглядали як зосереджений (сферичний) заряд. Гранично допустима вага заряду на одне уповільнення під час роботи двох суміжних камер, розділених цілком, визначається номограмою (рис. 4).

Результати застосування. Для камер, що контактують із закладкою (рис. 4, в). При системі підповерхових штреків останній віяло свердловин повинен відстояти від межі блоку із закладеним простором не менше 1,2 м при 3-місячному та 0,6 м – при річній закладці. Для Мічурінського родовища, запропоновано імовірнісну шкалу стійкості для різних категорій об'єктів, що охороняються (табл. 2) та гранично-допустиму вагу заряду на одне уповільнення (табл. 3).

Прогноз різних форм прояву гірського тиску проведений за коефіцієнтом концентрації на-

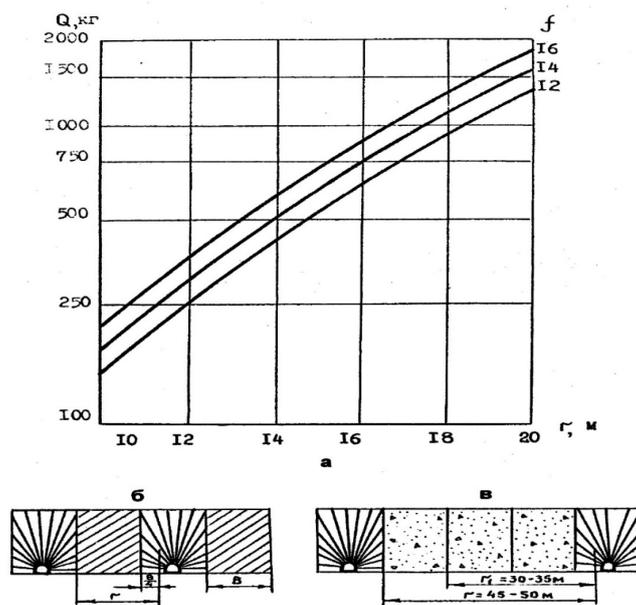


Рисунок 4 – Схема визначення гранично допустимого заряду BP одне уповільнення:
 а – номограма; б, в – суміжні камери розділені рудним та штучним цілком;
 r – відстань між камерами, м; Q – вага заряду на одне уповільнення, кг

Таблиця 2

Імовірнісна шкала стійкості

Категорія охоронних об'єктів	Коефіцієнт безпеки, K_b	Надійність, P	Ймовірність руйнування, V	Гранично припустимий запас міцності, n
I	150	0,9970	0,0030	$n = 76,88 \cdot 10^{-3} t^{1,07}$
II	100	0,9940	0,0040	$n = 47,99 \cdot 10^{-3} t^{1,07}$
III	50	0,9831	0,0169	$n = 23,73 \cdot 10^{-3} t^{1,07}$
Водні об'єкти II групи	75	0,9880	0,0120	$n = 29,95 \cdot 10^{-3} t^{1,07}$
Водні об'єкти I групи	50	0,9831	0,0169	$n = 23,73 \cdot 10^{-3} t^{1,07}$

Таблиця 3

Допустима вага заряду на одне уповільнення, т

Відстань між камерами, м	Період затвердіння закладки, міс.	
	3	6
30-35	0,3-0,4	1,0-1,5
45-50	0,8-1,0	2,5-3,0

пруг в межах $0,91 < K_v < 0,70$, а також виходячи з умов пружної поведінки гірських порід як допустима прийнята величина відносної деформації $\epsilon = 0,0002 - 0,0003$, що гарантують гірничотехнічну безпеку та стійкість гірничих масивів при багаторазовому провадженні вибухових робіт (табл. 4). За результатами оцінки рівня напруже-

ного стану масиву та механізму прояву гірничого тиску за візуальними ознаками авторами статті розроблено класифікацію напруженого стану гірничого масиву та залежно від орієнтації максимальних головних напруг щодо вироблення: неударонебезпечні, третьої, другої та першої категорій ударонебезпечності. Розрахункові формули

Таблиця 4

Гірничо-технічна безпека та стійкість гірських масивів

Характеристика напруженого стану гірничого масиву	Допустимі відносні деформації, ε
Неударонебезпечні ($K_v < 70$)	0,00030
Практично неударонебезпечні, з низькою ймовірністю загрози прояву гірських ударів ($K_v > 0,71-0,90$)	0,00025
Схильні до динамічного прояву гірського тиску, де можлива загроза гірських ударів різних форм (інтенсивне заколоутворення, лушення, стріляння) ($K_v > 0,91$)	0,00020

Таблиця 5

Розрахункові формули допустимих швидкостей зміщення об'єкта

Найменування об'єкта та показника	Шахти	
	«Інгульська»	«Смолінська»
Рудні та охоронні цілики, підземні вироблення та оголення гірських масивів, розташованих паралельно віялу вибуху ВВ	$U = 575 \rho^{2,08}$	$U = 500 \rho^{1,85}$
Покрівля, борти камер та породних ціликів, розташованих нормально до віяла вибуху ВР	$U = 145 \rho^{2,08}$	$U = 250 \rho^{1,85}$
Штучний масив	$U = 85 \rho^{1,28}$	$U = 85 \rho^{1,28}$
Питома концентрація ВР на: 1 м ² площі віяла вибуху; 1 м довжини свердловини вибуху	$U = 4,5 q_1^{2,1} \cdot \exp^{(-0,02\omega)} 10^{-2}$ $U = 4,3 q_2^{1,66} \cdot \exp^{(-0,02\omega)} 10^{-2}$	

Таблиця 6

Допустимі швидкості зміщення об'єкта

Об'єкт	Допустима швидкість зміщення, см/с
Розташування об'єкта паралельно свердловинним зарядам ВР	
Охоронна цілика	24
Рудний, міжкамерний цілики	36
Виробітки	44
Розташування об'єкта нормально до свердловинних зарядів	
Борта камер, смуга	36
Виробітки	44
Закладковий масив	26

Таблиця 7

Допустимі питомі концентрації ВР на 1 м² площі віяла і на 1 м довжини свердловини

Об'єкт	Допустима швидкість зміщення, U_d см/с	Допустима питома концентрація ВР	
		На 1 м ² площі віяла, кг/м ² , $q_1 = \left(\frac{U_d}{4,5} \right)^{0,476}$	На 1 м довжини свердловини, кг/м, $q_2 = \left(\frac{U_d}{4,3} \right)^{0,602}$
Закладковий масив	26	2,31	2,95
Рудний, міжкамерний цілики	36	2,69	3,59
Борта камер, смуга	40	2,83	3,83
Вироблення	44	2,96	4,05

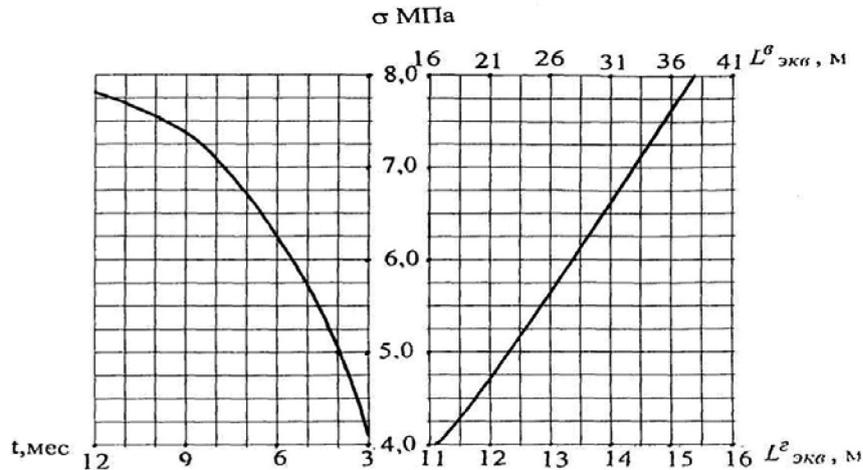


Рисунок 5 – Номограма визначення терміну оголення твердіючої закладки (t , міс) за її міцністю на стиск ($\sigma_{сж}$, МПа) залежно від гранично-допустимих еквівалентних прольотів горизонтального ($L^e_{екв}$), та вертикального ($L^e_{екв}$) оголень камер першої черги, м

допустимих швидкостей усунення для різних об'єктів шахт ДП «СхідГЗК», наведено у таблиці 5. Допустимі швидкості зміщення та концентрації ВР на 1 м² площі віяла та на 1 м довжини свердловини для підземних об'єктів шахт ДП «СхідГЗК», під час підривання віялових свердловинних зарядів наведено в таблицях 6 та 7 [17, 18].

По номограмі при гранично допустимому еквівалентному прольоті вертикального оголення 32 м (рис. 5). Стійке оголення закладених камер першої черги що твердіє, можливе при її міцності на стиск, приблизно 7,0 МПа, що досягається після 8 місяців від закінчення заповнення камери. Для інтенсифікації робіт при відпрацюванні секцій експлуатаційних блоків у покладі доцільно знижувати терміни набору нормативної міцності на стиск за допомогою застосування необхідної рецептури з масою в'язучого (гранульованого шлаку – 400 кг/м³ суміші, що твердіє). Для забезпечення стійкості горизонтальних оголень закладання, що твердіє, по гранично допустимому еквівалентному прольоту 13,4 м (рис. 5) достатньо 7,0 - 7,5 місяців твердіння і набору міцності на стиск 6 МПа [19, 20].

Ефективність отриманих результатів дослідження. Обґрунтування ефективних параметрів та сфер застосування природо- та ресурсозберігаючих технологій підземної розробки рудних родовищ складної структури на основі інтенсифікації процесів виконується за критерієм наведеного прибутку з урахуванням збереження земної поверхні, а також завданих збитків (еко-

номічних наслідків) навколишньому середовищу та витрат населення, що проживає в зоні впливу гірничих підприємств (добувних та переробних) [21, 22].

Геометричні параметри камер та стійкість вертикальних та горизонтальних оголень залежить від інтенсивності відпрацювання та закладається камера, тим більших оголень можна допустити. Гірничо-технічна безпека розробки родовищ складної структури досягається за рахунок ведення комплексних методів та технічних засобів вимірювань напруженого стану масиву гірських порід на основі геомеханічного та сейсмічного моніторингів [23, 24]. Вирішальне значення стійкості оголень надають структурна порушеність масивів гірських порід тектонічними тріщинами, час існування оголень, кут нахилу оголення до горизонту, черговість відпрацювання блоку (камери) та глибина робіт. Породні та рудні масиви родовищ складної структури класифікують за показниками тріщинуватості та блочності. Оцінкою стійкості горизонтального та вертикального оголень прийнято еквівалентний проліт [25, 26].

Перспективні напрями досліджень. Автори статті вважають перспективними дослідженнями для прогнозу швидкості коливань гірського масиву і закладення що твердіє, від наведеної маси заряду на ступінь уповільнення при вибуховій відбійці руди для умов родовищ складної структури. Вони залежать від сейсмоакустичних

властивостей гірського масиву та умов підривання, а також значення допустимої швидкості зміщення ґрунту в основі об'єктів, що захищаються. Перехід до комбінованих технологій розробки рудних родовищ складної структури із застосуванням геотехнологій, а також відпрацювання рудних покладів горизонтальними шарами з закладкою, що твердіє. Ці технології відповідають вимогам природо- та ресурсозбереження за рахунок підвищення повноти використання надр (втрати 4-5%) та якості сировини, що видобувається (розубоювання 10-15%), зниження обсягів порожніх порід, що видобуваються на денну поверхню та їх переробки на збагачувальному комбінаті, що позитивно позначається на гідрометалургійному переділі та екології гірничодобувного регіону [27, 28].

І на сам кінець, розробка профілактичних заходів щодо мінімізації негативних наслідків на здоров'я робітників уранодобувної та металургійної промисловості першочергові наукові, практичні та соціальні завдання, які потребують нагального вирішення [19, 29, 30].

Висновки. На підставі результатів багаторічних досліджень проведення комплексу науково-дослідних робіт при підземній розробці родовищ складної структури в енергопорушених масивах ДП «СхідГЗК», показано функціональний взаємозв'язок між величиною напруг гірського масиву та кількістю імпульсів (звуків руйнування) за хвилину, що характеризують його структурні (*a*) та міцнісні (*b*) властивості, описується криволінійною залежністю виду $y = ax^b$, що дозволяє з ймовірністю 0,8 оперативно встановлювати стійкі параметри камер.

Виконано оцінку та зроблено прогноз різних форм прояву гірського тиску за коефіцієнтом концентрації напруг в межах $0,91 < Kv < 0,70$, з урахуванням умов пружної поведінки гірських порід. Як допустиму відносну деформацію прийнято її величину $\varepsilon = 0,0002 - 0,0003$, що забезпечує гірничотехнічну та екологічну безпеку та стійкість гірських масивів при багаторазовому провадженні вибухових робіт. Запропоновано також розрахункові формули з обґрунтування сейсмічно безпечних параметрів камер та ймовірнісна шкала стійкості для різних категорій об'єктів, що охороняються.

Авторами статті обґрунтовано, що при зу-

стрічно-направленому ініціюванні із застосуванням неелектричних засобів підривання свердловинних зарядів вихід негабариту (v_n) зменшується і знаходиться в експоненціальній залежності від лінії найменшого опору (W) типу $v_n = 5,57 \times e^{0,022W}$. Це дозволяє збільшити вагу зарядів ВР на одне уповільнення в межах віяла свердловин із 300 до 1250 кг та знизити швидкість сейсмічних коливань масиву стелини з 0,46 до 0,28 см/с.

Доведено, що зустрічно-направлене ініціювання свердловинних зарядів у комплексі з використанням неелектричних засобів їх підривання дозволяє збільшити тривалість вибухової дії на масив, роблячи позитивний вплив на стійкість стелини за рахунок зниження в 1,7–2,3 рази динамічної дії вибуху, що зменшує в 1,5 рази вихід радіоактивних газоподібних речовин через тріщини на денну поверхню. Окрім цього, забезпечується й більш якісне подрібнення уранових руд: вихід негабариту, порівняно з традиційним способом відбійки масиву, зменшується на 20-24 % відповідно.

Впровадження комбінованих технологій, коли багаті руди видають на денну поверхню та переробляють на ГМЗ, а бідні й некондиційні вилуговують у підземних блоках (ПБВ) та штабелях на земній поверхні (купне вилуговування) з отриманням металів, будівельної сировини, знесолоної води, газів, кислот та низькосортних лугів. Такі технології ефективні, коли 40% багаті руди видається на поверхню, а 60% бідної, некондиційної та забалансової руди вилуговується під землею. При однаковій продуктивності підприємства з гірничої маси, продуктивність з металу підвищується вдвічі.

На основі проведених досліджень та дослідно-промислових робіт щодо інтенсифікації процесів за критерієм наведеного прибутку з урахуванням збереження земної поверхні, а також завданих (або запобіганню) збитків (економічних наслідків) навколишньому природному середовищу та витрат на соціальний захист населення згідно відповідних екологічних програм [19], що проживає в зоні впливу гірничих підприємств (добувних та переробних), запропоновано продовжити дослідження та закладати кошти (за рахунок підприємств, місцевих та центральних органів державної влади) для проведення наступних заходів:

- широке залучення у виробництво техноген-

них запасів хвостів збагачення руд, а також переробка відвалів позабалансових за вмістом корисних компонентів, руд на модульних установках;

- глибинна переробка техногенних відходів (хвостів збагачення), що мають велику різноманітність мінеральних форм порівняно із звичайними рудами;
- віброактивація компонентів твердіючих закладних сумішей на всіх стадіях: від приготування та подальшого транспортування до місця їх заповнення;
- рекультивація території промислових майданчиків та прилеглої до них території після закінчення експлуатації;
- озеленення рекультивованої території трав'яною та чагарниковою рослинністю;
- постійний моніторинг компонентів навколишнього природного середовища, включаючи гідрогеологію, особливо при впровадженні геотехнологічних методів вилуговування металів із руд у надрах та зоні впливу гірських об'єктів.
- дистанційне картування індикаторів небезпеки територій на детальному (об'єктовому) рівні окремих екологічно небезпечних об'єктів території за межами локацій самих шахтних майданчиків для порівняння [30].

ЛІТЕРАТУРА

1. Добыча и переработка урановых руд: монография / под общ. ред. А. П. Чернова. – К. : Адеф-Украина, 2001. – 238 с.
2. Paul A., Murthy V. M.S.R., Prakash A. K. 2018. Estimation of rock load in development workings of underground coal mines. *A modified RMR approach. Current Science*. Vol. 114 (10). pp.2167 – 2174.
3. Aben, E., Markenbayev, Z., Khairullaev, N., Myrzakhmetov, S., Aben, K. 2019. Study of change in the leaching solution activity after treatment with a cavitator. *Mining of Mineral Deposits*, №13 (4). pp. 114-120. doi: <http://doi.org/10.33271/mining13.04.114>.
4. Malanchuk, Z., Korniienko, V., Malanchuk, Y., Soroka, V., Vasylichuk, O. 2018. Modeling the formation of high metal concentration zones in man-made deposits. *Mining of Mineral Deposits*. №12 (2), pp.76-84. doi: <http://doi.org/10.15407/mining12.02.076>
5. Stupnik, M., Kalinichenko, O., Kalinichenko, V., Pysmennyi, S., Morhun, O. 2018. Choice and substantiation of stable crown shapes in deep-level iron ore mining. *Mining of Mineral Deposits*. №12 (4). pp. 56–62. doi: <http://doi.org/10.15407/mining12.04.056>.
6. V. Lyashenko, A. Vorob'ev, V. Nebohin, K. Vorob'ev. 2018. Improving the Efficiency of Blasting Operations in Mines with the Help of Emulsion Explosives *Mining of Mineral Deposits*. №12 (1), pp. 95-102. <https://doi.org/10.15407/mining12.01.095>.
7. Lyashenko, V., Khomenko, O., Topolnij, F., Helevera, O. 2020. Substantiation of technologies and technical means for disposal of mining and metallurgical waste in mines. *Technology Audit and Production Reserves*, №3 (53), pp. 4-11. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.200897>.
8. Lyashenko, V., Andreev, B., Dudar, T. 2022. Substantiation of mining-technical and environmental safety of underground mining of complex-structure ore deposits. *Mining of Mineral Deposits*. № 16 (1). pp. 43-51. <https://doi.org/10.33271/mining16.01.043>.
9. Mac Carthy J., Nosrati A., Skinner W., Addai-Mensah J. Atmospheric acid leaching mechanisms and kinetics and rheological studies of a low grade saprolitic nickel laterite ore. *Hydrometallurgy*. 2016. Vol. 160, pp. 26-37.
10. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap Leaching Technology-Current State, Innovations, and Future Directions: A Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016. Vol. 37. pp.73-119.
11. Onika, S.G., Rysbekov, K.B., Aben, E.K., 2020. Bahmagambetova G.B. Leaching rate dependence on productive solution temperature. *Vestnik KazNRTU*. №142(6), pp.700-705. <https://doi.org/10.51301/vest>
12. Kovalchuk I. Purification of mineralized waters from U (VI) compounds using bentonite/iron oxide composites. /Kovalchuk I., Tobilko V., Kholodko Yu., Zahorodniuk N., Kornilovych B. //Technology audit and production reserves. – 2020. – Т. 3. №. 3 (53). pp. 12-18.
13. Dudar T.V., Lysychenko G.V., Buhera M. Uranium resources of Ukraine: geology, mineralogy and some mining aspects. *Monograph. Lambert Publishing House*.2018. Riga,100 с.
14. Jinhui Li, Deshun Li, Zhifeng Xu, Chunfa Liao, Ye Liu. Selective leaching of valuable metals from laterite nickel ore with ammonium chloride-hy-

drochloric acid solution. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 179, pp. 24–30.

15. Пухальський В. Н. Опыт отработки уранових месторождений Украины. Комбинированные технологии разработки месторождений глубокими карьерами и шахтами: сб. научн. трудов. 2012. Кривой Рог, с.159–162.

16. Chetveryk, M., Bubnova, O., Babi, K. The rate of deformation development in the rock massif on the basis of surveying monitoring on the earth surface. *Mining of Mineral Deposits*. 2017. №11 (1), pp. 57-64. <https://doi.org/10.15407/mining11.01.057>.

17. Bei Yuan J., Awad Y.M., Beckers F., Tsang D.C., Ok Y.S., Rinklebe J. 2017. Mobility and phytoavailability of As and Pb in a contaminated soil using pine sawdust biochar under systematic change of redox conditions. *Chemosphere*, Vol. 178, pp. 110-118. DOI: 10.1016/j.chemosphere. 2017.03.022.

18. Deng D. Q., Liu L., Yao Z. L., Song K. I., Lao D. Z. 2017. A practice of ultra-fine tailings disposal as filling material in a gold mine. *J. Environ. Manage.* Vol. 196, pp. 100–109.

19. Сердюк А. М. Екологія довкілля та безпека життєдіяльності населення у промислових регіонах України. / А. М. Сердюк, В. П. Стусь, В. І. Ляшенко. – Дніпропетровськ.: Пороги, 2011. – 486 с.

20. Коваленко Г. Д. Радиоэкология Украины / Г. Д. Коваленко. – Харьков: ИНЖЕК, 2013. – 344 с.

21. Cheng Y., Jiang H., Zhang X., Cui J., Song C., Li X. 2017. Effects of coal rank on physicochemical properties of coal and on methane adsorption. *International Journal of Coal Science & Technology*. Vol. 4. Iss. 2, pp.129–146. DOI: 10.1007/s40789-017-0161-6.

22. Сучасний стан виробництва та споживання уранової сировини для потреб ядерної енергетики. / Т. В. Дудар, Г. Д. Коваленко, О. В. Фролов, Т. А. Орленко. // Екологічна безпека та технологія захисту довкілля. – 2019. – №1. – С. 26–35.

23. Haifeng Wang, Yaqun He, Chenlong Duan, Yuemin Zhao, Youjun Tao, Cuiling Ye. 2012. Development of Mineral Processing Engineering Education in China University of Mining and Technology. *Advances in Computer Science and Engineering*. –

AISC 141. Springer-Verlag. Berlin. Heidelberg, pp. 77–83.

24. Antonelli C., Feder C. 2020. The new direction of technological change in the global economy. *Structural Change and Economic Dynamics*, №52, pp. 1–12.

25. Rysbekov, K., Huayang, D., Kalybekov, T., Sandybekov, M., Idrissov, K., Zhakypbek, Y., Bakhmagambetova, G. (2019). Application features of the surface laser scanning technology when solving the main tasks of surveying support for reclamation. *Mining of Mineral Deposits*, 13(3), pp. 40-48. DOI:10.33271/mining13.03.040.

26. Kalinichenko, V., Dolgikh, O., Dolgikh, L., & Pysmennyi, S. 2020. Choosing a camera for mine surveying of mining enterprise facilities using unmanned aerial vehicles. *Mining of Mineral Deposits*, 14(4), pp.31-39. DOI: 10.33271/mining14.04.031.

27. Kornilovych, B., Wireman, M., Ubaldini, S., Guglietta, D., Koshik, Y., Caruso, B., Kovalchuk, I. 2018. Uranium Removal from Groundwater by Permeable Reactive Barrier with Zero-Valent Iron and Organic Carbon Mixtures: *Laboratory and Field Studies*. *Metals*, 8 (6), 408. doi: <http://doi.org/10.3390/met8060408>.

28. Lyashenko, V., Khomenko, O., Chekushina, T., Topolnij F., Dudar, T. 2020. Assessment of environmental and resource-saving technologies and technical means for processing and disposal of man-made formations and waste. *Technology Audit and Production Reserves*, 4 (3 (54)), pp. 21–28. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.210666>.

29. Lyashenko, V., Khomenko, O., Chekushina, T., Dudar, T., Topolnij F. 2021. Substantiation of efficiency and environmental safety of leaching metals from ore: ways of development and prospects. *Technology Audit and Production Reserves*, 3 (3 (59)), 19–26. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.235288>.

30. Станкевич С. А., Дудар Т. В., Свіденюк М. О. 2019. Застосування багаточасової радарної інтерферометрії для виявлення зміщення земної поверхні для території урановидобування в Україні. *Екологічна безпека*, (2), с. 18–23. DOI: [10.30929/2073-5057.2019.2.18-23](https://doi.org/10.30929/2073-5057.2019.2.18-23).

УДК 504.4.054

ОСНОВНІ МЕТОДОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ НОРМУВАННЯ СКИДАННЯ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН У ВОДНІ ОБ'ЄКТИ ІЗ ЗВОРОТНИМИ ВОДАМИ

Проскурнін О. А.¹, Гуленко О. Б., Громова І. Ю., Печений В. Л.²
¹НДУ «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем»,
вул. Бакуліна, 6, м. Харків, 61166
proskurnin_o@ukr.net
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9774-9306>

²Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, м. Київ, 03035

В статті розглядається методологія нормування скидання забруднюючих речовин із зворотними водами підприємств-водокористувачів у водні об'єкти. Метою встановлення допустимого скидання є збереження та відновлення водних ресурсів. Проте, існуюча методологічна база розрахунку гранично допустимого скидання (ГДС) речовин не забезпечує екологічну безпеку водовідведення. Вказується, що прийнятий в Україні підхід до нормування відрізняється від загальноєвропейського, де ухвалено технологічні нормативи. Останні означають встановлення допустимого рівня скидання забруднюючих речовин, виходячи з найкращих доступних технологій очищення цієї категорії зворотних вод. Наводяться аргументи на користь того, що в Україні доцільно зберегти існуючий підхід до розрахунку ГДС, в основі якого лежить безпосередній розрахунок маси речовини, скидання якої не призводить до перевищення гранично допустимих концентрацій речовин у воді водних об'єктів у зоні впливу скидання. Це пояснюється географічними та економічними особливостями України, а також екологічними наслідками бойових дій на території країни. Наголошується з посиланням на Директиву 2000/60/ЄС, що збереження існуючого підходу до розрахунку ГДС не суперечить європейським принципам, оскільки європейське водне законодавство надає пріоритет у водоохоронній політиці окремим країнам у

відповідності до їх національних програм. Однак, існуюча в Україні методологія нормування скидання забруднюючих речовин у водні об'єкти потребує вдосконалення у низці напрямків. Зокрема, врахування комплексних показників якості води водоприймачів зворотних вод; розрахунок мінімально допустимого вмісту розчиненого кисню у зворотних водах; врахування імовірного характеру чинників антропогенного впливу на водний об'єкт у зоні його забруднення зворотними водами. У статті докладно аргументується актуальність удосконалення методології нормування скидання за кожним із названих напрямків, та вказуються можливі шляхи дій.

Ключові слова: екологічна безпека, нормування, допустиме скидання, зворотні води, забруднююча речовина, комплексний показник, розчинений кисень, екологічний ризик.

Methodological problems of standardizing the discharge of pollutants in water facilities with return water. Proskurnin O., Hulenko O., Hromova I., Pechenyi V.

The article deals with the methodology of standardizing the discharge of polluting substances with return waters of water-using enterprises into water bodies. The purpose of establishing a permissible discharge is to preserve and restore water

resources. However, the existing methodological basis for calculating the maximum allowable discharge of substances does not ensure the environmental safety of water drainage. It is indicated that the approach to standardization adopted in Ukraine differs from the general European one, where technological standards are adopted. The latter means establishing a permissible discharge level of pollutants based on the best available treatment technology for this category of return water. Arguments are given in favor of the fact that in Ukraine it is advisable to preserve the existing approach to calculating the maximum permissible discharge, which is based on the direct calculation of the substance mass, the discharge of which does not lead to exceeding the maximum permissible concentrations of substances in the water of water bodies in the discharge influence zone. This is justified by the geographical and economic features of Ukraine, as well as the environmental consequences of hostilities on the territory of the country. It is emphasized with reference to Directive 2000/60/EU that the preservation of the existing approach to the calculation of the maximum allowable discharge does not contradict European principles since the European water legislation gives priority in the water protection policy to individual countries in accordance with their national programs. However, the existing Ukrainian methodology for regulating the discharge of pollutants into water bodies requires improvements in a number of directions. In particular: considering combined indicators of water quality of return water intakes; calculating the minimally permissible content of dissolved oxygen in return waters; considering the probabilistic nature of the anthropogenic influence on the water body in the zone of its pollution by return waters. The article argues in detail the relevance of improving the methodology of discharge regulation in each of the aforementioned directions and indicates possible courses of action.

Keywords: *environmental safety, regulation, permissible discharge, return water, pollutant, combined indicators, dissolved oxygen, environmental risk.*

Одним із основних напрямків природоохорони в економічно розвинених країнах є нормування природокористування. Так, для під-

приємств-водокористувачів розробляються та затверджуються нормативи водовідведення – гранично допустимі скидання (ГДС) забруднюючих речовин, що надходять у водні об'єкти (ВО) зі зворотними (стічними, скидними, дренажними) водами комунальних, промислових та сільськогосподарських підприємств. Метою встановлення даних нормативів є збереження та відновлення водних ресурсів через недопущення забрудненості природної води вище за встановлений допустимий рівень [1-3].

В організаційному плані система встановлення ГДС працює досить надійно, оскільки наявність проекту ГДС є необхідною умовою для надання підприємству дозволу на спецводокористування [3]. Проте, методологічна база розрахунку ГДС в Україні не повністю забезпечує екологічну безпеку скидання зворотних вод (ЗВ). Так, за даними державного моніторингу річкових басейнів, невідповідність якості води діючим санітарно-гігієнічним вимогам становить понад 60% [4]. Ситуація загострюється на малих річках з невеликою асимілюючою спроможністю. З огляду на це, вдосконалення методологічної бази нормування водовідведення є актуальним завданням.

Діючий нині в Україні підхід до нормування водовідведення відрізняється від загальноєвропейського. В останньому запроваджена прив'язка до існуючих технологій очищення. А саме, для різних видів ЗВ залежно від типу та об'єму виробництва встановлюються технологічні стандарти на склад зворотної води. При цьому орієнтир робиться на існуючі найкращі доступні технології очищення (ВАТ – *best available techniques*) [5-6].

Частково вказаний принцип є і в українському водному законодавстві. Відповідно до Правил охорони поверхневих вод [7], для комунальних підприємств, що мають повний цикл біологічного очищення, склад стічних вод на виході з очисних споруд за показниками БСК₅, ХСК та завислі речовини не повинен перевищувати відповідних значень: 15 мг/дм³, 80 мг/дм³ та 15 мг/дм³. Однак у загальному випадку розрахунок ГДС проводиться відповідно до Методичних рекомендацій (МР) [8], в основі яких лежить безпосередній розрахунок маси речовини, скидання якої не призводить до перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) у ВО в зоні дії скидання.

У зв'язку з наявністю різниці у підходах до нормування скидання забруднюючих речовин, у науковій літературі порушувалося питання про повний перехід українського законодавства в цій частині на європейські стандарти [9]. Однак не зважали на наступні важливі обставини. По-перше, європейське принципи водоохорони не носять характер абсолютного диктату. Стаття 13 Директиви 2000/60/ЄС [10] вказує на те, що в різних країнах існують специфічні умови, і пріоритет у виборі водоохоронної політики має залишатися за окремими країнами відповідно до їх національних програм. Отже, збереження в Україні існуючого підходу до визначення ГДС не входить у суперечність із європейським законодавством. По-друге, для переходу до технологічних нормативів недостатньо внесення змін до водного законодавства. Потрібна розробка ще і методологічної бази, для цього необхідно проаналізувати великий обсяг науково-дослідної роботи з дослідження специфічних умов України, до яких належать такі:

- територіально Україна є найбільшою державою Європи із суттєвими регіональними відмінностями як у природно-кліматичному плані, так і у плані господарської діяльності; ця обставина ускладнює управління екологічною безпекою та не дозволяє механічно копіювати водоохоронне законодавство інших країн;
- існуючий підхід до нормування діє в Україні з 1990 року, і загалом відповідає загальному національному водоохоронному законодавству;
- в країні високий рівень зношування систем водоочищення, значна частина яких експлуатується ще з радянських часів; ця обставина робить актуальним оптимізаційний підхід до нормування водовідведення ЗВ.

Але пошук у науковій літературі результатів відповідних наукових досліджень не дав результату.

Крім того, з огляду на екологічні наслідки бойових дій на території країни, прийнятий в Україні принцип розрахунку ГДС бачиться кращим через його більшу гнучкість.

Отже, у найближчій перспективі доцільно зберегти існуючий принцип нормування надходження забруднюючих речовин до ВО зі ЗВ [11].

При цьому актуальним є його вдосконалення у низці аспектів. Зокрема, щодо використання комплексних показників якості води, розрахунку допустимого вмісту розчиненого кисню у ЗВ та врахування імовірнісного характеру факторів антропогенного впливу на водний об'єкт у процесі його забруднення зворотними водами.

Метою цієї статті є висвітлення зазначених методологічних проблем нормування скидів забруднюючих речовин та пропозиція шляхів їх вирішення.

Використання комплексних показників якості води. Однією з методологічних проблем нормування водовідведення є неврахування комплексних показників якості води водоприймачів ЗВ [12,13]. Тобто за кожній забруднюючій речовині якість природної води може бути в межах норми, але через схожість шкідливого ефекту від попадання в ВО різних речовин, в цілому вода може бути непридатною для використання. Крім того, саме комплекс дій різних речовин впливає на біорізноманіття мікроорганізмів і, як наслідок, екологічний стан ВО. Згідно з науковими дослідженнями вітчизняних вчених (Г. О. Сухоруков, О. К. Кузін, М. С. Коваленко, Ю. І. Капаніна та інші), проведених ще у 80-х роках минулого століття, у задачах нормування скидання ЗВ доцільно проводити комплексний облік забруднюючих речовин за їх лімітуючими ознаками шкідливості (ЛОШ). Цей облік полягає у групуванні забруднюючих речовин за ЛОШ, виходячи з подібності шкідливої дії на живі організми при мінімальних концентраціях даних речовин. У водних об'єктах господарсько-побутового водокористування та питного водопостачання розглядаються такі ЛОШ:

- органолептична;
- загальносанітарна;
- санітарно-токсикологічна.

У водних об'єктах рибогосподарського призначення, крім перерахованих вище, також розглядаються такі групи ЛОШ:

- токсикологічна;
- рибогосподарська.

Врахування кожної ЛОШ полягає у вимозі дотримання наступної умови:

$$\sum_{j=1}^N \frac{C_j}{ГДК_j} \leq 1, \quad (1)$$

де j, N – відповідно індекс та кількість речовин за даною ЛОШ;

C_j – концентрації речовин.

Ліва частина нерівності (1) по суті означає комплексний показник якості води. У ряді наукових джерел сума наведених до ГДК концентрацій речовин називається «інтегральним показником». Однак, на думку авторів, більш адекватним найменуванням є «комплексний», оскільки розглядаються фактори забруднення різної природи, які не підлягають прямому підсумовуванню. Для водних об'єктів рибогосподарського призначення умова (1) повинна виконуватися для всіх нормованих речовин, що містяться у воді. Для водних об'єктів господарсько-побутового водокористування та питного водопостачання умова (1) розглядається лише речовин 1-го та 2-го класів небезпеки.

Окрім наукового, є також, правовий аспект проблеми. У травні 2022 р. було затверджено Гігієнічні нормативи якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення (далі – Гігієнічні нормативи) [14]. У цих нормативах міститься вимога врахування ЛОШ для речовин 1 та 2 класів небезпеки, що визначаються Всесвітньою організацією охорони здоров'я (ВООЗ). Як результат, чинні Правила та МР суперечать Гігієнічним нормативам. Відтак, існує необхідність коригування методології нормування водовідведення щодо врахування комплексних показників якості природної води. Вона викликана, по-перше, тим, що неврахування комплексних показників не забезпечує екологічну безпеку скидання ЗВ, і, по-друге, протиріччям з Гігієнічними нормативами, що діють в Україні. Як механізм розрахунку ГДС з урахуванням комплексних показників слід вибрати удосконалений оптимізаційний підхід, наведений у роботі [2], або використовувати метод знижувальних коефіцієнтів [3].

Нормування вмісту розчиненого кисню у зворотних водах. Перелік речовин, за якими здійснюється розрахунок ГДС, визначається Постановою КМУ № 1100 від 11.09.1996 року [15]. Згідно з цією Постановою, до списку обов'язкових для нормування речовин входить розчинений кисень, який, на відміну від забруднюючих речовин, сприятливо впливає на якісний стан

водної екосистеми. Тому погіршення якості природної води за показником розчинений кисень за рахунок надходження до неї ЗВ полягає не у збільшенні концентрації кисню, а, навпаки, у можливому зниженні нижче за допустимий рівень. Однак існуюча методологія не передбачає розрахунок мінімального рівня кисню у ЗВ. Тому її вдосконалення щодо обліку розчиненого кисню є актуальним.

Багатофакторне дослідження закономірностей формування кисневого режиму у ВО проводилось у рамках багатьох робіт ВНДІВО Всесоюзний науково-дослідний інститут з охорони вод (ВНДІВО) (нині УкрНДІЕП) у 1970 – 1980 роках. Було доведено, що надходження та витрата кисню у воді визначається великою кількістю хімічних та біологічних факторів, пов'язаних із гідрологічними характеристиками ВО, біорізноманіттям мікрофлори та вищої водної рослинності. Проте у задачах нормування доцільно прийняти спрощений підхід, що враховує дію двох протилежних процесів [16]:

- споживання кисню органічними речовинами, що визначається інтегральним показником БСК (біохімічне споживання кисню за 20 діб);
- реаерація – надходження кисню з атмосферного повітря та його розчинення у воді ВО.

Істотною відмінністю розрахунку допустимої концентрації розчиненого кисню порівняно з аналогічним розрахунком для забруднюючих речовин полягає в тому, що гранично допустимою концентрацією кисню в ВО є не верхня, а нижня допустима межа, що визначається категорією водокористування.

При розрахунку концентрації розчиненого кисню вводиться до розгляду поняття дефіцит кисню D – різниця між концентрацією кисню у воді при повному насиченні (тобто у межах його розчинності при заданих температурі та тиску) $C_{нас}$ та його фактичною концентрацією C :

$$D = C_{нас} - C \quad (2)$$

Процес реаерації описується експоненційною залежністю подібно до процесу самоочищення:

$$D(t) = D_0 \cdot \exp(-k_p t), \quad (3)$$

де t – поточний час, доба;

D_0 – початковий дефіцит кисню, мг/дм³;

k_p – константа реаерації, 1/добу.

Дія обох процесів (біохімічного споживання та реаерації), описується формулою Фелпса та Стрітера

$$D(t) = \frac{k_{БСК} \cdot C_{БСК}}{k_p - k_{БСК}} \cdot (\exp(-k_{БСК}t) - \exp(-k_p t)) + D_0 \cdot \exp(-k_p t), \quad (4)$$

де $k_{БСК}$ – коефіцієнт неконсервативності показника БСК, 1/добу; $C_{БСК}$ – початкове значення величини БСК у воді, мг/дм³.

Остаточна концентрація розчиненого кисню визначається як різниця

$$C(t) = C_{нас}(T) - D(t). \quad (5)$$

У роботах [17, 18] був запропонований варіант оптимізаційної задачі для розрахунку ГДС, де за функцію мети бралось максимально допустиме комплексне техногенне навантаження на ВО, що не призводить до порушення необхідних норм якості води в контрольних створах (КС) за кожним показником. Змінними, що оптимізуються, були концентрації забруднюючих речовин у ЗВ. Бачиться доцільним застосування цього підходу і для знаходження мінімально допустимої концентрації кисню у ЗВ. Можливий вид такої оптимізаційної задачі наведено у роботі [19].

У роботах [17, 18] був запропонований варіант оптимізаційної задачі для розрахунку ГДС, де за функцію мети бралось максимально допустиме комплексне техногенне навантаження на ВО, що не призводить до порушення необхідних норм якості води в контрольних створах (КС) за кожним показником. Змінними, що оптимізуються, були концентрації забруднюючих речовин у ЗВ. Бачиться доцільним застосування цього підходу і для знаходження мінімально допустимої концентрації кисню у ЗВ. Можливий вид такої оптимізаційної задачі наведено у роботі [19].

Врахування імовірнісного характеру факторів антропогенного впливу на водний об'єкт. Також недоліком існуючого підходу до нормування скидання ЗВ є неврахування імовірнісного характеру чинників антропогенного впливу на ВО у зоні забруднення зворотними водами. У методичній літературі непостійність складу ЗВ обу-

мовлена лише вимогою за фактичні концентрації речовин для розрахунку ГДС обирати середні арифметичні значення [8]. Проте, загалом розрахунок ГДС носить детермінований характер: розраховуються допустимі концентрації речовин у ЗВ, які не призводять до перевищення законодавчо затверджених величин ГДС речовин у ВО. Як підсумок, є актуальним удосконалення методології розрахунку допустимого складу ЗВ, включивши до розгляду його імовірнісний характер і, таким чином, імовірнісний характер параметрів стану ВО в зоні впливу скидання. Це дозволить більшою мірою враховувати реальний характер процесу забруднення ВО.

Найбільш перспективним напрямком у цьому разі бачиться використання механізму оцінки екологічного ризику [20, 21]. Оскільки в задачах нормування водовідведення розглядається лише можливий факт перевищення ГДС у природній воді без аналізу його наслідків для екосистеми та людини, то доцільно за екологічний ризик обирати ймовірність порушення норм якості водного об'єкта внаслідок скидання ЗВ:

$$r = P(C_{КС} > ГДС), \quad (6)$$

де P – позначення ймовірності; $C_{КС}$ – концентрація речовини у КС.

У цьому випадку величина $C_{КС}$ розглядається як функція концентрації речовини у ЗВ:

$$C_{КС} = C_{КС}(C_{ЗВ}), \quad (7)$$

де $C_{ЗВ}$ – концентрація речовини у ВО.

Задача зводиться до знаходження концентрації $C_{ЗВ}$, при якій матиме місце:

$$P(C_{КС}(C_{ЗВ}) \leq ГДС) \geq 1 - \alpha, \quad (8)$$

де α – прийнятий гранично допустимий ризик.

Якщо розглядається найпростіший випадок (один випуск та нормальним законом імовірнісного розподілу концентрації речовини), то шукана концентрація $C_{ЗВ}$ знаходиться з рівняння

$$\frac{1}{B\sqrt{2\pi} \cdot C_{ЗВ} \cdot v} \cdot \int_{-\infty}^{ГДС} \exp\left(-\frac{(y - A - B \cdot X)^2}{2B^2 C_{ЗВ}^2 v^2}\right) dy = 1 - \alpha, \quad (9)$$

де $A = C_{фон} \cdot Q_{фон} / Q$, $B = q / Q$; Q – відповідно витрата зворотних вод та витрата води водотоку в КС; $C_{фон}$ – концентрація речовини у фоновому

створі вище за течію випуску ЗВ; $Q_{\text{фон}}$ – витрата водотоку у фоновому створі; v – коефіцієнт варіації концентрації у ЗВ.

Рівняння (9) немає аналітичного розв’язання, проте може бути розв’язане чисельними методами.

Висновок. Методологія нормування скидання забруднюючих речовин із ЗВ у водні об’єкти потребує удосконалення за наступними напрямками:

- врахування комплексних показників якості води водоприймачів ЗВ;
- розроблення механізму розрахунку мінімально допустимого вмісту розчиненого кисню у ЗВ;
- врахування імовірнісного характеру чинників антропогенного впливу на ВО у процесі його забруднення зворотними водами.

Напрямок подальших досліджень у галузі методології нормування скидання забруднюючих речовин із ЗВ є розробка методичних пропозицій щодо врахування екологічних наслідків бойових дій на території України. Зокрема, врахування наслідків руйнування гідротехнічних споруд та забрудненості басейну річок нафтопродуктами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Конституція України: станом на 01 верес. 2016 р. : відповідає офіц. тексту Харків: Право. 2016. 82 с.
2. Про тваринний світ: Закон України від 13.12.2001 р. № 2894-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2894-14#Text> (дата звернення 21.08.2022).
3. Водний кодекс України. Київ: Видавничий Дім “Ін Юре”, 2004. 138 с.
4. Маджд С. М. Розвиток наукових основ басейнового принципу управління екологічною безпекою техногенно трансформованих поверхневих водних об’єктів : дис. техн. наук : 21.06.01 / Маджд С. М. – Київ, 2019. – 385 с.
5. Initial dilution and mixing zones for discharges from coastal and estuarine out falls, Policy 28, september, 1998//www.cormix.info/pdf/SEPA-policy 28.
6. Passos G. J. S. CORMIX Model Application in Time Series for Different Scenarios of Effluent Types and Discharge Configurations / G. J. S. Passos, T. Bleninger // E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, 28 June – 3 July, 2015, The Hague, The Netherlands.
7. Правила охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами: постанова Каб. Міністрів України від 25.03.1999 р. № 465. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/465-99-п> (дата звернення 30.05.2019).
8. Методичні рекомендації з розроблення нормативів гранично допустимого скидання забруднюючих речовин у водні об’єкти із зворотними водами (затв. наказом Міндовкілля від 05.03.2021 р. № 173) // <https://mepr.gov.ua/documents/3331.html>
9. Уберман В.І. Принципи та тенденції українського регулювання скидання забруднювальних речовин. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення*: матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 13-17. 09. 2021 р.) Харків: Стиль-Видав, 2021. С. 202–209.
10. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities*. L. 327. 72 p.
11. Проскурнін О. А. Науково-методологічні основи екологічного нормування скиду зворотних вод до річкової системи : дис. техн. наук : 21.06.01 / Проскурнін О. А. – Київ, 2021. – 357 с.
12. Екологічне нормування скидів стічних вод з урахуванням комплексного показника якості води водоприймачів / О. А. Проскурнін, Б. Н. Комариста, В. І. Бендюг, О. А. Дем’янова. // Науковий вісник будівництва. – 2021. – №2. – С. 299–304.
13. Проскурнін О. А., Божко Т. В., Жук В. М., Комариста Б. Н., Бендюг В. И. Необхідність врахування комплексних показників якості води в задачах нормування складу зворотних вод. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення*: тези доповідей XII Міжнар. науково-практичної конференції. м. Харків, 15-16 вересня 2022 року. Харків, 2022. С. 236-240.
14. Гігієнічні нормативи якості води водних об’єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://ips.ligazakon.net/document/RE37860> (дата звернення 07.08.2022.).
15. Про порядок розроблення і затвердження

нормативів гранично допустимого скидання забруднюючих речовин та перелік забруднюючих речовин, скидання яких нормується: постанова Каб. Міністрів України від 11.09. 1996 р. № 1100. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1100-96-p#Text> (дата звернення: 21.08.2022).

16. Черкинский С. Н. Санитарные условия спуска сточных вод в водоемы / С. Н. Черкинский – М: Стройиздат, 1977. - 224 с.

17. Проскурнин О.А. Оптимизационный подход к нормированию состава отводимых в водоток сточных вод для случая неполного разбавления. *Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки*. 2012. №34. С. 140-151.

18. Проскурнин О. А. Минимизация затрат на очистку сточных вод в рамках задачи нормирования водоотведения / О. А. Проскурнин. // *Экология и промышленность*. – 2013. – №3. – С. 22–26.

19. Проскурнин О.А. Нормирование содержания растворенного кислорода в сточных водах, поступающих в водный объект / О. А. Проскурнин. // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2015. – № 1/4 (21). – С. 13–16.

20. Rybalova O., Malovanyy M., Bondarenko O., Proskurnin O., Belokon K., Korobkova H. Method Of Assessing The Potential Risk To The Health Of The Population During Recreational Water Withdrawal. *Journal of Ecological Engineering*. 2022. № 23(5). С. 81–91

21. Rybalova O., Proskurnin O., Smirnova S., Belan S.V. Using Monte – Carlo method for assessment of environmental risk caused by wastewater discharges into a watercourse. *Efektivní nástroje moderních věd – 2014: Materiály X Mezinárodní vědecko – praktická konference*, Praha, 27 dubna - 05 května 2014 roku, Praha, 2014. P. 38-44.

УДК 504.06

ДО ПИТАННЯ ЗМЕНШЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗЕЛЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В БУДІВНИЦТВІ

Гончаренко А. В.

Київський національний університет будівництва і архітектури
проспект Повітряних Сил, 31, Київ, 03037

Питання взаємозв'язку якісного стану атмосферного повітря в міському середовищі та новітніх технологій «зеленого будівництва» потребує більш ретельного вивчення. Нині невід'ємною частиною таких досліджень є використання сучасних програмних продуктів на платформі BIM-технологій, а також використання нейронних мереж. В статті автором пропонується алгоритм вирішення задачі щодо прийняття управлінських рішень в питаннях реконструкції і будівництва залежно від забруднення атмосферного повітря за допомогою ІТ технологій. Апаратно-програмний комплекс при цьому, використовує хмарні технології. Аналіз проектної складової програмного додатку з використанням моделей моніторингу на базі загортової нейронної мережі дозволив автору розглянути реалізацію задачі щодо створення власної інформаційної системи ідентифікації яка забезпечуватиме відображення між входом (наприклад, стан будівлі чи споруди до реконструкції, оновлення) та виходом; звіт та рекомендації стосовно засобів та способах модернізації. Така структура виявляє переваги та недоліки архітектур нейронних мереж зі згортокою при проектуванні програмного додатка. Вона здійснює пошук та обробку актуальної інформації; проводить аналіз схожих програмних додатків з метою виявлення ключових переваг та недоліків; а також виконує вибір, тестування та реалізація програмного додатка для втілення поставленої мети. Виконує розробки архітектури програмного додатка; технічного завдання; матриці відповідності; терміни виконання проекту тощо.

Даний підхід дозволяє одночасно робити розрахунки із зменшення забруднення атмосферного повітря протягом життєвого циклу конструкції.

Постійний розвиток ІТ технологій та нейронних мереж дає можливість регулярного розвитку систем та підходів до моніторингу, в тому числі і оновлення самого програмного продукту, наповнення його новими даними, матеріалами, а також технологіями.

Ключові слова: охорона навколишнього середовища, забруднене повітря, зелені технології, забруднення атмосферного повітря.

Regarding the potential to reduce air pollution in construction work with the help of green technology. Honcharenko A.

The ways to improve the quality of atmospheric air in the urban environment using the latest developments in the field of environmentally friendly construction show a lot of potential and require a more thorough study. Currently, an integral part of such research is the use of Building Information Modeling technology, as well as the use of neural networks. The article proposes an algorithm for solving problems in reconstruction and construction, taking into account atmospheric air pollution, where the software runs on cloud technology. Analysis of the software application allowed the author to consider creating an information identification system, which will provide results from the input (for example, the state of the building or structure before reconstruction or renewal) in the form of a report and recommendations regarding means and methods of modernization. Such a system displays the advantages and disadvantages of convolutional neural network architecture when designing a software application. It searches for and processes

relevant information, conducts an analysis of similar software applications in order to identify key advantages and disadvantages, and also performs the selection, testing, and implementation of a software application to realize the set goal. It also develops software application architecture, terms of reference, responsibility matrix, project timelines, etc.

This approach allows to make calculations for the reduction of atmospheric air pollution during the life cycle of the structure. The constant development of IT technology and neural networks makes it possible to regularly develop systems and approaches to monitoring, including updating the software and filling it with new data, materials, and technology.

Keywords: *environmental protection, green technology, atmospheric air pollution.*

Вступ

Одним з основних завдань принципів «зеленого» будівництва є зменшення негативного впливу діяльності людини на атмосферне повітря урбанізованих територій. Прогнозування параметрів забруднення атмосферного повітря та зниження рівня викидів шкідливих домішок у повітря внаслідок впровадження різних матеріалів оболонки житлових будинків та конструктивних особливостей будівель, дозволяє знизити негативний вплив на оточуюче середовище і стан здоров'я населення. До шкідливих домішок відносяться такі параметри забруднення повітря, як: оксиди більшості важких металів, оксиди вуглецю, сірки, азоту, сажа, пил, вуглеводні, з'єднання свинцю та вторинні забруднювачі в повітрі, які утворюються внаслідок фотохімічних перетворень при певних метеорологічних умовах місцевості. Загальний підхід при прогнозуванні параметрів забруднення повітряного середовища зазвичай, полягає в прогнозі концентрації окремо визначеної забруднюючої речовини, яка викидається або утворюється в атмосферному повітрі внаслідок антропогенної діяльності.

Моделювання забруднення повітря традиційно виконується за допомогою регіональних, глобальних або місцевих моделей [1-3]. Однак, у моделюванні якості повітря залишаються невизначеності, через недостатню роздільну здатність для визначення процесів регіонального

масштабу в глобальних моделях або невідповідність хімічних та фізичних схем між моделями різного рівня. Наприклад, в роботі [1] проводилися експерименти з використанням моделі глобального клімату зі змінною роздільною здатністю, щоб дослідити покращення регіонального уточнення для моделюванні якості повітря та взаємодії аерозолів з іншими забруднюючими речовинами.

Розуміння коливань рівнів забруднення повітря в різних погодних ситуаціях при розробці цілеспрямованих методів зменшення забруднення досліджувалося в роботі [2] на основі наборів даних дистанційного зондування з високою роздільною здатністю з 2001 по 2022 роки. Для оцінки зміни клімату автори використали модель для опадів Climate Hazard Group InfraRed Precipitation with Station Data Version 2.0 (CHIRPS) і інструмент Moderate Imaging Spectroradiometer (MODIS), а також були використані набори даних Sentinel-5P для збирання просторово-часової інформації основних забруднювачів повітря. Для обробки даних застосовувалися численні непараметричні та описові статистичні програми для перевірки просторової цілісності продуктів супутникових даних та просторово-часових тенденцій за допомогою алгоритмів Google Earth Engine. В роботі [3] на основі моделювання осадження найдрібніших твердих часток (PM) було досліджено вплив забруднення атмосферного повітря урбанізованих територій на здоров'я людини. Проте нині, розроблено багато моделей, які стосуються взаємозв'язку забруднення атмосферного повітря і здоров'я населення на фоні глобальних кліматичних змін та нових технологічних процесів, в тому числі і в транспортній галузі (при використанні більш екологічно чистих двигунів). Що стосується конкретної сфери наукових досліджень щодо зменшення забруднення атмосферного повітря в містах при впровадженні нових зелених технологій в будівельну галузь, ці окремі роботи стосуються здебільшого окремих підприємств галузі, таких як цементні заводи [4]. Наукові дослідження, які стосуються взаємозв'язку забруднення повітря та технологій щодо енергоефективності в новобудовах відсутні зовсім.

Вирішення даної проблеми може бути реалізоване шляхом використання сучасних інформаційних технологій, що надає розширені можливості підвищення ефективності впровадження

принципів «зелених конструкцій» в будівельну галузь та є вкрай актуальною в умовах післявоєнної відбудови країни.

Постановка задачі

Вимоги щодо впровадження методів «зеленого» будівництва вимагає від проєктувальника знання, вміння читати та розробляти програмний код [5]. Відповідно до впровадження в Україні концепції BIM-технологій (Інформаційне моделювання будівель) наразі, широко відомий у будівельній галузі програмний продукт Revit CAD компанії Autodesk та програмні продукти (наприклад, Python) дозволяють створювати скрипти на платформі візуального програмування Dynamo для дизайнерів з подальшою інтеграцією в Revit [6]. Дані методи скорочують час обробки багатотисячних вимірювань з десятками параметрів з кількох тиж-

нів безперервної роботи в «ручному» режимі до декількох хвилин.

Здатність використовувати технології IoT у будівельних роботах, експлуатації будівель, реконструкції інженерних комунікацій, а також проєктуванні та створенні «розумних міст» вимагає застосування програмного забезпечення для програм IoT. Завдяки наявності одноплатних комп'ютерних модулів, таких як: Raspberry, Arduino, Particle, підключаються датчики, платформ зберігання та обробки даних Google Cloud Platform, Microsoft Azure, InfluxData, QuestDB, а вже з таких готових модулів можна зібрати технологічне рішення IoT за кілька годин. Практичне застосування технології IoT у плануванні та експлуатації міської інфраструктури подано авторами роботи [7], де розглядається схема автоматизації управління зливовими стоками на основі хмарних продуктів OPTIRTC, Inc.

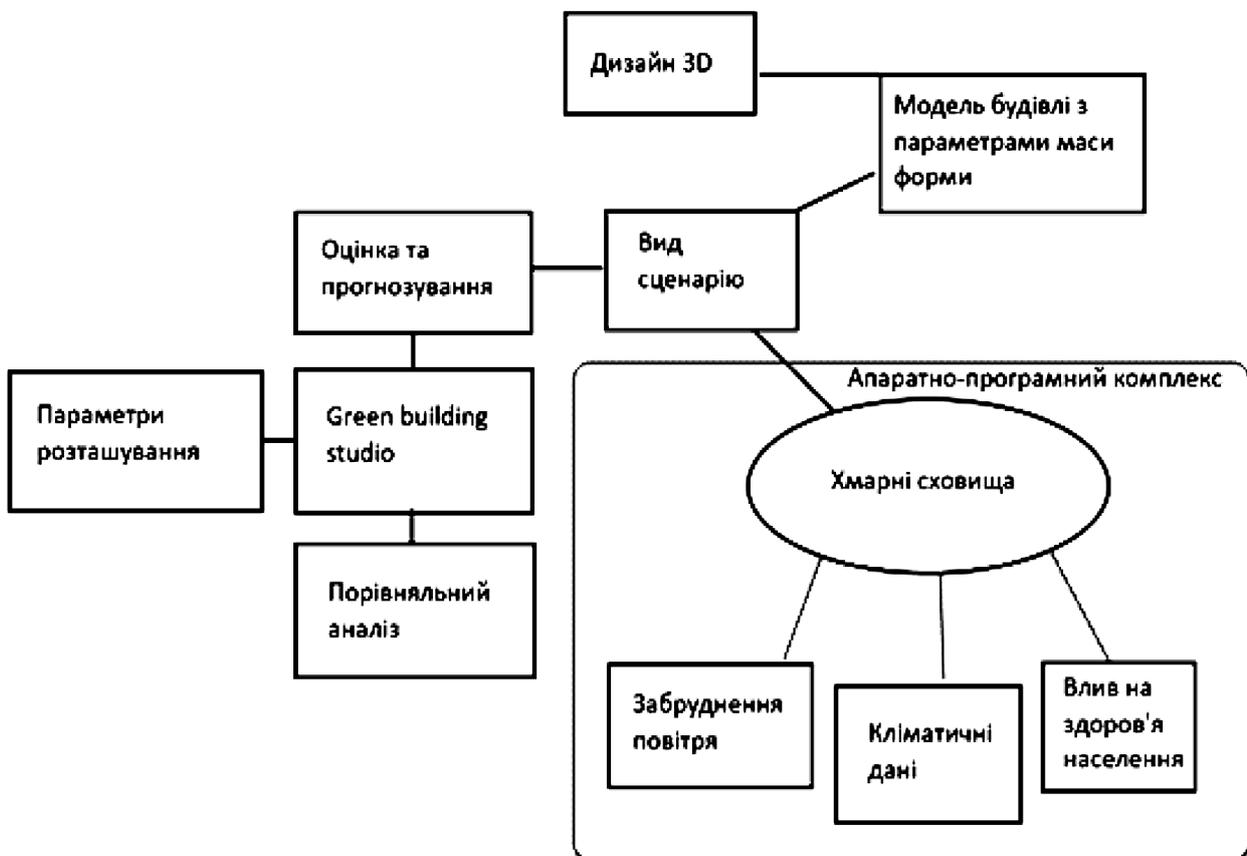


Рисунок 1 – Алгоритм вирішення задачі щодо прийняття управлінських рішень в питаннях реконструкції і будівництва в залежності від забруднення атмосферного повітря за допомогою ІТ технологій

Вирішення задачі щодо прийняття управлінських рішень в питаннях реконструкції та будівництва залежно від наявності хмарних сховищ моніторингових даних забруднення атмосферного повітря пиловими частками РМ 2,5 і РМ 10, на думку автора, зображена на рис. 1.

Особливості методів прогнозування параметрів забруднення повітряного середовища, в тому числі за допомогою штучних нейронних мереж, розглядаються в багатьох наукових дослідженнях [8-10]. Дослідження автора [8] стосуються розроблення програмного засобу та методів побудови нейроподібних структур з ітеративним навчанням для підвищення точності прогнозування параметрів забруднення атмосферного повітря на мобільних та вбудованих пристроях, і що особливо важливо – розроблений програмний засіб працює також в умовах пропусків у даних моніторингу атмосферного повітря. В роботі [9] розглянута можливість використання штучних нейронних мереж для прогнозування ступеня забруднення атмосферного повітря в промисловому регіоні. Створена система дає можливість охоплювати всі станції моніторингу промислового регіону, працює 24 години на добу та дозволяє спрогнозувати рівень забруднення на основі даних про поточну якість повітря та погодні умови. Точність прогнозу була протестована за допомогою нейронної мережі з різною кількістю шарів. Дослідженням впливу метеорологічних умов на нагромадження і розсіювання антропогенної домішки в атмосфері та

розробці методики прогнозування концентрацій забруднюючої речовини, а саме двоокису азоту присвячена наукова стаття [10]. На основі визначення зон впливу промислових комплексів та вузлів м. Києва отримані закономірності просторово-часового розподілення концентрації двоокису азоту за період 2003-2005 рр. та виявлені метеорологічні умови, що мають найбільший вплив на рівні забруднення.

Результати досліджень

Розглянемо роботу запропонованої та використовуваної автором нейронної мережі та «глибокого навчання». Базова структура штучної нейронної мережі та глибокої нейронної мережі змодельована за аналогією з тим, як біологічна нервова система обробляє інформацію. Мережа складається із взаємозалежних обчислювальних блоків (нейронів), які організовані у шари. Шари поділяються на такі групи (рис. 2):

- вхідний шар (з кількістю нейронів, що відповідає кількості вхідних змінних);
- приховані шари;
- вихідний шар (де кожна залежна змінна відповідає нейрону).

Кожен із k шарів складається з перемінного числа нейронів. Мережа має стільки нейронів у вхідному шарі, скільки вхідних змінних (n), і стільки вихідних нейронів, скільки класів даних (m). Нейрон пов'язаний з усіма нейронами у двох сусідніх шарах за допомогою зважених зав'язків (w).

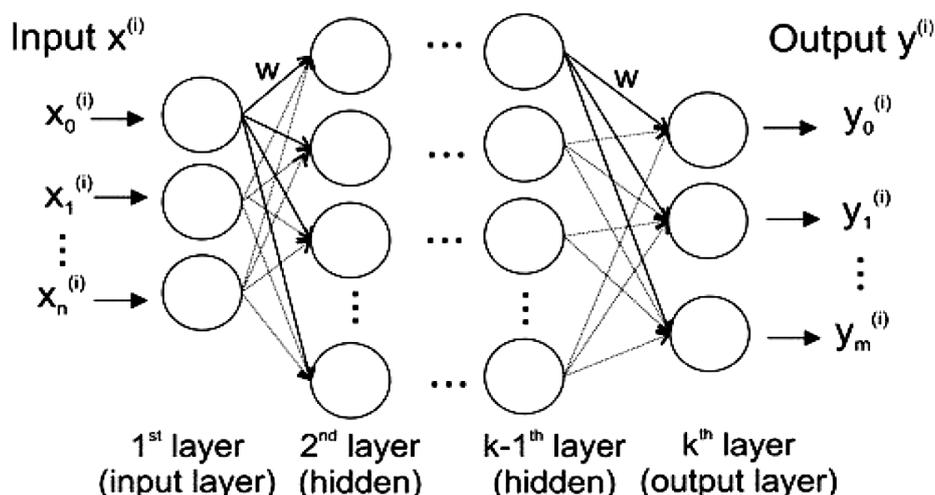


Рисунок 2 – Схематична структура глибокої нейронної мережі прямого поширення

Найбільш широко використовуваним типом DNN є нейронна мережа прямого поширення. У такій мережі кожен нейрон пов'язаний з усіма нейронами у сусідніх шарах, але нейрони всередині шару пов'язані (рис. 2). Сила зв'язку між двома нейронами визначається регульованою вагою w . Кожен нейрон передає вихід значення, обчислюване як функція активації від зваженої суми вхідних даних [12, 13].

Різновидом нейромережі, яку часто використовують для розпізнавання образів на зображеннях або даних тимчасових рядів, є нейронна мережа (Convolutional Neural Network, CNN). На додаток до повнозв'язних шарів CNN включає згорткові і пулінгові шари. На згортковому шарі фільтри застосовуються послідовно до всіх частин вхідних даних з використанням тих самих ваг. Наступні пулінгові шари об'єднують вихідні дані зі згорткових шарів, роблячи їх менш чутливими до незначних зсувів та спотворень даних. Послідовність таких шарів згортки та пулінгу може «втягувати» з даних досить високорівневі властивості [14].

На етапі навчання ваги DNN ітеративно оновлюються, щоб мінімізувати помилку передбачення. Щоб виміряти точність передбачень нових вхідних даних, їх поділяють на навчальний та тестовий набори. Деталі мережевої архітектури, такі як розмір мережі, вибір конкретних типів шарів та параметри процесу навчання, багато в чому визначають точність передбачення та зазвичай залежать від конкретної задачі. Розділ S2 у додатку надає посібник із проектування та навчання DNN, а також; практичні міркування щодо застосування DNN [15,16].

Аналіз проектної області програмного додатку з використання моделей моніторингу на базі нейронної мережі зі згортою дозволив здійснити реалізацію задачі щодо створення власної інформаційної системи ідентифікації, яка забезпечуватиме відображення між входом (наприклад, стан будівлі чи споруди до реконструкції, оновлення) на вихід; звіт та рекомендації по засобах та способах модернізації. В роботі було виявлено переваги та недоліки архітектур нейронних мереж зі згортою, які допоможуть в проектуванні програмного додатка: пошук та обробка актуальної інформації; аналіз схожих програмних додатків з метою виявлення ключових переваг та недоліків; вибір, тестування та реалізація програмного

додатку для реалізації поставленої мети; розробка архітектури програмного додатку; технічного завдання; матриці відповідальності; терміни виконання проєкту, які відображені в діаграмі Ганта, а також проаналізовано ризики стосовно використання даного проєкту та впроваджено заходи їх мінімізації. У проектній частині роботи для реалізації програмного додатку на базі нейронної мережі зі згортою були розроблені: модель процесів та діаграма варіантів використання.

Обговорення та дискусії

Дані дослідження побудовані на припущенні можливості зменшення негативного впливу будівництва на навколишнє середовище через забруднення атмосферного повітря, підвищення енергоефективності та створення сталого житла [17-21].

Ось кілька прикладів «зелених» технологій у будівництві, які пропонується використовувати для зменшення забруднення атмосферного повітря:

1) Використання теплових насосів, сонячних панелей та вітрових турбін для опалення та кондиціонування приміщень дає можливість зменшити викиди забруднюючих речовин за рахунок отримання альтернативних видів енергії.

2) Застосування ізоляційних матеріалів з високою теплоізоляцією для збереження енергії дає можливість зменшити енергоспоживання в будівлі та скоротити обсяг надходження забруднень в повітря.

3) Використання екологічно чистих будівельних матеріалів які мають менший вплив на довкілля та можуть бути повторно використані.

4) Застосування озеленення на дахах будівель та вертикальне озеленення, що сприяє покращенню теплоізоляції та поглинанню вуглекислого газу на очищенню атмосферного повітря.

5) Автоматизація систем опалення, кондиціонування, освітлення для оптимізації енергоспоживання, встановлення систем збору та переробки дощової води для поливу та інших потреб сприяє покращенню енергоефективності будівлі й зменшенню забруднення атмосферного повітря.

6) Використання вторинних або перероблених матеріалів для зменшення викидів CO₂, кліматично нейтральне будівництво сприяє зменшенню забруднення, оскільки встановлено взаємозв'я-

зок між підвищенням температурного показника та трансформацією і утворенням вторинних забруднень.

Дані технології спрямовані на створення екологічно чистих, енергоефективних та стало-розвинених об'єктів, що спричиняє збереження ресурсів та зменшення негативного впливу будівництва на навколишнє середовище.

Висновки

Забруднення повітря урбанізованих територій на фоні глобальних кліматичних змін змушує людство шукати шляхи його зменшення за рахунок впровадження сучасних технологій «зеленого» будівництва. Невід'ємною складовою таких досліджень є використання сучасних програмних продуктів з використанням хмарних сховищ. В даній статі автором наведено алгоритм застосування технології IoT у плануванні та експлуатації міської забудови за новітніми енергоефективними технологіями. Аналіз проєктної області програмного додатку з використання моделей моніторингу на базі нейронної мережі зі згортою дозволив розглянути реалізацію поставленої задачі, що забезпечуватиме відображення між входом (наприклад, стан будівлі чи споруди до реконструкції, оновлення) на вихід; звіт та рекомендації по засобах та способах модернізації з врахуванням зменшення викидів в атмосферне повітря протягом життєвого циклу об'єкту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Modeling the Air Pollution and Aerosol-PBL Interactions Over China Using a Variable-Resolution Global Model [Електронний ресурс] / [M. Yue, X. Dong, M. Wang та ін.] // Journal of Geophysical Research. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.1029/2023JD039130>.
2. Ayyamperuma R. Quantifying climate variation and associated regional air pollution in southern India using Google Earth Engine. [Електронний ресурс] / R. Ayyamperuma, A. Banerjee, Z. Zhang // Science of The Total Environment. – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168470>.
3. A study of environmental impact of air pollution on human health: PM deposition modelling [Електронний ресурс] / [A. Gandhimathi, R. Manju, K. Ramadevi та ін.] // Global NEST Journal. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.30955/gnj.004613>.
4. Eslamdoust J. Environmental pollution biomonitoring around a cement factory based on the Air Pollution Tolerance Index of some tree species. [Електронний ресурс] / J. Eslamdoust, S. Hosseini, F. Karde // Environmental Monitoring and Assessment. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12043-6>.
5. Хізер Б. Наука, технології, інженерія та математика (STEM) Освіта: Початок. [Електронний ресурс] / Б. Хізер, Д. Джеффри // Звіт CRS для Конгресу. Дослідницька служба Конгресу (США).. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: <https://sgp.fas.org/crs/misc/R42642.pdf>.
6. Voloshkina, O., Sipakov, R., Zhukova, O., Honcharenko, A. The role of science technology engineering & mathematics (stem) education in the development of civil engineering skills./КНУБА., м. Київ. 23-25 листопада. 2022. С. 64-72.
7. Wright J. Брифінг: Безперервний моніторинг і адаптивний контроль: «розумне» рішення для управління зливовою водою [Електронний ресурс] / J. Wright, D. Marches // Розумна інфраструктура та будівництво. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.1680/jsmic.17.00017>.
8. Mishchuk, O. Development of the method of forecasting the atmospheric air pollution parameters based on error correction by neural-like structures of the model of successive geometric transformations. *Technology Audit and Production Reserves*. 2019. № 6/2 (50).С. 22–26.
9. Dobrovolskaya, L. O., Kluev, D. S. Прогнозування ступеня забруднення атмосферного повітря у промисловому регіоні. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. Маріуполь. 2018. №36.С. 216–223. Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.36.2018.142552>
10. Статюха, Г.А., Джигерей, И.Н., Бондаренко, Е.С. Підходи до прогнозування рівня забруднення повітря двоокисом азоту в м. Києві. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2008. №1 (31). С. 43-48.
11. Abadi M. TensorFlow: A system for large-scale machine learning. [Електронний ресурс] / M. Abadi, P. Barham, J. Chen. – 2016. – Режим досту-

пу до ресурсу: <https://arxiv.org/abs/1605.08695>.

12. Angermueller, C., Pärnamaa, T., Parts, L., Stegle, O. & Oliver, S. Deep learning for computational biology. *Molecular Systems Biology*, 2016. №12, 878 s.

13. Bengio, Y. Practical recommendations for gradient-based training of deep architectures. *Lecture Notes in Computer Science*. 2012. С. 437–478.

14. The top 5 software architecture patterns: How to make the right choice [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://techbeacon.com/app-devtesting/top-5-software-architecture-patterns-how-make-right-choice>.

15. How Do Convolutional Layers Work in Deep Learning Neural Networks? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://machinelearningmastery.com/convolutional-layers-for-deep-learning-neuralnetworks/>.

16. «Renewable Energy in Buildings» [Элек-

тронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.energy.gov/eere/buildings/building-energy-data>

17. «Green Building Materials» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.usgbc.org/education/sessions/green-building-materials-9265415>

18. «Smart Buildings» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.energy.gov/eere/buildings/smart-buildings>

19. «Water-Efficient Landscaping» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.epa.gov/watersense/water-efficient-landscaping>

20. «Wood in Construction: Environmental and Economic Impacts» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2010/fpl_2010_farber001.pdf

21. «Low Carbon Construction» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.carbontrust.com/resources/guides/buildings/low-carbon-construction/>

УДК 504.57.02

АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНОЇ СИТУАЦІЇ НАВКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТОРУ В УМОВАХ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ, ЩО СТВОРЮЄТЬСЯ КОСМІЧНОЮ ДІЯЛЬНІСТЮ

Фролов В. Ф., Купінський І. В.

Київський національний університет будівництва і архітектури
проспект Повітряних Сил 31, м. Київ, 03680

frolov 47@ ukr.net
yahotyn@gmail.com

Екологічні питання за останнє століття, набули дуже важливого значення у всьому світі. Особливо це стосується екологічної безпеки біосфери Землі – середовища, де живуть люди та тварини. Дане середовище, яке лише два століття було майже ідеально чистим, завдяки діяльності людства перетворилось в сміттєзвалище. З початком космічної ери почався вплив людської діяльності не тільки на Землю (падіння ступенів ракет, виливання токсичного палива на поверхню ґрунтів, руйнування озонового шару), але й на приземну атмосферу та космічний простір (накопичення в космічному просторі сміття, яке утворюється після закінчення життєвого циклу роботи космічних апаратів та подальшого їх руйнування після аварій).

Водночас на різних космічних орбітах знаходиться понад 10000 тонн космічного сміття, тисячі супутників, що закінчили своє функціонування.

Еволюційний розвиток супутникового зв'язку, викликаний господарчою потребою доступу до швидшого Інтернету з більшою площею охоплення, призвели до створення явища яке отримало власну назву і стало відоме як «мегаузир'я». Мегаузир'я – група багатьох супутників, які працюють разом з метою надання ширококутного доступу до Інтернету. Мегаузир'я можуть складатися з сотень і навіть тисяч супутників. Представлені дані трьох основних узир'їв які знаходяться на ННО: Amazon Kuiper

(3236 супутників), OneWeb (648 супутників) і SpaceX Starlink (5011 супутників) – це дані про кількість супутників станом на 31.10.2023 р. У базових сценаріях протягом п'яти років, спостерігається емісія еквіваленту вуглекислого газу на абонента (CO_2 екв./абонента) $0,70 \pm 0,34$ тонни для Койпера, $1,41 \pm 0,71$ тонни для OneWeb і $0,47 \pm 0,15$ тонни для Starlink. Проте в гіршому випадку, сценарій викидів ці значення збільшуються до $3,02 \pm 1,48$ тонни для Койпера, $1,7 \pm 0,71$ тонни для OneWeb та $1,04 \pm 0,33$ тонни для Starlink, що понад у 31-91 разів перевищує еквівалентний рівень типовий для операторів наземного мобільного ширококутного зв'язку.

Ключові слова: екологічна безпека, космічна діяльність.

Environmental analysis of the space pollution around earth caused by human activity. Frolov V., Kupinskyi I.

Environmental problems have become more prominent than ever over the last century. Specifically, it concerns the environmental well-being of the Earth's biosphere: just two centuries ago this environment was almost perfectly clean but nowadays it has turned into a landfill all due to human activity. With the beginning of the space era, human activity began to affect not only the Earth (the fall of rocket stages, the spilling of toxic fuel on the surface of the soil, the destruction of the ozone layer)

but also the surface atmosphere and outer space (the accumulation of garbage in outer space, which is formed after the end of the life cycle operation of space vehicles and their subsequent destruction after accidents).

There are more than 10,000 tons of space debris and thousands of satellites that have ended their operation in various space orbits. The evolutionary development of satellite communications, driven by the economic need for access to faster Internet with a larger coverage area, led to the phenomenon that became known as “megaconstellation”. A megaconstellation is a group of many satellites that work together to provide broadband Internet access. Megaconstellations can consist of hundreds or even thousands of satellites. The presented data of the three main constellations located on the USO: Amazon Kuiper (3,236 satellites – planned), OneWeb (648 satellites), and SpaceX Starlink (5,011 satellites) are the number of satellites as of 10/31/2023. In the baseline scenarios over five years, the observed emission of carbon dioxide equivalent per subscriber (CO₂ eq./subscriber) is 0.70-0.34 tons for Kuiper, 1.41-0.71 tons for OneWeb, and 0.47-0.15 tons for Starlink. However, in the worst-case emission scenario, these values increase to 3.02-1.48 tons for Kuiper, 1.7-0.71 tons for OneWeb, and 1.04-0.33 tons for Starlink, which is more than 31-91 times higher than the equivalent level typical for terrestrial mobile broadband operators.

Keywords: *environmental safety, space activity.*

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження у галузі екології навколоземного космічного простору проводили Дональд Кесслер, новатор у галузі вивчення космічних забруднень та засмічення. Перша публікація якого за назвою «Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of a Debris Belt» в «Journal of Geophysical Research», була опублікована в 1978 році. Також відомими фахівцями в даній царині були Ніколас Джонсон, робота якого в 1987 році стосувалась забруднення орбіти «Artificial Space Debris» та дайджест «History of On-orbit Satellite Fragmentations», в також Бертон Г. Кур-Пале – відомий фахівець NASA з питань космічних уламків та розробок методів захисту від них космічних апаратів, робота якого «Enhanced Meteoroid

and Orbital Debris Shielding» була опублікована в 1995 році.

В Україні дослідженнями з питань космічної екології займалися такі науковці як, Алпатов А. П., «Космічні платформи для орбітальних промислових комплексів, проблеми і перспективи» (2013 р.), «Техногенне засмічення навколоземного космічного простору» (2012 р.), Фролов В. Ф. «Екологічна безпека біосфери Землі і Космосу» (2015 р.). Наразі міжнародне визнання отримали роботи Ахіла Рао, насамперед «Інтегрована модель оцінки супутників і орбітального сміття» (2023 р.), та кенійського радіоастронома Огугу Осоро «Техніко-економічна основа для супутникових мереж, що застосовуються до сузір'їв на низькій орбіті Землі: оцінка Starlink, OneWeb і Койпер» (2021 р.).

Існуюча проблема

Зростання широкосмугових угруповань супутників на низькій навколоземній орбіті (ННО) передбачає плани запуску десятків тисяч нових супутників у космос для забезпечення глобального широкосмугового покриття. Дійсно, сузір'я ННО є основною причиною того, чому кількість запусків ракет у космос стрімко зросла з 250 запусків щорічно в 1970-х роках (менш ніж 2900 за десятиліття), нині легко перевищує 1300 запусків на рік (~16000 за одне десятиліття, кількість зростання понад 400%) [1]. Зростання такої кількості запусків призвело до низки запитань щодо негативних зовнішніх впливів на навколишнє середовище цих супутникових мега-сузір'їв та аспекти екологічної стабільності цього шляху, враховуючи зростання комерціалізації космічної діяльності, від суборбітального «стрибкового» космотуризму до спостереження Землі [2-5]. Дійсно, перехід до надщільних мегасузір'їв супутників створює нові екологічні проблеми питання сталого розвитку [6], з науково обґрунтованими дослідженнями, які вказують на те, що прогнозовані тенденції, ймовірно, дадуть несприятливі впливи [7]. Тому вкрай необхідно, щоб уряди різних країн ретельно збалансовували зростання космічного сектору з проблемами екологічної стійкості [8].

Супутникові оператори подали заявку на велику кількість супутників сузір'їв, з розра-

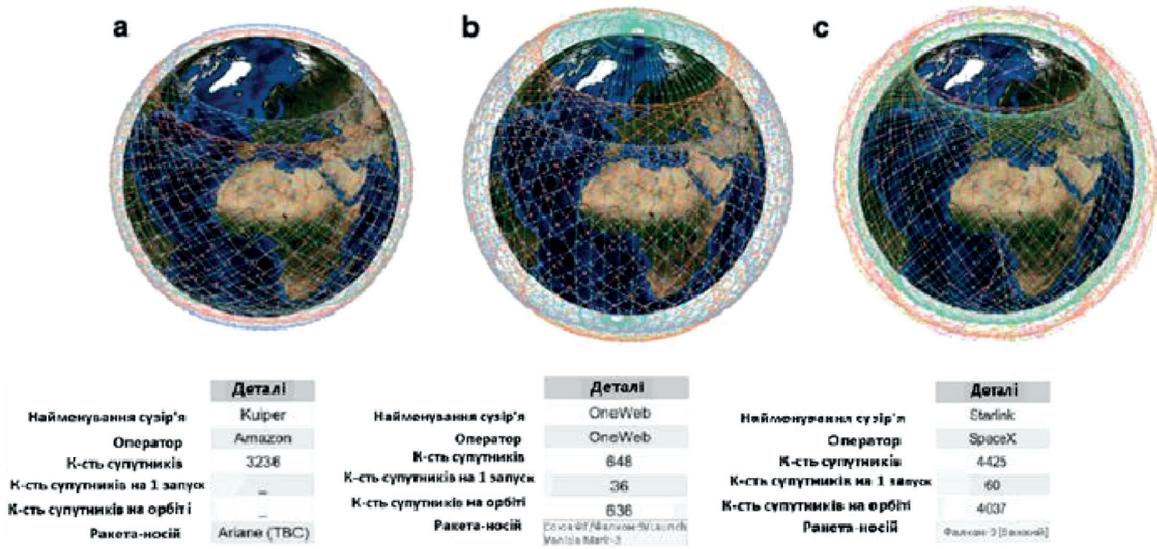


Рисунок 1 – Конструкція орбіти та технічні деталі сузір'їв

хунком на те, що кожне сузір'я потребуватиме постійного поповнення, оскільки у старих супутників закінчують термін експлуатації. Наприклад, у 2022 році на орбіті працювало приблизно 6300 супутників, всього, тоді як загальна кількість запропонованих супутників протягом наступного десятиліття в нових сузір'ях очікується ~320000 [8]. На рисунку 1 показані технічні деталі трьох діючих і планованих угруповань ННО (дані за серпень 2023 року, цифри змінюються у бік зростання).

де, а) Койпер Amazon ще не запустили будь-який із запланованих 3236 супутників фази 1 (уточнення – 9 жовтня 2023 року запуснено першу партію з 2-х екземплярів Kuipersat-1 і Kuipersat-2 для попереднього тестування ракетою Atlas V);

б) OneWeb розгорнув 98% із 648 супутників фази 1 (із 6372 супутниками фази 2, запланованими пізніше);

с) SpaceX Starlink запустила 91% із 4425 супутників фази 1 [8].

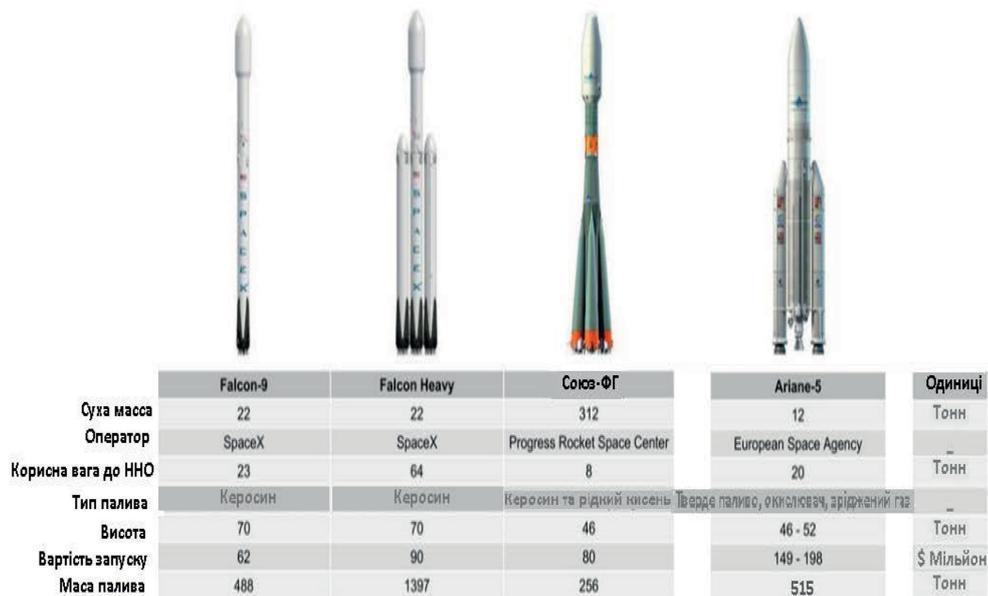


Рисунок 2 – Технічні деталі ракетносієй, що використовуються для запуску супутників сузір'їв ННО, Starlink

Мета статті

Метою написання даної статті є визначення факторів, що впливають на екологічний стан навколоземного космічного простору. Ці фактори складаються з тих що залежать від космічної діяльності, та тих, які пов'язані з техногенним навантаженням на біосферу Землі. Особливим є питання, що пов'язане зі зростаючими темпами космічної діяльності, коли майже всі країни світу намагаються мати супутники різного призначення. Тому, питання екологічного стану навколоземного космічного простору, існуюча проблема всесвітнього рівня.

По-перше, потенціал глобального потепління (GWP), визначений як радіаційний вплив в еквівалентах вуглекислого газу (CO₂eq) протягом сто річного періоду за Міжурядовою групою експертів зі зміни клімату (IPCC) [8].

По-друге, потенціал руйнування озонового шару (ОРП), визначений Всесвітньою метеорологічною організацією ((WMO), як стійкий по-

тенціал виснаження в еквіваленті хлорфторвуглецю-11 (CFC-11eq).

По-третє, потенціал виснаження ресурсів мінералів і металів визначається як виснаження абіотичних ресурсів (резервної бази) в еквівалентах сурми (Sb) згідно з «Centrum voor Milieuwetenschappen» (CML) при Лейденському університеті, і рекомендаціями Посібника ESA (Європейського космічного агентства) з оцінки життєвого циклу (LCA – Life Cycle Assessment) [8].

По-четверте, потенціал екотоксичності прісноводної води як Порівняльні одиниці токсичності (Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential) для екосистем (CTUe), реалізовані в USEtox у «частці потенційно постраждалих видів на м3» на день (PAF.m3_день).

І наостанок, потенційна токсичність для людини як одиниці порівняльної токсичності (Human Toxicity Potential) (CTUh), реалізовані в USEtox як оцінене збільшення захворюваності (випадки кількості). Представлено два сценарії

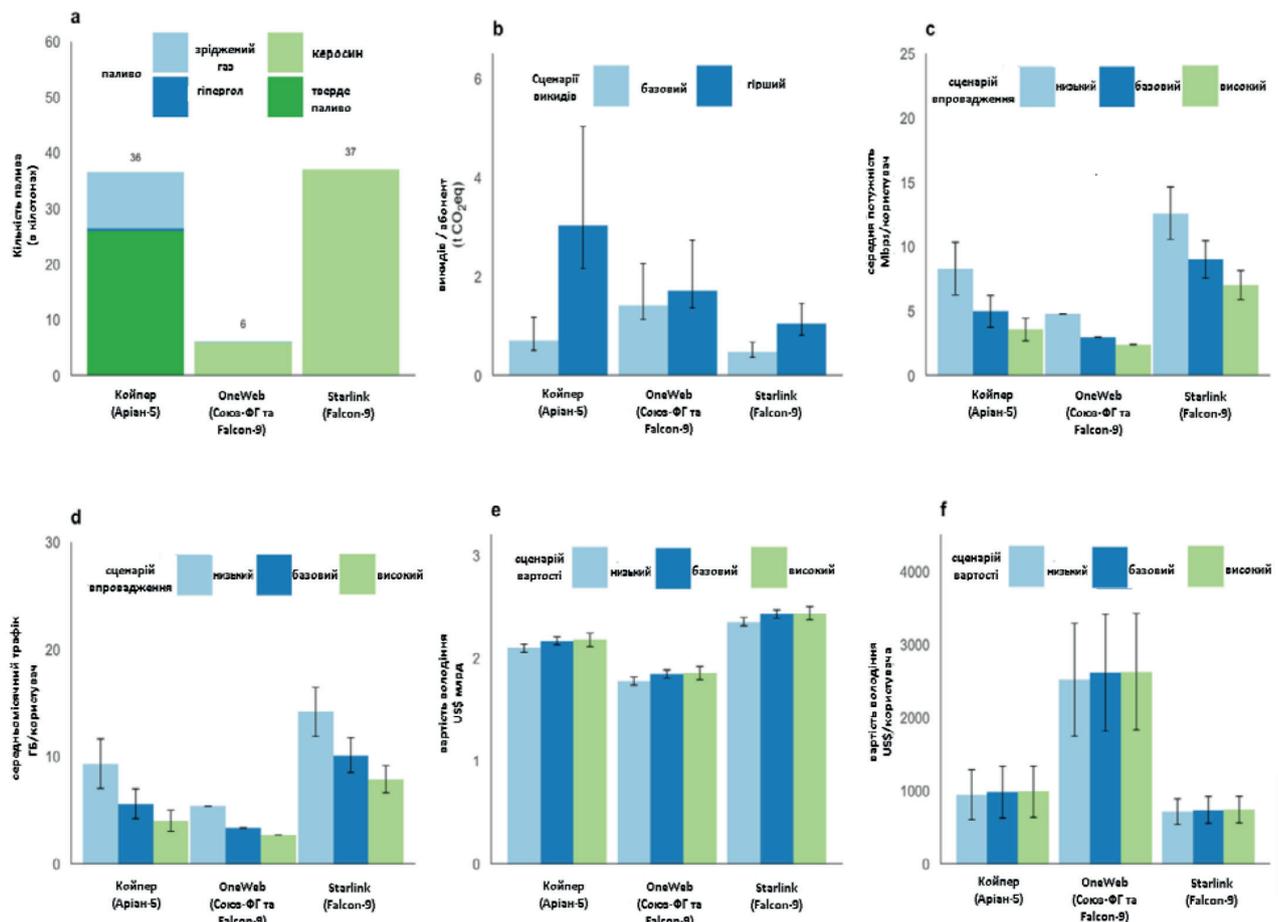


Рисунок 3 – Метрика сузір'їв супутників ННО

викидів (базовий і найгірший варіант) для події запуску з точки зору категорії GWP - Потенціалу глобального потепління (Global Warming Potential) і ODP - Потенціалу руйнування озонного шару (Ozone depletion potential). Базовий варіант класифікує вихлопні продукти відповідно до моделі, що застосовані в цьому дослідженні та адаптовані для космічних застосувань. Як варіант, сценарій найгіршого випадку також включає потенційний вплив сажі, оксиду алюмінію та часток викидів водяної пари, які називаються NIE - «викидами, що не входять до норми» (NIE - «Non-normally Included Emissions») [8].

Койпер витратить загалом 36 кг палива для запуску всіх 3236 супутників фази 1 на відміну від OneWeb, який за оцінками, використовує в цілому 6 кг палива від комбінованого використання Союз-ФГ (66%, до березня 2022 р.) і Falcon-9 (24%, після березня 2022 р.), щоб запустити 576 супутників із усіх 648 SpaceX. Falcon-9 витратить 37 кг палива для завершення запуску всіх 4425 Starlink фази 1, як зображено на рис. 3а. Результуючі викиди на абонента при запуску показані на рис. 3б як CO₂eq.

Загальнодоступні дані абонентів використовуються для врахування базового сценарію впровадження, як описано в методології та додатковій інформації (SI) рисунок 3.

де а) Ракетне паливо, необхідне для завершення формування всього угруповання ННО фази 1 - Starlink і Kuiper використовують 60 супутників за один запуск проти 36 для OneWeb. Крім того, OneWeb запустив 420 супутників через Союз-ФГ і 156, які планується запустити з використанням Falcon-9;

б) еквівалентні викиди на абонента для кожного угруповання з огляду на базову лінію проти найгіршого результату з довірчим інтервалом, що представляють сценарії низького та високого залучення абонентів;

в) надане розрахункове середнє значення швидкості передачі даних за сценарієм прийняття з CIs, що представляють середньоквадратичне відхилення (SD - Standard Deviation);

г) потенційний місячний трафік на користувача за сценарієм впровадження (CIs 1 SD);

е) оціночна загальна вартість володіння (TCO) за групою і сценарій витрат (CIs 1 SD);

ф) передбачувана TCO на користувача (CIs 1 SD).

Для викидів за весь термін експлуатації понад 5 років (термін експлуатації супутників ННО) базові викиди - 0,47 ± 0,15 т CO₂eq/абонента для Starlink, 0,70 ± 0,34 т CO₂eq/абонента для Kuiper і 1,41 ± 0,71 т CO₂eq/абонента для OneWeb. Отже, викиди на абонента від OneWeb на 66% вищі, ніж у Starlink, та на 50% вищі, ніж у Kuiper. Проте у найгіршому сценарії викидів ці значення збільшуються до 1,04 ± 0,33 т CO₂eq/абонента для Starlink,

3,02 ± 1,48 т CO₂eq/абонента для Kuiper і 1,7 ± 0,71 т CO₂eq/абонента для OneWeb. Цікаво, що найгірші оцінки показують, що OneWeb все ще має вищі викиди на абонента порівняно зі Starlink на 39%. Койпер має найвищий вплив на викиди, він на 44% більший, ніж OneWeb, якщо включити NIE. Насамперед це пов'язано з типом використовуваного палива, оскільки сузір'я Койпер Amazon планує в основному застосовувати варіант Ariane, який використовує тверде паливо, і тому є токсичнішим, викидаючи значно більшу кількість частинок оксиду алюмінію порівняно з гасом, гіпергольними або криогенними видами пального та окислювачів.

У 2018 році для наземних європейських операторів мобільного зв'язку (ОМЗ) (з використанням 2G та 4G) передбачені зареєстровані річні викиди 6,6 кг CO₂eq/абонента, порівняно з річними викидами 141 ± 69 кг CO₂eq/абонента для Kuiper, 282 ± 118 кг CO₂eq/абонента для OneWeb і 95 ± 30 кг CO₂eq/абонента для Starlink, і (тобто у 14-21 разів вище, ніж у наземного мобільного ширококосмугового зв'язку у базовому сценарії викидів). Гірший - 604 ± 295 кг CO₂eq/абонента для Койпера, 341 ± 2142 кг CO₂eq/абонента для OneWeb і 207 ± 265 кг CO₂eq/абонента для Starlink (у 31-91 разів вище ніж наземний мобільний ширококосмуговий зв'язок, включно NIE). Детальні результати зображено на рис. 4, а базові викиди візуалізовані (рис. 4а, 4с), поряд викиди в найгіршому випадку, які включають NIE (чорний вуглець, оксид алюмінію та водяна пара) (рис. 4б, 4д). Повний запуск запланованого угруповання Койпера в базовому сценарії викидів за прогнозами, вироблятиме 1,8 Мт CO₂eq проти 1,1 Мт CO₂eq для OneWeb і 1,9 Мт CO₂eq для Starlink, як показано на рис. 4а.

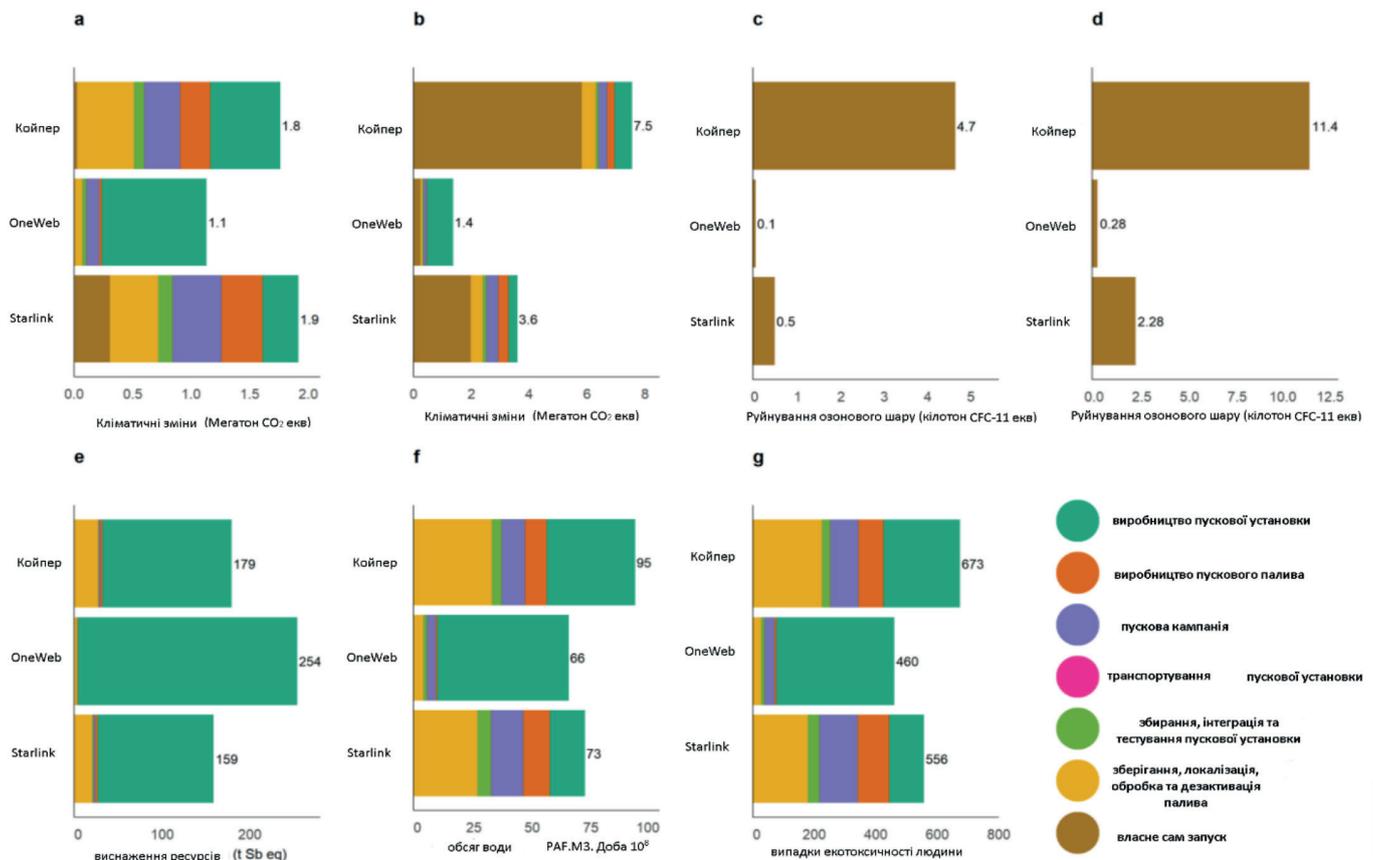


Рисунок 4 – Основні сузір'я LEO за категорією впливу на навколишнє середовище

де, а) вплив зміни клімату (базова лінія);

б) вплив зміни клімату, включаючи NIE (найгірший випадок);

в) руйнування озонного шару (базовий рівень);

г) руйнування озонного шару включаючи NIE (найгірший випадок);

д) виснаження ресурсів;

е) екологічність для прісної води;

ж) токсичність для людини.

При підрахунку найгіршого результату, де враховуються наслідки NIE на зміну клімату, за попередніми оцінками, на Койпер припадає 7,5 Мт CO₂-екв, порівняно з OneWeb – 1,4 Мт CO₂-екв, а Starlink – 3,6 Мт (рис. 4б).

Для порівняння, наземні європейські мобільні мережі (2G-4G) повідомили про викиди 4,7 млн тонн у 2018 році, з розрахунковими загальними викидами 6,2 Мт [8]. У базовому – 4,7 Кт, 0,1 Кт і 0,5 Кт CFC-11eq буде створено, коли всі супутники будуть запуснені Kuiper, OneWeb і Starlink відповідно (рис. 4с).

Для Койпера цей показник становить 0,42% річної планетарної межі для виснаження озонного шару, тоді як OneWeb і Starlink – 0,01% і 0,001%. Койпер у значенні CFC-11eq у 46 разів вище, ніж у OneWeb, і в 9,4 рази вище, ніж у Starlink. Гірший сценарій Койпера, OneWeb і Starlink, внесуть 11,4 Кт, 0,28 Кт і 2,28 Кт CFC-11eq (рис. 4д).

З огляду на виснаження ресурсів, Койпер вносить 179 т, OneWeb 254 т і Starlink 159 т сурми Sb (рис. 4е). З погляду екологічного впливу екологічності прісної води, оцінюється в $9,5 \times 10^9$, $6,6 \times 10^9$ та $7,3 \times 10^9$ еквівалент PAF м³/доба для Kuiper, OneWeb і Starlink (рис. 4ф).

Екологічний вплив на людину, за оцінками - 673 випадки для Kuiper, 460 випадків для OneWeb та 556 випадків для Starlink (рис. 4г).

Загальні соціальні витрати за базовим сценарієм - 325 млн \$ для Койпера, 209 млн \$ для OneWeb і 354 млн \$ для Starlink (рис. 5а).

Для найгіршого сценарію соціальні витрати від Койпера оцінюються в 1,4 млрд \$ проти 252 млн \$ для OneWeb і 664 млн \$ США для Starlink (рис. 5б). Соціальні витрати на 1 абонента – 130 ± 37 \$ США у випадку Койпера в сценаріях базових викидів і базового впровадження

проти 261 ± 52 \$ США для OneWeb і 101 \$ США для Starlink (рис. 5с).

Гірший сценарій – оцінка соціальної вартості на одного абонента Kuiper становить 558 ± 150 \$ проти 315 ± 63 \$ для OneWeb і 190 ± 42 \$ для Starlink (рис. 5с).

Києвом і Гібралтаром ($688 \text{ кг CO}_2\text{eq}$) (4200 км). Оцінка загальної кількості $5,3 \text{ кт CFC-11eq}$, - $0,7-5,9\%$ CFC-11eq щорічних викидів, зростаючи в гіршому випадку до приблизно $1,9-15,5\%$ CFC-11eq щороку (враховуючи річну оцінку загального діапазону в $90-725 \text{ кт}$). Ефективна ціна вуглецю –

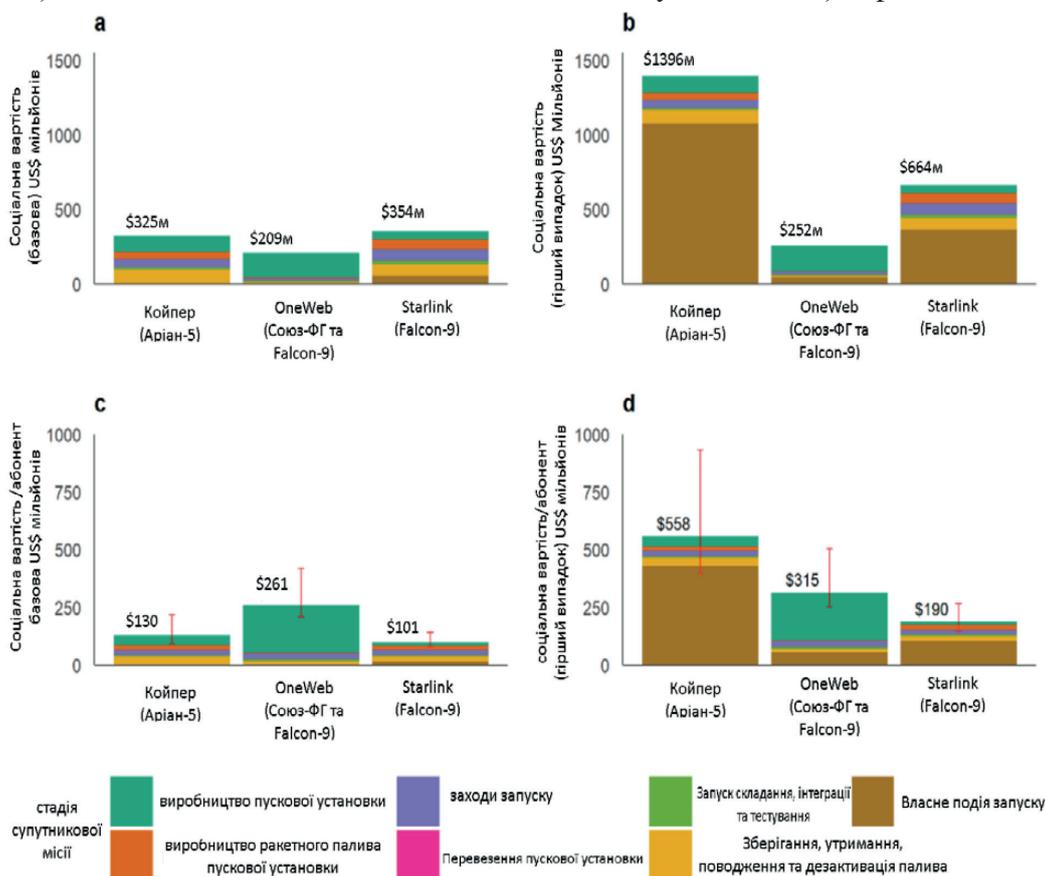


Рисунок 5 – Соціальна вартість вуглецю

де, а) – СЦВ базової лінії викидів за п'ятирічний період;

б) – СЦВ викидів у найгіршому випадку за 5-річний період;

в) – СЦВ на абонента для викидів базовий рівень за п'ятирічний період;

г) – СЦВ на абонента для найгіршого сценарію за 5 років.

Фактично ($0,22-0,38 \text{ Мт CO}_2\text{-екв.}$), еквівалентний споживанню енергії становить $28-48$ тис. будинків США на рік. У найгіршому сценарії ($0,28-1,5 \text{ Мт CO}_2\text{eq}$) це зростає до еквівалентного споживанню енергії $35-189$ тисячами будинків США на рік, [8]. Базовий сценарій - ($95-282 \text{ кг CO}_2\text{eq}$) еквівалентний польоту Лондоном та Римом ($275 \text{ кг CO}_2\text{-екв.}$) 1500 км , підвищуючись за найгіршим сценарієм ($207-604 \text{ кг CO}_2\text{-екв.}$) до еквіваленту рейсу між

$209-325$ млн \$ США, що дорівнює $101-261$ \$ у США на абонента протягом 5 років (враховуючи витрати на приблизну кількість користувачів, 185 \$ за тону вуглецю). Гірший сценарій – до $0,25-1,4$ млрд \$, що дорівнює $190-558$ \$ на абонента за 5 років.

На завершення - викиди від сузір'їв супутників ННО значно вищі (у $31-91$ рази), ніж наземні мережі мобільного зв'язку на основі оцінених вірогідних сценаріїв розвитку подій.

Результати досліджень та висновки

Проведений аналіз та дослідження впливу космічної діяльності на навколишнє космічне середовище, при зростанні темпів такої діяльності, дає право авторам зробити наступні підсумки:

1. Представлений вище аналіз екологічної небезпеки космічної діяльності вказує на необ-

хідність терміново ліквідувати «привілеї» в цій сфері одних членів космічної діяльності по відношенню до інших.

2. Проблема забезпечення екологічної безпеки являється дуже складною і комплексною.

3. Нині маємо парадоксальну ситуацію: по-перше, екологічна безпека не являється цільовою для космічної макросистеми, призначеної вирішувати конкретні задачі, але, з іншого боку, екологічна безпека, в контексті цивілізації знаходиться в дилемі протиріч «виживання-розвиток», а глобальний характер космічної діяльності, що спрямований на вирішення проблем людства, продукує нові глобальні проблеми екологічної безпеки.

4. Для комплексного вирішення екологічної безпеки, при збільшенні темпів космічної діяльності, необхідно якнайшвидше вжити наступне: екологічне планування космічної діяльності, контроль та оцінка впливу на НКП різних видів ракет носіїв, моніторинг, ліцензування, сертифікація, плата за забруднення тощо.

Із врахуванням вищенаведеного автори статті зробили наступні висновки:

1. Космічна діяльність країн космічного клубу повинна бути чітко врегульована.

2. Міжнародний комітет з проблем космічного сміття при Організації Об'єднаних Націй (ООН) повинен чітко розробити умови та вимоги до країн, які займаються пусковими послугами, з метою визначення видів палив, що застосовуються при пусках ракет носіїв.

3. Країни які застосовують небезпечні палива для ракет носіїв, повинні відшкодовувати вплив екологічних наслідків, що виникають в навколоземному космічному просторі.

4. Залежно від темпів космічної діяльності, кожна країна – член космічного клубу, повинна робити внески у Фонд комітету з проблем космічного сміття, з метою формування коштів для очистки космічного простору від космічного сміття.

5. Зобов'язати державні та приватні компанії, які займаються космічною діяльністю, розробити методи та засоби очистки космічного простору від космічного сміття та презентувати їх результати у Міжнародний комітет з проблем космічного сміття при ООН.

ЛІТЕРАТУРА

1. Our World in Data, “Number of payloads and rocket bodies in space, by orbit” Our World in Data. [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://ourworldindata.org/grapher/space-objects-byorbit>.

2. Witze A. 2022 was a record year for space launches / Witze. // Nature Journal. – 2023. – vol. 613. – С. 426–430, doi: 10.1038/d41586-023-00048-7.

3. Ross M. Potential Climate Impact of Black Carbon Emitted by Rockets [Електронний ресурс] / М. Ross, М. Mills, D. Toohey. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/228750427_Potential_Climate_Impact_of_Black_Carbon_Emitted_by_Rockets, doi: 10.1029/2010GL044548.

4. Miraux L. Environmental sustainability of future proposed space activities Acta Astronaut / L. Miraux, A. R. Wilson, G. J. Dominguez Calabuig. // vol.200. – 2022. – С. 329–346. doi: 10.1016/j.actaastro.2022.07.034.

5. Lawrence et al. A. The case for space environmentalism. Nat. Astron., vol. 6, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2022, doi: 10.1038/s41550-022-01655-6.

6. Dallas J. A. The environmental impact of emissions from space launches: A comprehensive review / J.A.Dallas, S. Raval, J. P. Alvarez Gaitan, S. Saydam, and A. G. Dempster, J. Clean. Prod., vol. 255, p. 120209, May 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120209.

7. Miraux L. Environmental limits to the space sector's growth. Sci. Total Environ., vol. 806, p. 150862, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150862.

8. Wilson and Akhil Rao, from arXiv [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2309/2309.02338.pdf>.

9 Фролов В. Ф. Екологічна безпека біосфери Землі і Космосу / В. Ф. Фролов // Монографія / В. Ф. Фролов. – Київ: ТВО «НВП Інтерсервіс», 2015. – 220 с.

10. Алпатов А. П. Техногенное засорение околоземного космического пространства / А. П. Алпатов, В. П. Басс, С. А. Баулин. – Днепропетровск: Пороги, 2012. – 378 с.

11. Кесслер Д. Прогноз засорения космического пространства / Д. Кесслер. // Аэрокосмическая техника. – 1989. – №1. – С. 897–907.

12. Chobotov V. A. Dynamics of Orbiting Debris Clouds and the Resulting Collision Hazard to Spacecraft / Chobotov. // International Astronautical Federation. – 1987. – С. 87–571.

УДК 678.743.22

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ВТОРИННОГО ПЕРЕРОБЛЕННЯ ВІКОННИХ ПВХ ПРОФІЛІВ. УКРАЇНСЬКИЙ ТА ЄВРОПЕЙСЬКИЙ ДОСВІД

Кожевніков С. В.

Київський національний університет будівництва і архітектури
проспект Повітряних Сил, 31, м. Київ, 03680
slondie7@gmail.com

У статті проводиться дослідження з дослідження проблематики вторинного перероблення полівінілхлориду (ПВХ) профільних віконних систем, задля зменшення негативного впливу на навколишнє природне середовище. Автор зроблений короткий аналіз впливу ПВХ на довкілля, а також було актуалізовано основні проблемні галузі, де найбільше використовується ПВХ матеріал та вивчає методи ефективної боротьби з даною проблемою від спеціалізованих міжнародних організацій, таких як: ЕРРА (The European Trade Association of PVC window systems supplier, VinylPlus, Gütegemeinschaft Kunststoff-Fensterprofilssysteme, WildLife Research та інші [1, 2, 5-7]. Автор вивчає та аналізує щорічні дослідження та звіти вищезгаданих організацій, в яких наводиться світова статистика та розрахунки загальних обсягів переробки старих ПВХ профілів, а також вивчається можливість повторного використання даного переробленого рецикляту. Вивчення теми ресайклінгу* ПВХ профілів зокрема є дуже важливою темою для українського сьогодення з причини значного збільшення кількості зруйнованих світлопрозорих ПВХ конструкцій під час військової агресії з боку російської федерації.

Нормативно-правова база України наразі знаходиться у активній фазі імплементації всіх основних законодавчих актів Європейського Союзу, зокрема в будівельній галузі, де закла-

дений основний принцип «friendly environment», тобто будівельні технології та матеріали повинні відповідати екологічно чистим процесам. Тому вивчення технології ресайклінгу ПВХ профілів, матеріалу який є дуже популярним і часто використовується у будівельній галузі є вкрай важливим для зменшення негативного впливу на екосистему українського довкілля.

Ключові слова: *ПВХ, вікна, двері, ПВХ профілі, рециклят, перероблення, сталий розвиток.*

Analysing the problems of recycling pvc window profiles using ukrainian and european experience. *Kozhevnikov S.*

The article examines the problems of recycling polyvinyl chloride (PVC) in profiled window systems to reduce the negative impact on the natural environment. The author presents a brief analysis of the impact of PVC on the environment, highlights the main problem areas where PVC material is most used, and studies methods of combating this problem suggested by specialized international organizations, such as EPPA (The European Trade Association of PVC window systems supplier, VinylPlus, Gütegemeinschaft Kunststoff-Fensterprofilssysteme, WildLife Research, and others [1, 2, 5-7].

The author analyzes annual studies and reports from these organizations, which provide world

* Ресайклінг (англ. recycling) – багаторазове використання ресурсів за рахунок повної переробки відходів від стану сировини до стану готового продукту.

statistics and calculations on the total volumes of old PVC profiles recycling and information on the possibilities of reusing the recycle. The studies on the topic of recycling PVC profiles are very important for Ukraine today due to the significant increase in the number of destroyed translucent PVC structures as a result of military aggression by the Russian Federation.

Ukrainian legal framework surrounding environmental protection is currently implementing all the main legislative acts of the European Union, particularly in the construction industry where the main principle is a friendly environment, i.e. construction technology and materials must comply with environmentally friendly processes. Therefore, studying the recycling technology of PVC profiles, a material that is often used in the construction industry, is extremely important to reduce the negative impact on the Ukrainian ecosystem.

Keywords: PVC, PVC profiles, recycle, recycling, sustainable development.

Актуальність проблеми дослідження

З кожним роком кількість демонтованих виробів з ПВХ (вікна, двері, фасади) постійно збільшується. Більшість старих ПВХ вікон здебільшого викидається на смітник. ПВХ є одним із найважчих матеріалів на етапі утилізації, який майже не розкладається природним шляхом, негативно впливаючи на навколишнє природне середовище. Автор статті проаналізував ефективні способи перероблення старих ПВХ профілів задля подальшого використання переробленого матеріалу у різних промислових галузях, зокрема, у віконному виробництві нових конструкцій.

Мета дослідження

Проаналізувати світовий досвід перероблення ПВХ профілів, визначити проблемні галузі де найбільше використовується означений матеріал, проаналізувати діяльність міжнародних спеціалізованих організацій.

Об'єкт дослідження – вплив відходів від використаних ПВХ вікон та дверей на екологічну ситуацію в Україні та світі.

Предмет дослідження – ефективні способи перероблення ПВХ, зокрема вторинне перероблення ПВХ профілів та отримання рецикліату для його подальшого використання.

Виклад основного матеріалу

Проблема перероблення пластику в контексті турботи про навколишнє природне середовище широко відома. Однак, сучасні технології та методи дають змогу значно зменшити вплив ПВХ на довкілля.

Нині в архітектурно-будівельній сфері намітився чіткий напрям розглядати екологічність продукту по всьому життєвому циклу. Пластики вважаються одними з найважчих продуктів для забезпечення їх екологічності на етапі утилізації. В статті детально розглядається сам процес і терміни розкладання цього матеріалу в природному середовищі.

Щорічне виробництво пластику неухильно зростає, саме тому питання перероблення дуже актуальне. Пластик може зберігатися в природі понад 500 років, оскільки він не розкладається так швидко, як деревина чи папір. При цьому пластикові відходи, що потрапили на полігони (для захоронення твердих побутових відходів), завдають істотної шкоди екології, виділяючи шкідливі речовини в навколишнє природне середовище. Щоб мінімізувати шкоду природі, полівінілхлорид (ПВХ) необхідно перероблювати, тобто здійснити так званий процес «рециклінгу».

Один з найбільш затребуваних і широко застосовуваних видів пластмас, який одержується шляхом полімеризації вінілхлориду, полівінілхлорид (рис. 1), випускається у величезних кількостях по всьому світу.

ПВХ використовується для виготовлення водопровідних труб, віконних конструкцій, одягу, замінників шкіри та багатьох інших корисних речей. У зв'язку з такою високою популярністю, проблема утилізації виробів з ПВХ, що відслужили свій термін, стає дуже актуальною. Посилює її і те, що в складі ПВХ міститься хлор, який дуже токсичний, а отже, традиційні методи утилізації такі як звалище або спалювання, неефективні. Тому було розроблено ефективні методи перероблення полівінілхлориду для повторного використання.

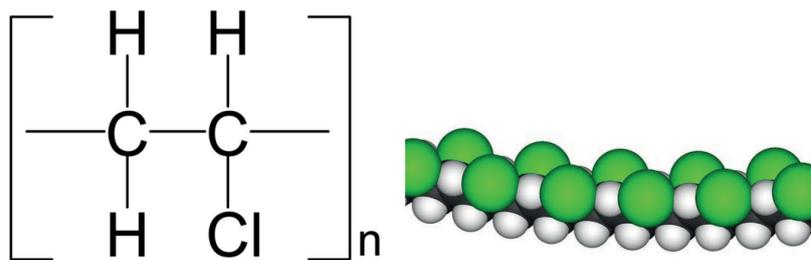


Рисунок 1 – Полівінілхлорид (ПВХ)

Коротко про перероблення полівінілхлориду

За типом, виділяють такі основні методи перероблення ПВХ: механічний та хімічний. При механічній переробці, сировина подрібнюється, при цьому виокремлюються супутні компоненти, такі як: плівки, гумові ущільнювачі, алюмінієві елементи, текстильні або металеві складові виробів тощо. Подрібнений матеріал потрапляє до гранулятора, де з нього формуються частинки, розмір яких є найбільш зручним для подальшого технологічного процесу виробництва виробів із вторинної сировини.

Хімічний метод є складовою частиною механічного, і полягає у відокремленні від подрібненого матеріалу всіх сторонніх частинок за допомогою хімічних розчинників. Крім того, існують складніші хімічні методи перероблення ПВХ, сутність яких полягає у зміні властивостей матеріалу.

Становище у галузі виробництва ПВХ вікон та дверей

Обсяги виробництва вікон із ПВХ щорічно збільшується. Отже, питання перероблення старих демонтованих вікон стає все більш актуальним. Але динаміка кількості використаних пластикових профілів, які переробляються, позитивна і щорічно кількість збільшується, а методи вторинного перероблення відповідно вдосконалюються. За даними ЕРРА (The European Trade Association of PVC window systems supplier/Європейська торгова асоціація постачальників віконних систем з ПВХ) у 2021 році було перероблено 363 137 тонн ПВХ профілів [1,7].

Понад 25 років існує технологія повного перероблення старих (вживаних та демонтованих) ПВХ вікон, матеріали перероблення яких (рециклат у вигляді ПВХ гранули) можуть бути вико-

ристані у виробництві нових профілів. Нині ПВХ промисловість використовує близько 50% власного рециклату (підконтрольний відновлювальний цикл), використання якого ніяк не погіршує якість кінцевої продукції. Для нашої країни перероблення ПВХ є важливою темою, як з точки зору енерго- та ресурсоефективності, так і з управління контрольованим або замкнутим циклом перероблення у виробничих процесах. Також важливо зауважити той факт, що саме в Україні кількість використаних, зіпсованих та зруйнованих вікон та дверей значно збільшилась в наслідок військової агресії російської федерації (рис. 2).

Результати фінансового аналізу ПВХ ринків також свідчать про позитивну динаміку та розвиток сегменту відновлених ПВХ профільних систем. Наприклад, у 2022 році світовий ринок перероблених ПВХ-профілів становив 525 млн дол. США. За прогнозами міжнародних аналітиків, ринок перероблення ПВХ збільшиться до 791 млн доларів США [2, 7].

Чому так важливе перероблення старих (демонтованих) ПВХ вікон і вживаних профільних систем?

Вторинне перероблення вікон та повторне використання ПВХ гранул (рециклату) для виробництва віконних виробів зменшує негативний вплив на довкілля шляхом заощадження екологічних та енергетичних ресурсів. Численні міжнародні організації працюють над цим питанням [1, 2, 5-7]. Впровадження рішень та їх формалізація призведе до значного скорочення викидів забруднюючих речовин. Аналітики глобального фонду Wildlife Research у співпраці із дослідницькою агенцією Straits Research інформують, що 43% сировини, необхідної для виробництва ПВХ, є нафта. Крім того, на виробництво пластикових вікон витрачається у вісім разів більше енергії, ніж на вироби із дерева.



Рисунок 2 – Демонтовані віконні ПВХ профілі

За даними Wildlife Research, такі обсяги викликають занепокоєння також у випадку утилізації використаних рам, тому що ПВХ вікна дають на 43% більше сміття ніж дерев'яні. Близько 82% від загальної кількості пластикових відходів потрапляють на звалища, 15% спалюється на сміттєспалювальних заводах, і лише 3% переробляється. Також аналітики фонду попереджують виробників пластикових віконних виробів, що з глобальним переходом до більш екологічних варіантів перероблення, негативний вплив ПВХ на навколишнє середовище може перешкоджати зростанню ринку віконних профілів з цього матеріалу [8].

Процес поточних змін, які відбуваються у світовій економіці, пов'язані з порушенням ланцюгів постачання, нестачею природних ресурсів, необхідних для виробництва, і прагненням скоротити викиди CO₂, мотивують та зобов'язують виробників впроваджувати сталі бізнес-моделі. Вони заохочують та ініціюють впровадження інвестицій в екологічність сировини за рахунок та за умови змін виробничих процесів, логістики та розроблення нових більш екологічних продуктів. На цьому шляху важливим значенням набуває ресайклінг.

Перероблення старих ПВХ вікон та дверей – світовий еко-тренд сталого розвитку та ключ до екологічності сировини

Ресайклінг – це процес, що дозволяє переробити корисні відходи з метою їх повернення в

процеси техногенезу та подальшого використання. Ресурсозберігаючі виробничі процеси дуже важливі для переробників пластмас. На прикладі пластикових вікон, які перероблялися протягом 25 років і повторно використовувалися для нових віконних профілів, показали значну економію сировинних ресурсів та енергії та засвідчили, що за ресайклінгом – майбутнє [3, 4].

Аналіз результатів дослідження німецької Асоціації якості віконних профільних систем із ПВХ (Gütegemeinschaft Kunststoff-Fensterprofilssysteme) довів, що пластиковий профіль можна багаторазово переробляти без втрати якості. Перероблений матеріал заощаджує цінні сировинні ресурси, знижує енерговитрати на виробництво сировини та профілів і, у такий спосіб, зменшує викиди парникових газів та інших забруднюючих речовин. Кожна тонна ПВХ рециклату знижує викиди близько 2 тонн CO₂ в порівнянні з первинним ПВХ.

Зручність використання, енергоефективність та довговічність – є основними відмінними властивостями пластикових вікон, що корелює з вимогами системи забезпечення якості RAL (впровадженого RAL Deutsches Institut für Gütesicherung e. V.). Отож сучасні ресурсозберігаючі процеси, вторинне перероблення та гарантія якості є відмінними рисами перспективної та сталої промислової політики щодо пластикових вікон. Оскільки середній термін використання пластикового вікна становить близько 35 років, процес перероблення необхідно постійно покращувати [8-10].



Рисунок 3 – Подрібнені пластикові віконні профілі, підготовленні для подальшого перероблення

Створена в 2001 році VinylPlus (Програма сталого розвитку європейської індустрії ПВХ), європейська промисловість ПВХ вперше заклала основи своєї власної програми сталого розвитку [7]. Її суть полягала у заміні стабілізаторів, що містять важкі метали та просуванні європейської концепції ресайклінгу. Наразі близько 5 млн тонн виробів із ПВХ було перероблено та використано у нових матеріалах (рис. 3). Пластикові віконні профілі із вмістом вторинної сировини до 44% відіграють важливу роль у цьому успіху.

Тепер виробники ПВХ профільних систем володіють сучасними технологіями перероблення та обізнані з вимогами, стосовно управлінням оборотом сировини. Чого не вистачає, так це достатньо старих вікон ПВХ для безперебійної роботи виробництва. Для збільшення кількості необхідні постійні та добре організовані пункти збирання, а також допомога виробників вікон та власників будівель, які шукають місцеву компанію з перероблення або пункти збирання після демонтажу старих пластикових вікон.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сталий розвиток та енергозбереження. Аналітичні дані ЕРПА (The European Trade Association of PVC window systems supplier) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.eppa-profiles.eu/>.
2. WildLife Research [Електронний ресурс] // The European Journal of Wildlife Research – Режим доступу до ресурсу: <https://www.publish.csiro.au/WR>.
3. Орленко М. За ресайклінгом – майбутнє віконної промисловості [Електронний ресурс] / М. Орленко – Режим доступу до ресурсу: <https://wt.com.ua/>.
4. Віконний консалтинг [Електронний ресурс] // Віконний консалтинг – Режим доступу до ресурсу: <https://oknakonsult.com/>.
5. Аналітика звітності [Електронний ресурс] // Аналітика звітності VinylPlus – Режим доступу до ресурсу: <https://www.vinylplus.eu/>.
6. Аналітичний дайджест [Електронний ресурс] // “Gütegemeinschaft Kunststoff-Fensterprofilssysteme” – Режим доступу до ресурсу: <https://www.gkfp.de/>.
7. VinylPlus progress report 2022 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://piweb.plasteurope.com/members/pdf/p245264B.PDF>.
8. Дослідницька агенція Straits Research [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://straitsresearch.com/report/pvc-window-profiles-market>.
9. Бізнес-інформаційна платформа для європейської пластмасової промисловості [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.plasteurope.com>.
10. Дайджест Plasteurope [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.plasteurope.com/news/PVC_RECYCLING_t245264.

УДК: 54.057

SOL-GEL SYNTHESIS OF ZnO PHOTOCATALYST FOR DICLOFENAC DEGRADATION

Klimenkov O. M., Hutsul K. R., Ivanenko I. M¹., Shust V. P².

¹Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37, Prospect Beresteiskyi (former Peremohy), Kyiv, 03056
aleshaklemenkov@gmail.com

²State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management
str. Metropolitan Vasyl Lypkivskiyi 35, building 2, Kyiv, 03035

The study is devoted to the structural parameters and photocatalytic activity of ZnO synthesized by the sol-gel method. The synthesized ZnO photocatalytic activity was studied in the model process of photodegradation of the pharmaceutical substance diclofenac sodium in laboratory conditions. Its crystal structure and phase composition were determined by X-ray diffraction methods. The optical width of the band gap was studied by the diffuse reflectance method. The chemical composition of the surface was studied by infrared (IR) spectroscopy. Taking into account literature data, a mechanism of photocatalytic degradation of diclofenac sodium is proposed. The synthesized ZnO photocatalyst was tested in the process of photodegradation of sodium diclofenac at a concentration of 25 mg/dm³ using three different types of irradiation: visible, ultraviolet (UV) lamps with a power of 8 and 24 W. The highest degree of photocatalytic degradation of 45% was observed when exposed for 10 minutes to an 8 W UV lamp. A degree of degradation of 38% was observed when exposed to a UV lamp with a power of 24 W. The obtained experimental results confirm the high efficiency of the synthesized photocatalyst for the removal of the pharmaceutical substance diclofenac sodium. The weight of the photocatalyst in the experiments was 0.01 g, which means that its dose was equal to 0.0375 g/g. The obtained experimental data confirmed the high efficiency of the synthesized photocatalyst for the decomposition of the pharmaceutical substance diclofenac sodium.

Keywords: *photocatalyst, zinc oxide, synthesis, sol-gel, sodium diclofenaco*

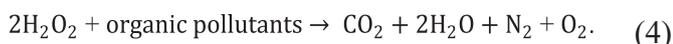
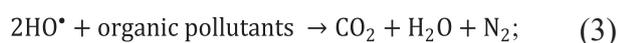
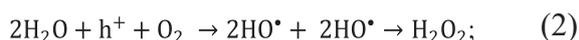
Introduction. Organic pollutants cause great harm to human health and the ecosystem. However, despite that, the amount of treated highly polluted wastewater is only increasing in the vast majority of industries. It is linked to the rapid development of pharmaceutical and textile industries, as well as the lack of modern water purifying methods. Pharmaceutical pollutants are hazardous for all living organisms. In addition, they are more difficult to separate from the environment.

The worldwide popularity of diclofenac (usually in the form of sodium, potassium, or ammonium salt) as an anti-inflammatory and antipyretic drug is difficult to deny since its consumption amounts to several hundred tons annually [1]. Because of this, diclofenac is one of the most widespread pollutants in wastewater and surface water. Studies have shown its effects on rats, brook trout, and sea urchins. As a result of the prolonged exposure of diclofenac to animals, damage to their tissues and biochemical functions was observed, as a result of which the probability of animal mortality increased, as well as damage to the gastrointestinal tract and a decrease in the growth rate of test subjects were reported [2-5].

The presence of diclofenac in surface and wastewater and its high toxicity was causing concern, so the European Government has created an addendum to the environmental quality standards, which contained maximum permissible concentrations of diclofenac of chronic toxicity of 0.1-0.01 µg/dm³ and acute toxicity of 75-7.5 µg/dm³ [6]. To meet the latest standards, such methods of cleaning the specified pollutant from the water

environment as adsorption, membrane separation, and oxidation methods were studied.

Photocatalysis is the process of initiating a photocatalytic reaction that occurs as a result of ultraviolet irradiation of a photosensitive substance in an aqueous environment. Such a substance is called a photocatalyst, which is, in most cases, an oxide semiconductor (heterogeneous photocatalysis) that adsorbs a quantum of light with an energy greater than or equal to the energy of its band gap, as a result of which an electron-hole pair (e^-/h^+) is generated, which plays the main role in the process of photocatalysis. The vast majority of electrons of the valence band e^- and holes of the conduction band h^+ recombine, and other charge carriers migrate to the surface and initiate a series of chemical reactions with pollutants (1-3) adsorbed on the surface of the photocatalyst [14].



The mechanism of photocatalytic degradation of sodium diclofenac is very important, as it provides insight into the formation of possible intermediate compounds that were formed as a result of underoxidation. A possible mechanism is shown in Figure 1 [16]. Photocatalytic oxidation occurs

to a greater extent due to the attack of the hydroxyl radical group $\bullet OH$. The most obvious are the following reactions: hydrogenation, dechlorination, decarboxylation, and cleavage of N–C bonds. First, sodium is removed from diclofenac sodium salt, forming the independent compound diclofenac. As a result of the oxidation-reduction reaction between diclofenac and the $\bullet OH$ radical, an intermediate compound (1) is formed. As a result of the cleavage of N–C bonds, the intermediate compound (1) contributes to the formation of an intermediate (2) [17]. At the same time, the reaction of elimination of Cl atoms can occur, forming a compound (3). An intermediate compound (4) can be formed due to decarboxylation. Compound (5) is formed due to direct action with $\bullet OH$ radical. Intermediate compounds (7), (8), and (9) are formed due to the rupture of the aromatic ring and N–C bond. The intermediate product (9) is transformed into low molecular weight glycolic acid (10) [17]. Another option was an intermediate product of intramolecular condensation (11). As the major intramolecular condensation product continues to be hydroxylated and dechlorinated, the C–N and benzene ring structures are cleaved to form the low molecular weight compounds (12), (13), and (14). Depending on the spatial orientation of the hydroxyl radical attack, cleavage of the C–N bond leads to the formation of maleimide (14) and maleic acid (15) [16].

Table 1

Pros and cons of the most promising diclofenac detoxification methods

Diclofenac detoxification method	Pros	Cons
Adsorption	Does not create genotoxic waste [7]	The short life cycle of the adsorbing material due to the difficulty of its regeneration and separation from the adsorbed material, as well as economic aspects [8]
Membrane separation (micro-, ultra-, nanofiltration and reverse osmosis)	Effective purification at low pollutant concentrations [9], high degree of purification >90% (reverse osmosis and nanofiltration) [10]	The phenomenon of concentration polarization, due to which the dissolved substance accumulates in the pores of the membrane, which leads to a decrease in the productivity of the membrane and limiting its life cycle, also requires significant economic costs [11]
Oxidative methods (photolysis, ozonation, oxidation with Fenton's reagent, sonochemical oxidation, electrochemical oxidation and heterogeneous photocatalysis)	Low cost, non-toxicity, chemical stability, possible reuse of reagents, effective purification from pollutants [12]	Toxic intermediate compounds formation risk [13]

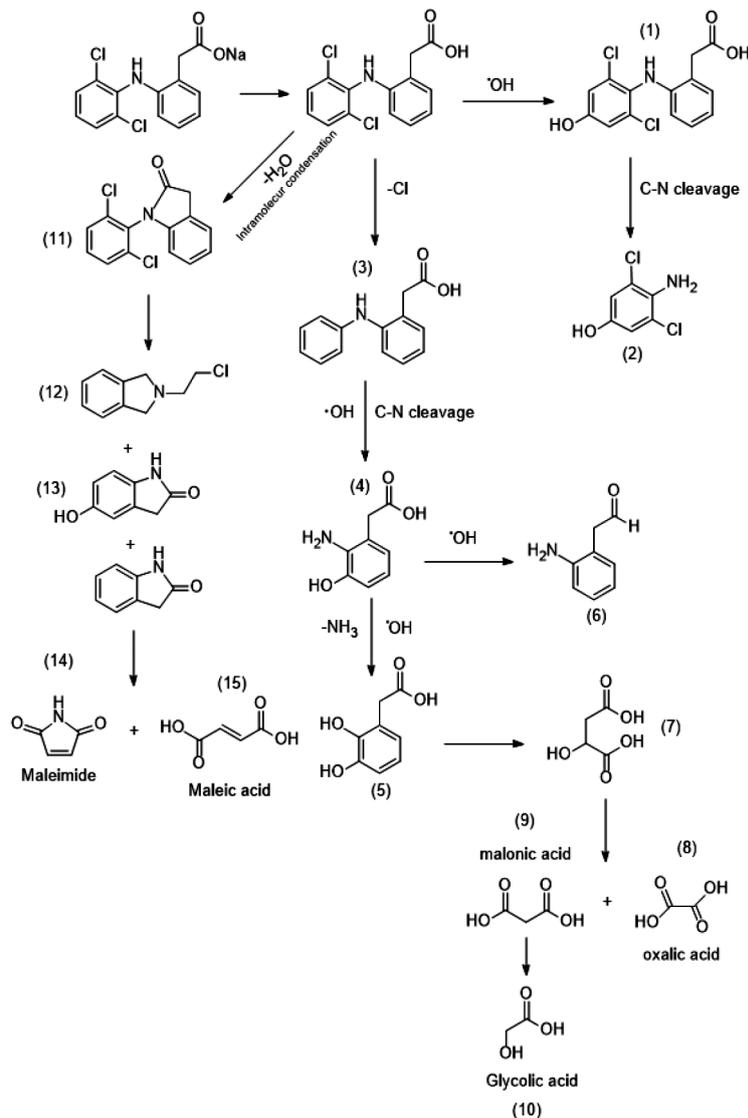


Fig. 1 Probable mechanism of diclofenac sodium photocatalytic degradation [16]

Among many different photocatalysts, ZnO receives almost the most attention due to its high ability to migrate charge, cheapness, and versatile morphological structure. However, there are also some limitations, namely low photoactivity under visible light irradiation and photocorrosion [15].

The sol-gel method, in comparison with other synthesis methods, is an ideal option for obtaining a nanosized product that directly affects the efficiency of the photocatalyst. The main stage of this technique is the low-temperature formation of a gel, as a result of hydrolysis and physical, mainly Van Der Waals interaction. Among other things, the sol-gel method is green, does not require high temperatures and bulky equipment, and is easy to operate and control.

The aim of the study: дослідження поверхневих та структурно-кристалічних параметрів та фотокаталітичної активності ZnO синтезованого золь-гель методом. Вивчення фотоактивності в модельному процесі фотодеградації фармацевтичної субстанції диклофенак натрію.

Synthesis. The ZnO photocatalyst was synthesized by the sol-gel method. Anhydrous zinc acetate $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ was used as a raw material, and ethanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ with a concentration of 95 vol.% was used as a solvent. An aqueous solution of sodium hydroxide NaOH with a 0.225 mol/dm^3 concentration was used to initiate the hydrolysis reaction. 10 grams of zinc acetate were dissolved in 300 cm^3 of ethanol with constant stirring at a temperature of 80°C for 10 hours. Next, the resulting

mixture was cooled to 0°C and sodium hydroxide solution was gradually added dropwise until the reaction mixture reached pH 8. The formation of a white opalescent gel was observed. The mixture was left for the aging stage, which lasted 72 hours. The resulting suspension was filtered, washed with ethyl alcohol and water, dried for 1 hour at a temperature of 100°C, and baked for 3 hours at a temperature of 500°C. Gray finely dispersed ZnO powder was obtained.

Analysis of photocatalytic activity. The first experiment was devoted to the study of the diclofenac sodium solutions' photostability under direct UV and visible light. For this, an aqueous solution of diclofenac sodium with a concentration of 25 mg/dm³ was prepared, 15 cm³ of the freshly prepared solution was transferred to a beaker with a width of 7.5 cm and a height of 4.5 cm, placed on a magnetic stirrer, where mixing took place for 30 minutes under irradiation with a UV lamp with a power of 8 and 24 W, as well as a visible light lamp. After that, the experiment was repeated with the addition of the synthesized ZnO photocatalyst weighing 0.01 g for 10 minutes. After that, the suspension was filtered using a syringe membrane filter, and the absorption

spectrum of the solutions was recorded using a UV-Vis spectrophotometer.

Analytical quantitative assessment of the residual concentration of the pollutant. The degree of absorbed electromagnetic radiation was calculated according to the formula:

$$a = \frac{A_0 - A}{A} * 100\%, \tag{5}$$

where A₀ – optical density of the original solution; A – optical density of the obtained solution.

The residual concentration of diclofenac was calculated according to the formula:

$$C = \frac{A * C_0}{A_0}, \tag{6}$$

where C₀ – concentration of the original dye solution, mg/dm³.

The degree of photodegradation was calculated according to the formula:

$$X = \frac{C_0 - C}{C_0}, \tag{7}$$

According to Figure 1, we found the necessary operators (A₀ and A) and performed calculations.

The presence of the ZnO photocatalyst increased the degree of diclofenac degradation in aqueous solution to 45% in comparison to self-degradation of

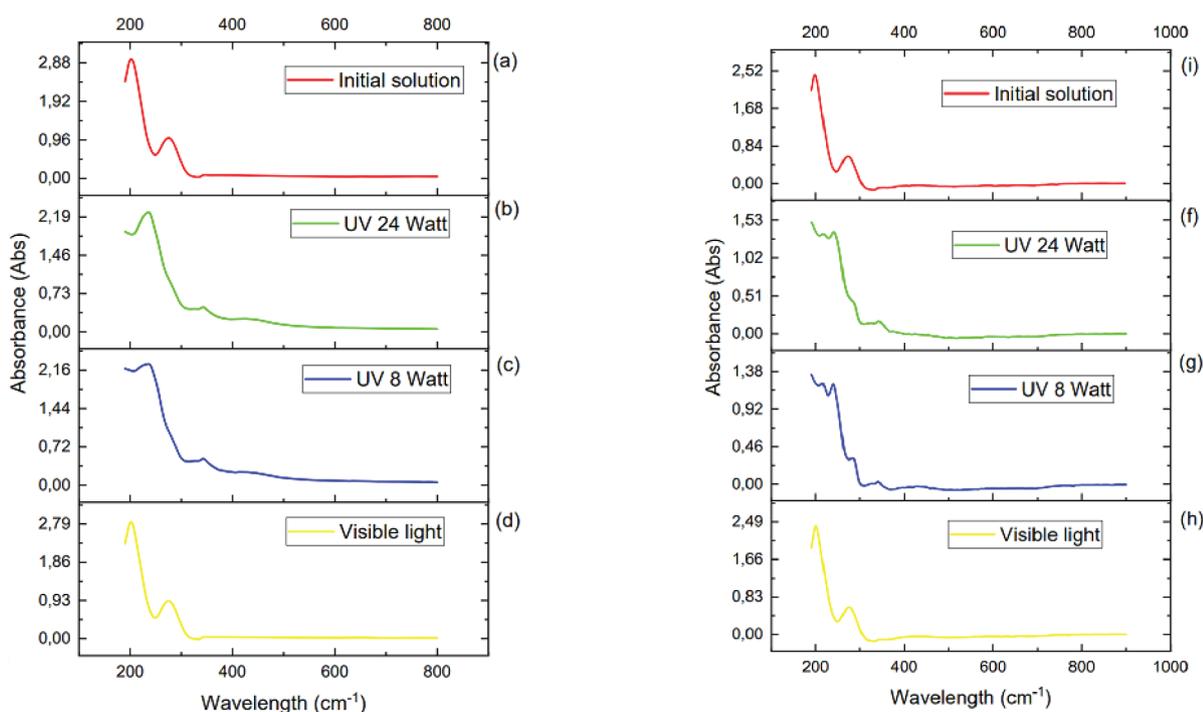


Fig. 2 Obtained radiation spectra of the model pollutant without a photocatalyst ((a)-(d)) and with a photocatalyst ((i)-(h))

Calculation results

Quantitative evaluation	Type of exposure			Experiment time, min
	Visible light	UV lamp 8 W	UV lamp 24 W	
a, %	4,7	30,8	30,5	30 min
C, mg/dm ³	23,85	19,10	19,14	
X, %	4,6	23,6	23,4	
a (ZnO), %	1,4	81,6	62,1	10 min
C (ZnO), mg/dm ³	24,6	13,76	15,47	
X(ZnO), %	1,6	45	38	

the pollutant (30,8%). The duration of the experiment with the photocatalyst was 3 times shorter than without the photocatalyst. The most effective type of irradiation in this study turned out to be a UV lamp with a power of 8 W. Overall, with an increase in the power of ultraviolet radiation from 8 to 24 W, the degree of degradation increased insignificantly. As previously reported, ZnO has low photoactivity when exposed to visible light, which this study proves, since the degree of purification of diclofenac in the presence of ZnO when exposed to visible light was equal to 1,6%.

It is also worth noting that after the irradiation of diclofenac sodium without the participation of a photocatalyst, the solution acquired a green color, which can be explained by the formation of one or more intermediate compounds from the mechanism presented in Figure 1. Conversely, the irradiation of diclofenac sodium with a photocatalyst left a transparent solution, as a result of which it is possible to conclude that the photocatalytic degradation of the pollutant was more complete than self-degradation.

Characteristics of the photocatalyst. X-ray phase analysis was carried out to determine the structural and crystalline parameters (crystallite size, degrees of crystallinity, and phase composition of the synthesized zinc oxide). The diffraction pattern in Figure 3 shows an exceptionally pure hexagonal (wurtzite) structure with characteristic diffraction peaks at $2\theta = 32^\circ, 34^\circ, 36^\circ, 48^\circ, 57^\circ, 63^\circ, 66^\circ, 68^\circ, 69^\circ$. It confirms the 100% degree of crystallinity of the synthesized zinc oxide, which indicates the effectiveness of the chosen synthesis method. The crystallite size, calculated by the Williamson-Hall method, was 34.8 nm, which confirms the nanodispersity of the synthesized ZnO powder.

Diffuse reflectance spectroscopy with a UV-visible spectrophotometer was used to obtain data for calculating the optical band gap. The latter, in turn, is a necessary thermodynamic characteristic of any photocatalyst. Calculated by the Kubelka-Munk method, it was $E_g = 3,19$ eV for the synthesized ZnO.

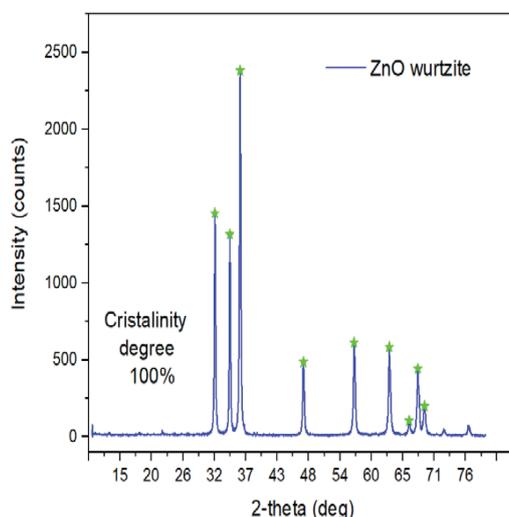


Fig. 3 X-ray spectrum of ZnO

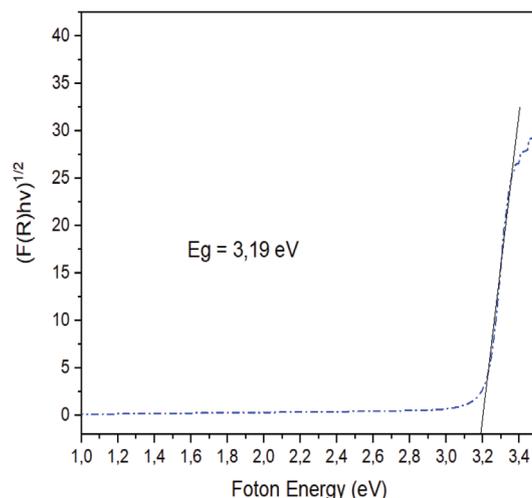


Fig. 4 The band gap of ZnO, calculated by the Kubelka-Munk method

The results of the study of synthesized ZnO using the method of infrared spectroscopy. The peak at 3182 cm^{-1} indicates valence vibrations of the -OH group and deformation of the H-O-H bond, which indicates the presence of a small amount of water in the sample. The band at 2336 cm^{-1} is associated with CO_2 molecules adsorbed on the ZnO surface. The bands at 889 and 836 cm^{-1} are associated with the deformation of the metal-oxygen double bond, which in this case corresponds to the Zn=O bond. Symmetric stretching is observed between the peaks at 1533 and 1365 cm^{-1} due to the presence of C-O and C-O-C bonds, which may be related to the presence of trace amounts of impurities in the sample.

Conclusions. Diclofenac is one of the most widespread and toxic pharmaceutical pollutants in wastewater, so the latest technologies and research

on its treatment are a priority, especially in the fields of ecology and water treatment. One such technology is photocatalysis, where the oxide semiconductor ZnO synthesized by the sol-gel method was studied. It excelled in the photodegradation of diclofenac sodium, the maximum degree of degradation of which was 45% in 10 minutes of irradiation with an 8 W UV lamp. This is a good result, taking into account the cheapness of reagents and products, simplicity of synthesis, environmental safety, and the well-known difficulty of isolating diclofenac from natural sources. However, there are still unresolved complications related to fast electron recombination and poor photoactivity when exposed to visible light. Despite this, further research remains promising, as the synthesized zinc oxide has excellent crystalline structure and surface chemistry, as confirmed by X-ray phase and infrared studies.

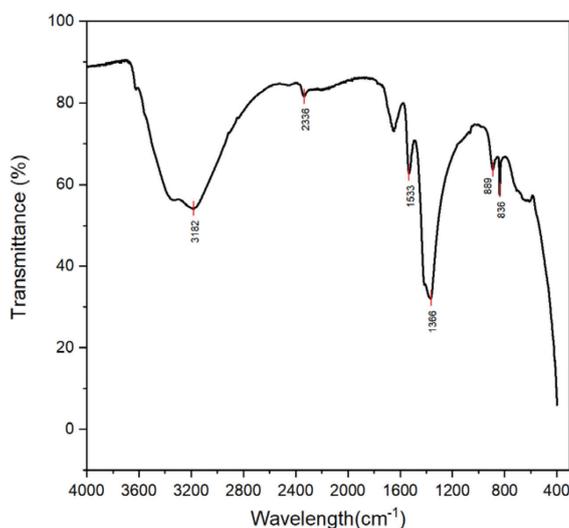


Fig. 5 IR spectrum ZnO

REFERENCES

1. Rapid and complete degradation of diclofenac by native soil microorganisms / S. J. Facey et al. *Environmental technology & innovation*. 2018. Vol. 10. P. 55–61. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.12.009>.
2. Diclofenac induced gastrointestinal and renal toxicity is alleviated by thymoquinone treatment / İ. Ö. Aycan et al. *Food and chemical toxicology*. 2018. Vol. 118. P. 795–804. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.06.038>.
3. Impact of the NSAID diclofenac on survival, development, behaviour and health of embryonic and juvenile stages of brown trout, *salmo trutta f. fario* / S. Schwarz et al. *Science of the total environment*. 2017. Vol. 607-608. P. 1026–1036. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.042>.
4. Toxicity screening of Diclofenac, Propranolol, Sertraline and Simvastatin using *Danio rerio* and *Paracentrotus lividus* embryo bioassays / S. Ribeiro et al. *Ecotoxicology and environmental safety*. 2015. Vol. 114. P. 67–74. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.01.008>.
5. Mehinto A. C., Hill E. M., Tyler C. R. Uptake and biological effects of environmentally relevant concentrations of the nonsteroidal anti-inflammatory pharmaceutical diclofenac in rainbow trout (*oncorhynchus mykiss*). *Environmental science & technology*. 2010. Vol. 44, no. 6. P. 2176–2182. URL: <https://doi.org/10.1021/es903702m>.
6. A review on environmental monitoring of water organic pollutants identified by EU guidelines / J. C. G. Sousa et al. *Journal of hazardous materials*. 2018. Vol. 344. P. 146–162. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.09.058>.
7. Efficient removal of anti-inflammatory from solution by Fe-containing activated carbon: adsorption kinetics, isotherms, and thermodynamics / F. Tomul et al. *Journal of environmental management*. 2019. Vol. 238. P. 296–306. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.088>.
8. Alternative techniques for caffeine removal from wastewater: an overview of opportunities and challenges / C. V. T. Riguetto et al. *Journal of water process engineering*. 2020. Vol. 35. P. 101231. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101231>.
9. Removal of diclofenac from wastewater: a comprehensive review of detection, characteristics and tertiary treatment techniques / I. Alessandretti et al. *Journal of environmental chemical engineering*. 2021. Vol. 9, no. 6. P. 106743. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106743>.
10. Assessing potential of nanofiltration and reverse osmosis for removal of toxic pharmaceuticals from water / K. P. M. Licona et al. *Journal of water process engineering*. 2018. Vol. 25. P. 195–204. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.08.002>.
11. A roadmap for the development and applications of silicon carbide membranes for liquid filtration: recent advancements, challenges, and perspectives / E. Eray et al. *Chemical engineering journal*. 2021. Vol. 414. P. 128826. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128826>.
12. Novel zno photocatalysts for pollutants' abatement under solar radiation at pilot plant scale / C. Bogatu et al. *Catalysis today*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2022.11.008>.
13. Degradation of tris-(2-chloroisopropyl) phosphate via UV/TiO₂ photocatalysis: kinetic, pathway, and security risk assessment of degradation intermediates using proteomic analyses / X. Yu et al. *Chemical engineering journal*. 2019. Vol. 374. P. 263–273. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.05.193>.
14. Li X., Yu J., Jiang C. Principle and surface science of photocatalysis. *Interface science and technology*. 2020. P. 1–38. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102890-2.00001-4>.
15. Hydrothermal synthesis of ZnO photocatalyst for detoxification of anionic azo dyes and antibiotic / T. Sansenya et al. *Journal of physics and chemistry of solids*. 2022. Vol. 160. P. 110353. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2021.110353>.
16. Photocatalytic degradation of diclofenac using a novel double Z-scheme catalyst (O-g-C₃N₄/ZnO/TiO₂@halloysite nanotubes): degradation mechanism, identification of by-products and environmental implementation / N. Aghababaei et al. *Journal of water process engineering*. 2023. Vol. 53. P. 103702. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103702>.
17. Synergistic adsorption and degradation of diclofenac by zero-valent iron modified spent bleaching earth carbon: mechanism and toxicity assessment / J. Zhang et al. *Journal of hazardous materials*. 2022. Vol. 432. P. 128753. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128753>.

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

Висоцька Тетяна Іванівна (Київ) – кандидат хімічних наук, доцент. Кафедра екології та безпеки життєдіяльності. Державний університет інфраструктури та технологій.

Гончаренко Артем Вадимович (Київ) – аспірант. Київський національний університет будівництва і архітектури.

Громова Інна Юріївна (Київ) – кандидат технічних наук, доцент. Кафедра екологічного аудиту та технологій захисту довкілля. Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління.

Гуленко Олена Борисівна (Київ) – асистент. Кафедра екологічного аудиту та технологій захисту довкілля. Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління.

Гуцул Христина Ростиславівна (Київ) – аспірантка. Кафедра технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». ORCID ID: 0000-0002-4760-3605, SCOPUS ID: 57221954855.

Дудар Тамара Вікторівна (Київ) – доктор технічних наук, професор. Завідувачка кафедри екології. Національний авіаційний університет. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3114-9732>.

Іваненко Ірина Миколаївна (Київ) – кандидат хімічних наук, доцент. Кафедра технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». ORCID ID: 0000-0002-6885-3662, WoS ID: I-3482-2018, SCOPUS ID: 6506947399.

Кліменков Олексій Михайлович (Київ) – студент магістратури. Кафедра технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Кожевніков Сергій Вікторович (Київ) – аспірант. Київський національний університет будівництва і архітектури. Представник GEALAN Fenster-Systeme GmbH в Україні.

Купінський Ігор Володимирович (Київ) – аспірант. Київський національний університет будівництва і архітектури.

Ляшенко Василь Іванович (м. Жовті Води) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник. Начальник науково-дослідного відділу. Державне підприємство «Український науково-дослідний і проектно-розвідувальний інститут промислової технології». ORCID ID: 0000-0001-8361-4179.

Маршалл Данііл (Київ) – аспірант. Кафедра технологій захисту навколишнього середовища. Київський національний університет будівництва та архітектури, ORCID ID: 0000-0003-2984-3979.

Печений Володимир Леонідович (Київ) – аспірант. Завідувач лабораторії прикладної екології. Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління.

Пічкур Тетяна Валеріївна (Київ) – кандидат історичних наук, доцент. Кафедра екології та безпеки життєдіяльності. Державний університет інфраструктури та технологій.

Проскурнін Олег Аскольдович (Харків) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник. Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем».

Стусь Віктор Петрович (Дніпро) – доктор медичних наук, професор кафедри хірургії та урології. Дніпровський державний медичний університет. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4539-8126>.

Тищенко Юрій Євгенович (Київ) – кандидат геологічних наук. Завідувач лабораторії радіоекології. Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України».

Улицький Олег Андрійович (Київ) – доктор геологічних наук, професор. Директор Навчально-наукового інституту екобезпеки та управління. Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління.

Фролов Валерій Федорович (Київ) – доктор технічних наук, доцент, професор. Кафедра фізики. Київський національний університет будівництва і архітектури. ORCID ID: 0000-0003-1675-8476.

Шапвалов Віктор Анатолійович (Кривий Ріг) – кандидат технічних наук, доцент. Кафедра

охорони праці та цивільної безпеки. Криворізький національний університет. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5965-2869>.

Шусть Володимир Іванович (Київ) – асистент. Кафедра екологічного аудиту та технологій захисту довкілля. Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління.

Яненко Алла Миколаївна (Київ) – магістр. Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління.

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 десятковою 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 мовами.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

1. Текстовий редактор – Word for Windows.
2. Розмір сторінки: А4, 210x297.
3. Поля: верхнє, лівє, правє – 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 англійська 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](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/>